

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Сибирский федеральный университет»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

«ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И  
ТЕХНОЛОГИИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ»

Красноярск 2011

УДК 621.38

ББК 32.973.26-108.2

«ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ РАДИО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ». Курс лекций и презентаций для лекционных занятий / Г. М. Алдонин, А.М. Алешечкин, М.М. Валиханов, С.П. Желудько, О.А. Тронин – ИПЦ СФУ, 2011. – 360 с.

Курс лекций для дисциплины «Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств» предназначен для подготовки бакалавров направления 210100.62 «Радиотехника» при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» в соответствии с учебным планом относится к дисциплинам профессионального цикла подготовки (Б.3), является одной из завершающих дисциплин. Рассмотрены задачи, методы и особенности подготовки бакалавров в области конструирования и технологии радиоэлектронных средств и других родственных дисциплин. 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. Рассмотрены проблемы эргономики при проектировании электронной аппаратуры. Учебное пособие подготовлено в рамках выполнения инновационной образовательной программы по направлению «Информатизация и автоматизированные системы управления», реализуемой в ФГОУ ВПО СФУ в 2008 г.

## Содержание:

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. Организация проектирования РЭС. Ограничения при проектировании...	
1.1. Предмет проектирования РЭС.....	7
1.2. Ограничения при проектировании.....	21
1.3. Стандартизация в проектировании РЭС.....	36
2. Компоновка и несущие конструкции РЭС.....	49
2.1. Компоновка РЭС. Эргономическое и эстетическое качество конструкций РЭС.....	49
2.2. Несущие конструкции РЭС. Базовый метод и конструкционные системы.....	66
3. Обеспечение передачи информации. Проектирование линий связи.....	96
3.1. Проектирование объемного монтажа.....	96
3.2. Проектирование печатного монтажа.....	116
3.3. Волоконно-оптические линии передачи информации.....	143
4. Обеспечение надежной работы РЭС.....	147
4.1. Основные понятия надежности.....	147
4.2. Основы защиты РЭС от воздействий окружающей среды.....	161
4.3. Основы защиты РЭС от тепловых воздействий.....	172
4.4. Основы защиты РЭС от механических воздействий.....	181
4.5. Электромагнитная совместимость и защита РЭС от помех.....	193
4.6. Особенности проектирования РЭС различного назначения... ..	214
5. Технология производства РЭС.....	231
5.1. Виды технологических процессов.....	231
5.2. Этапы разработки технологических процессов.....	231
5.3. Технологические процессы и их виды.....	239
5.4. Выбор наиболее экономичного варианта ТП по себестоимости..	258
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	263
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	264

## 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
- НЭП — 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  
ФС — 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  
ЗП — эскизный проект  
ЭРЭ — электрорадиоэлемент

## Введение

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.

Приведены наиболее общие сведения по этим проблемам, достаточные для схемотехников, системотехников, программистов, конструкторов и технологов. В современной учебной и научно-технической литературе широко применяются термины «радиоэлектронная аппаратура» (РЭА), «компьютер», «электронно-вычислительные средства — ЭВС», «радиоэлектронные средства» (РЭС) и др. Принципиальных различий между этими терминами с точки зрения конструкторско-технологического проектирования нет. Поэтому наряду с термином «измерительные приборы» — (ИП) в дальнейшем изложении используется термин «Радиоэлектронные средства — ИП». 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. Рассмотрены проблемы эргодизайна в ИП.

## 1. Организация проектирования электронных средств. Ограничения при проектировании.

### 1.1. Предмет проектирования РЭС. Конструирование как область науки и техники. Сущность конструкции РЭС.

**Понятие конструкции РЭС.** 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), — нем. — *die Technologie*, фр. — *technologie*, англ. — *technology*.

Под конструкцией понимается совокупность деталей и материалов с разными физическими свойствами, находящимися в определенной физической связи (электромагнитной, тепловой, механической), обеспечивающее выполнение заданных функций с необходимой точностью и надежностью под влиянием внешних и внутренних воздействий и воспроизводимая в условиях производства. Конструкция определяет взаимное расположение частей в пространстве, способы их соединения, характер взаимодействия, а также материал, из которого они изготовлены. *Конструкция РЭС отличается рядом особенностей, которые выделяют ее в отдельный класс среди других конструкций:*

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

**Жизненный цикл изделия.** 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. 1.1.3. Здесь к эскизному проектированию можно отнести этапы 1—6, к техническому проекту - этапы 7—19. В двойную рамку заключены те этапы, полное или частичное выполнение которых зависит от участия в их выполнении специалистов-конструкторов и специалистов-технологов:

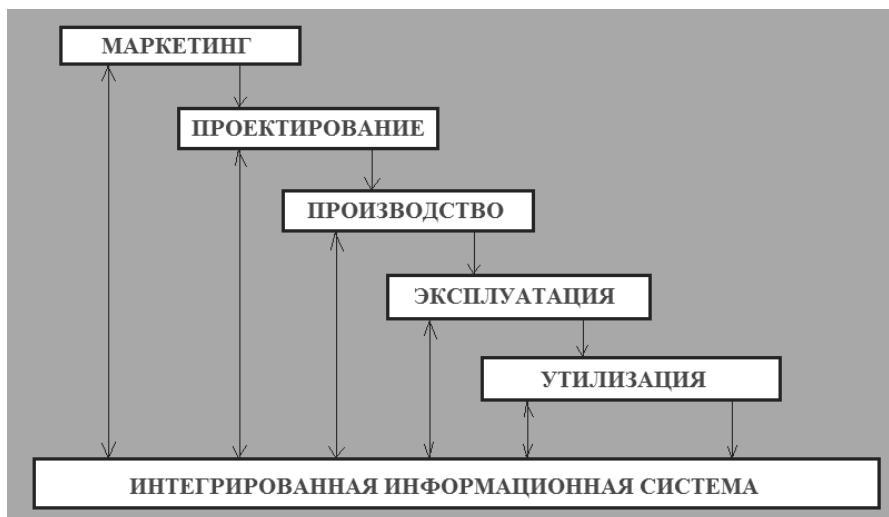


Рис. 1.1.1 Жизненный цикл электронного изделия

Система электронной поддержки жизненного цикла изделий позволяет обеспечить высокое качество выпускаемой продукции, сократить производственный цикл изготовления и существенно снизить себестоимость изготовления продукции.

**Структура и связи.** Условно изделия можно разбить на подсистемы в соответствии с принятой конструктивной иерархией (рис. 1.1.1). Исходные данные на конструирование для каждого рассматриваемого уровня конструктивной иерархии РЭС определяются в соответствии с результатами разработки более высокого уровня. Причем, назначение, конструктивно-технологические ограничения и условия эксплуатации отдельных подсистем должны соответствовать требованиям ТЗ на конструкцию изделия в целом.

**Представление конструкции РЭС как системы.** Под системой понимается совокупность элементов, объединенных некоторой формой взаимодействия. В виде системы может быть представлено проектируемое средство (ПС) в целом или его узел, отдельно его схема, конструкция, электрический, тепловой, механический или другой физический процесс. В свою очередь, системный подход - это представление проектируемого объекта в виде замкнутой системы и комплексное, с учетом всех взаимосвязей, изучение рассматриваемого объекта как единого целого с позиций системного анализа.

Представление ПС как системы и разделение его на подсистемы может осуществляться с различных позиций. В ряде случаев состав ПС рассматривают исходя из функциональных назначений узлов, конструктивных особенностей и т. д. Можно рассмотреть состав ПС с позиций задач проектирования, направленных на обеспечение его высоких показателей надежности, как это показано рис. 1.1.2.



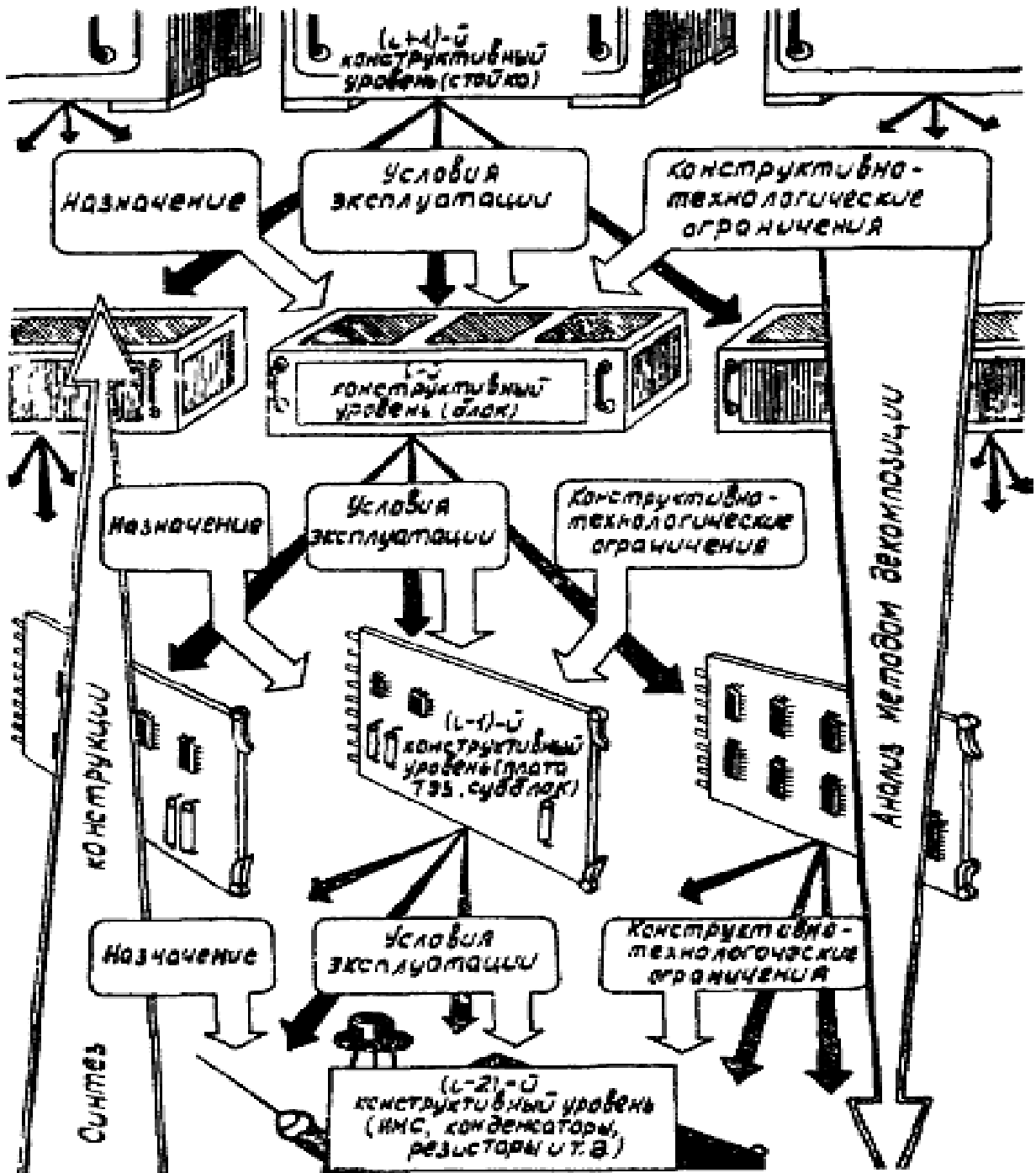


Рис. 1.1.2. Анализ и синтез конструкции РЭА

**Составные части процесса конструирования.** Конструкция создается в процессе конструирования, под которым понимают мыслительную, оформительскую и организаторскую деятельность. Основным содержанием конструирования является прогнозирование некоторой будущей структуры на основании современных данных, нахождение и отражение найденных связей между частями конструкции в конструкторской документации и внедрение ее

в производство и эксплуатацию. Одним из наиболее важных результатов конструирования является получение новой информации, которую можно использовать в последующих разработках. Эта информация может иметь позитивный (новое решение) или негативный характер. Отрицательный результат тоже полезен, так как позволяет избежать повторения ошибок.

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

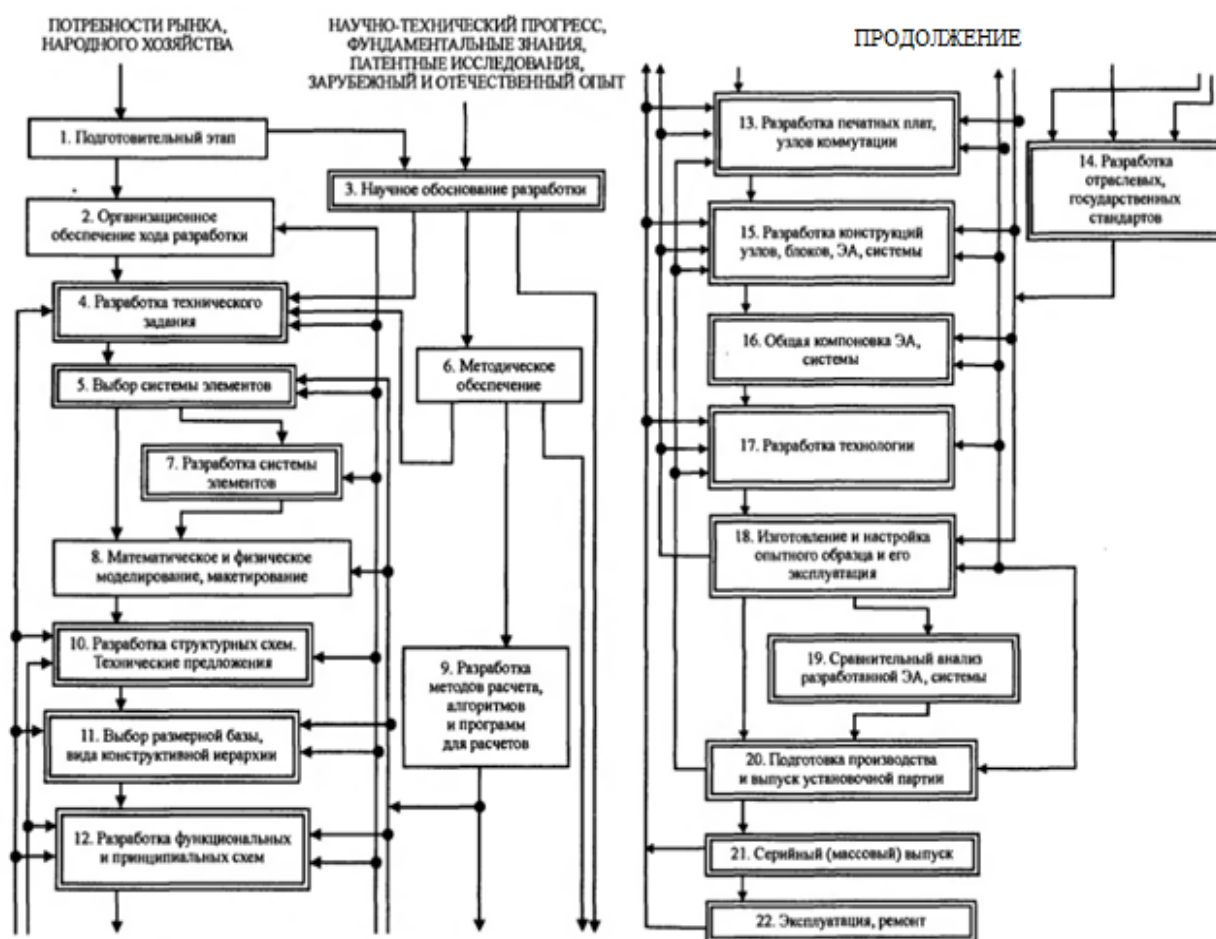
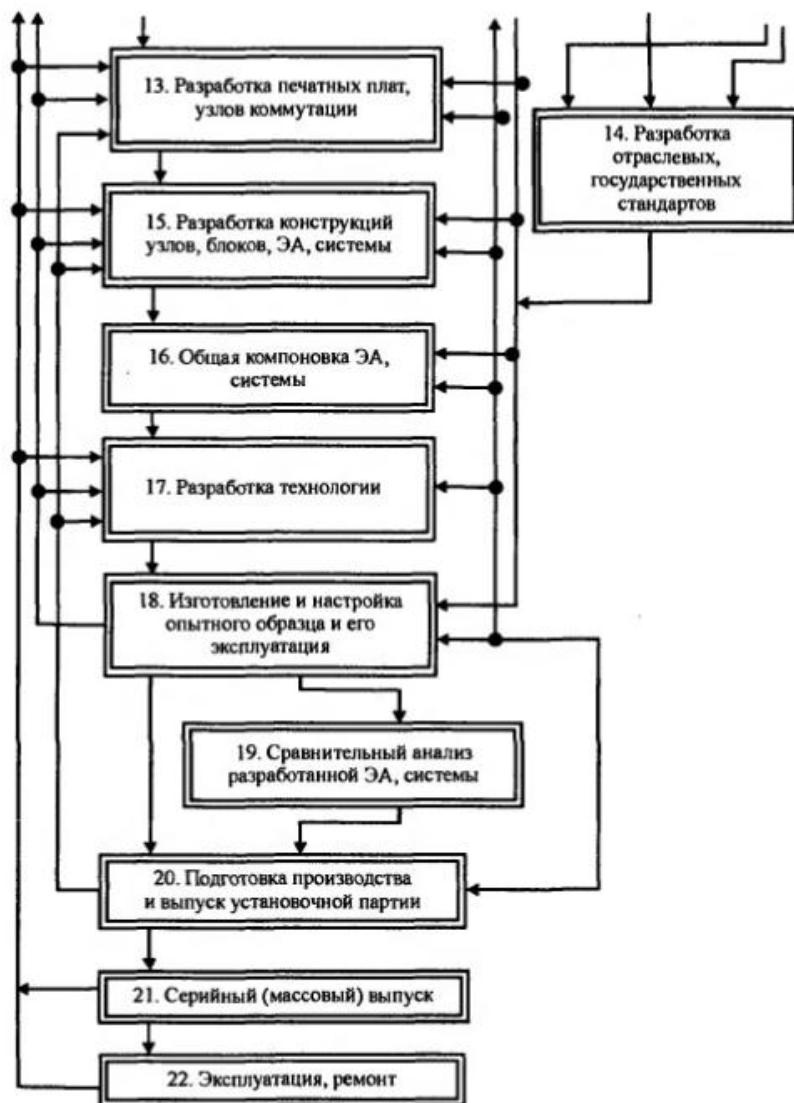


Рис. 1.1.3. Этапы разработки РЭС



Окончание рис. 1.1.3

**Взаимосвязь системных, схемных, конструктивных и технологических решений.** При проектировании конструкции РЭС, в той или иной степени, принимают участие различные подразделения предприятия: системотехнические (определение структуры РЭС, разбивка на наземную и бортовую части); схемотехнические (разработка схемы, разбивка ее на узлы); конструкторские (общая компоновка, выпуск конструкторской документации, сопровождение производства); технологические (установление последовательности изготовления, отработка режимов, подготовка производства); производственные. Кроме того, в разработке принимают участие вспомогательные службы: надежности (рекомендации по структурной и информационной избыточности, проведение испытаний); снабженческие (поставка материалов, покупных изделий); патентные; автоматизированного конструкторского

проектирования и т. д. Все эти подразделения состоят из различных специалистов. Координация работы предприятий, подразделений и специалистов осуществляется с помощью согласованных календарных планов или сетевых графиков.

**Конструкторская иерархия.** Конструкторская иерархия реализуется с помощью уровней разукрупнения РЭС, габаритные размеры которых стандартизованы. Конструкции нижестоящего уровня совместимы с конструкциями вышестоящих уровней. По конструктивной сложности различают следующие уровни разукрупнения РЭС: шкаф, блок, ячейка. Если устройства являются не только конструктивно, но и функционально законченными, то они называются модулями (от лат. *modulus* — составная часть, кратная целому).

Различают (ГОСТ 26632—85) следующие уровни разукрупнения РЭС в модульном исполнении по конструктивной сложности: радиоэлектронный модуль третьего уровня (РЭМ 3) — функционально законченный радиоэлектронный шкаф, пульт, стойка, выполненные на основе базовой несущей конструкции третьего уровня и обладающие свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости; модуль второго уровня (РЭМ 2) — блок или рама; модуль первого уровня (РЭМ 1) — ячейка, плата. Модуль нулевого уровня (РЭМ 0) конструктивно совместим с модулем первого уровня и реализует преобразование информации или преобразование сигналов. Обычно это элементы (ЭРЭ, ИС, элементы функциональной микроэлектроники), не имеющие самостоятельного эксплуатационного применения. Она состоит из шкафов, в которых размещают блоки четырех типоразмеров; в двух блоках (тип I) использованы функциональные ячейки, в двух других (тип II) — плоская панель, на которой расположены навесные ЭРЭ и электрические соединения.

**Роль конструкторов в создании РЭС.** Конструкторы и технологи взаимодействуют с самых ранних этапов до внедрения изделия в производство и эксплуатацию. На первых этапах решаются вопросы конструктивной и технологической преемственности изделий, выявляются оригинальные детали и узлы, необходимость в разработке новых техпроцессов. На более поздних этапах решаются вопросы компоновки с учетом требований удобства сборки, ремонта, контроля. Одновременно согласовываются параметры, подлежащие контролю, и допустимые отклонения на эти параметры. В ряде случаев в соответствии с технологическими требованиями конструкция может корректироваться: компоновка, значения параметров, допуски, материалы. В некоторых случаях может потребоваться доработка технологических процессов — повышение их стабильности или разрешающей способности; в ряде случаев может потребоваться разработка или освоение новых для данного предприятия технологических процессов (например, при замене монтажного основания

источника питания в виде двусторонней печатной платы на основе с металлической основой, полиамидной пленкой или керамикой, что резко улучшает теплоотвод и позволяет сократить габариты изделия). Взаимодействие конструкторов и технологов особенно тесно при согласовании конструкторской документации с технологами и при оценке технологичности конструкции на всех этапах конструкторского проектирования.

**Результат конструирования – создание комплекта конструкторской документации (КД), предназначенной для производства РЭС.** 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. 1.1.1, 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 1.1.1.

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

**Организация опытно-конструкторских работ (ОКР) и научно-исследовательских работ (НИР).** Ввиду того, что требования к параметрам разрабатываемых РЭС часто противоречивы (например, малая стоимость и высокая надежность), исходная информация для вновь создаваемых изделий не является достаточно полной, а исполнители при работе допускают ошибки, разработку РЭС и его конструкции проводят в несколько стадий (не менее двух): научно-исследовательская работа (НИР) и опытно-конструкторская (ОКР). Каждая стадия включает несколько этапов. В ходе выполнения работ на стадиях и этапах происходит постепенное уточнение принимаемых решений и нахождение оптимального. При этом устраняются ошибки, которые могут быть допущены как руководителями (ошибки планирования и др.), так и исполнителями (неправильный выбор технических решений, ошибки при выполнении конструкторской документации и т. д.). Причиной ошибок являются, как правило, недостаточная квалификация, недостаток информации, а также повышенная утомляемость работников при сжатых сроках разработки. Спецификой разработки РЭС является то, что на всех стадиях и этапах различные специалисты взаимодействуют друг с другом, с самого начала разработки.

*Основные этапы проведения НИР:*

- 1) предплановый патентный поиск;
- 2) разработка и согласование с заказчиком технического задания, государственная регистрация НИР;
- 3) подготовительный этап — выбор направлений исследования, разработка, согласование и утверждение частных технических заданий на основные части НИР;
- 4) основной этап — теоретические и экспериментальные исследования (выполнение теоретических изысканий, расчетов, математического моделирования), обработка результатов исследований, составление и оформление технической документации;
- 5) заключительный этап — обобщение результатов и оценка выполненной НИР (составление карты технического уровня, оценка полноты и качества проведенной НИР, подготовка к предъявлению работы к приемке);
- 6) приемка НИР, обсуждение и согласование задания на проведение ОКР, государственный учет НИР.

Этапы ОКР: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, разработка рабочей документации.

**Отработка документации для производства.** Рабочая документация — это совокупность конструкторской документации, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца, установочной серии, серийного образца. После заводских испытаний опытного образца конструкторской документации присваивается литера «О»; после государственных, межведомственных, приемочных и других видов испытаний — литера «О<sub>1</sub>»; на

последующих стадиях (после повторных испытаний изготовленных изделий) — литеры «О<sub>2</sub>», «О<sub>3</sub>» и т. д. Конструкторская документация на изделие для установочной серии имеет литеру «У»; после испытаний установочной серии — литеру «А». После корректировки документации испытательной (головной) серии конструкторской документации присваивается литера «Б», что дает право наладить серийное или массовое производство изделия. Документации на изделие для разового изготовления или нескольких изделий присваивают литеру «И».

**Поколения РЭС.** РЭС первого поколения (20—50-е годы) были построены с использованием электровакуумных ламп, дискретных ЭРЭ, проводных электрических связей; ко второму поколению РЭС (50—60-е годы) относят конструкции РЭС на печатных платах и дискретных полупроводниковых приборах; к третьему — конструкции на печатных платах и ИС малой степени интеграции (60—70-е годы). В конструкциях РЭС четвертого поколения применены БИС, многослойные печатные платы, гибкие печатные шлейфы, микрополосковые линии. В настоящее время развиваются РЭС пятого поколения, в которых находят применение приборы функциональной микроэлектроники. Широкое распространение этих РЭС ожидается к концу века.

Рассмотрим специфику конструкций аппаратуры первых четырех поколений. Аппаратура первого поколения имела блочную конструкцию. Каждый блок — осциллограф, вольтметр, радиоприемник, блок автоматики (рис. 1.1.4), блок аналоговой РЭС (рис. 1.1.5) и т. д. — имел определенное функциональное назначение. К недостаткам этой аппаратуры, в состав которой входили электровакуумные приборы и дискретные ЭРЭ, относятся малые плотности компоновки, степень унификации несущих конструкции, неприспособленность конструкции к механизации и автоматизации сборочно-монтажных работ.

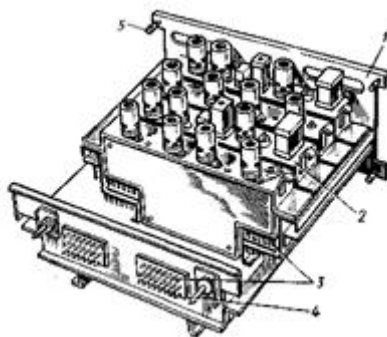


Рис. 1.1.4. Конструкция РЭС первого поколения

1-основание с передней и задней панелью; 2-функциональные модули с электровакуумными лампами; 3-разъемные соединители для подключения модулей и внешних связей; 4-направляющие штыри; 5-винты крепления блока в стойке

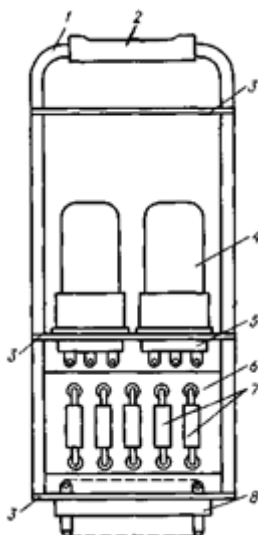


Рис. 1.1.5. Компоновка ячейки аналоговой ЭВМ первого поколения

1-рамка; 2-ручка; 3-поперечины; 4-электроракуумные лампы; 5-ламповая панелька; 6-печатная плата; 7-ЭРЭ; 8-соединитель с плоскими контактами

Характерной особенностью аппаратуры второго поколения является применение модулей на печатных платах (рис. 1.1.6), микромодулей этажерочной конструкции на керамических платах (рис.1.1.7). Из таких модулей компоновались более сложные узлы (рис. 1.1.8). В модульных конструкциях удалось увеличить плотность компоновки как благодаря замене электроракуумных приборов полупроводниковыми так и благодаря более плотной компоновке дискретных ЭРЭ. Ремонтпригодность аппаратуры на модулях ниже по сравнению с блочной аппаратурой, так как при выходе из строя какого-либо элемента приходится заменять целый модуль.

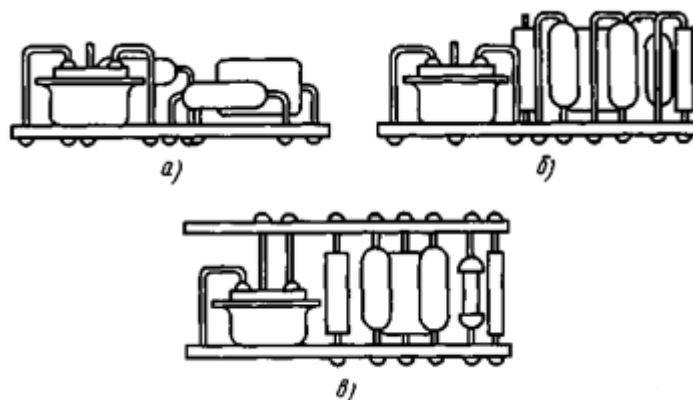


Рис. 1.1.6. Компоновочные схемы модулей на печатных платах.  
*а* - горизонтальное; *б* - вертикальное; *в* - этажерчатое расположение деталей между платами



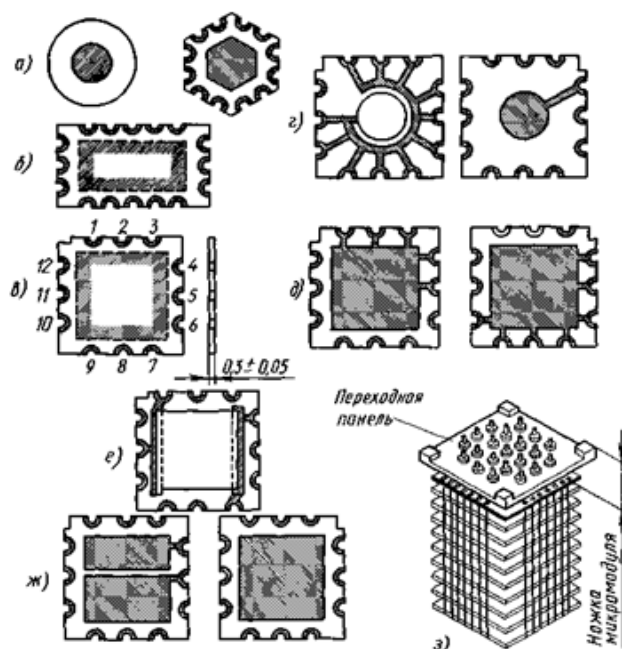


Рис. 1.1.7. Характерная форма микроплат (*а-в*), примеры плат-полуфабрикатов (*г-ж*), этажерчатый микромодуль с 28 ленточными соединениями (*з*)

Аппаратура третьего поколения выполняется на ИС первой и второй степени интеграции, являющихся функциональными модулями, из которых можно скомпоновать более сложные узлы. Конструктивно такие узлы представляют собой двустороннюю или многослойную печатную плату с установленными на ней ИС (рис. 1.1.9). Подобные конструкции имеют высокую плотность компоновки, их функциональная сложность соответствует сложности блока первых поколений. Применение корпусированных ИС позволило повысить надежность, степень унификации, взаимозаменяемость, уменьшить габариты, массу, иногда стоимость устройства по сравнению с РЭС второго поколения. Однако использование корпусированных ИС приводит к значительной потере объема РЭС.

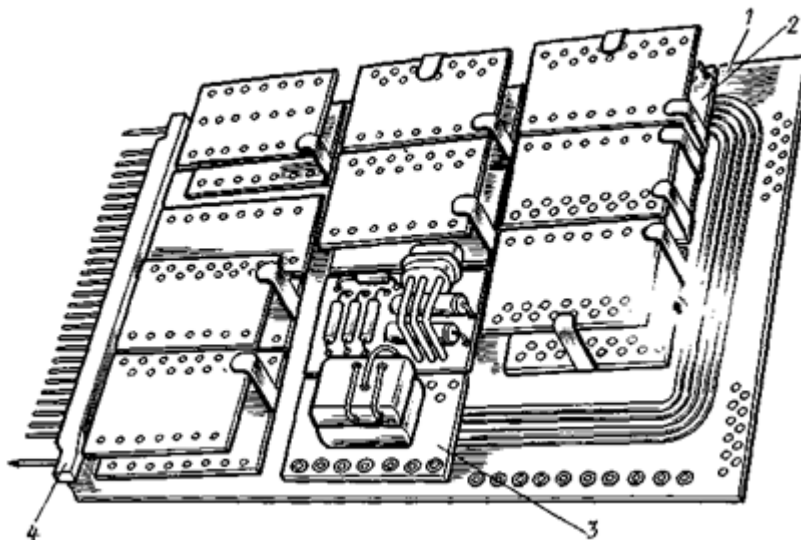


Рис. 1.1.8. Компоновка ячейки ЦВМ второго поколения с использованием модулей на печатных платах. 1-двусторонняя печатная плата; 2-двухплатный модуль; 3-одноплатный модуль; 4-соединитель

Аппаратура четвертого поколения используется в бортовых и СВЧ РЭС (рис. 1.1.10) и выполняется с использованием бескорпусных элементов, герметизируемых в составе блока. Плотность компоновки при этом увеличивается, но ремонтпригодность уменьшается, так как при выходе из строя одного элемента приходится при ремонте либо разгерметизировать блок, либо заменить его.

Эволюция конструкций аппаратуры шла неразрывно с успехами в области технологии производства. Освоение электровакуумных приборов потребовало создания металлостеклянных спаев, разработки методов контроля герметичности приборов. Особенно большое влияние на конструкцию РЭС оказало освоение технологии печатных плат, интегральной полупроводниковой и гибридной технологии производства ИС и приборов функциональной микроэлектроники.

Дальнейшего совершенствования конструкций и методов конструирования РЭС следует ожидать в результате внедрения ЭВМ в конструирование и производство, дальнейшего расширения частотного диапазона электромагнитных сигналов, использования уже изученных и малоизученных физических явлений, новых материалов, расширения областей применения РЭС. Расширение использования ЭВМ для проектных конструкторских работ связывают с развитием САПР.

Появления новых конструкций можно ожидать в связи с расширением частотного диапазона сигналов в оптическую область спектра. Одной из таких новых конструкций, вероятно, будет конструкция памяти сверхбольшой емкости (до 10 бит), построенной с использованием голографии и лазерной

техники. Подобная память позволит создавать банки и базы данных с широкими возможностями и приблизит создание искусственного интеллекта.

Новые конструкции должны появиться и в связи с широким внедрением приборов функциональной микроэлектроники, основанных на хорошо изученных эффектах, а также за счет использования малоизученных в настоящее время эффектов (например, эффекта сверхпроводимости при нормальных или повышенных температурах).

Создание новых конструкций возможно и в результате появления новых материалов, например сплавов, полученных в условиях невесомости, и сплавов с более совершенной кристаллической решеткой.

Большого количества новых конструкций можно ожидать от расширения областей использования РЭС, особенно в бытовой сфере: в измерительной, медицинской радио- и телевизионной технике. Новизна конструкций может быть обусловлена и использованием перспективных решений, многие из которых рассмотрены в данной книге.

Несмотря на расширение применения для конструкторского проектирования вычислительной техники и САПР, роль человека-конструктора не уменьшится, а возрастет, так как только человек может решать новые неформальные задачи. Поэтому в дальнейшем за чертежным прибором останутся только самые опытные конструкторы.

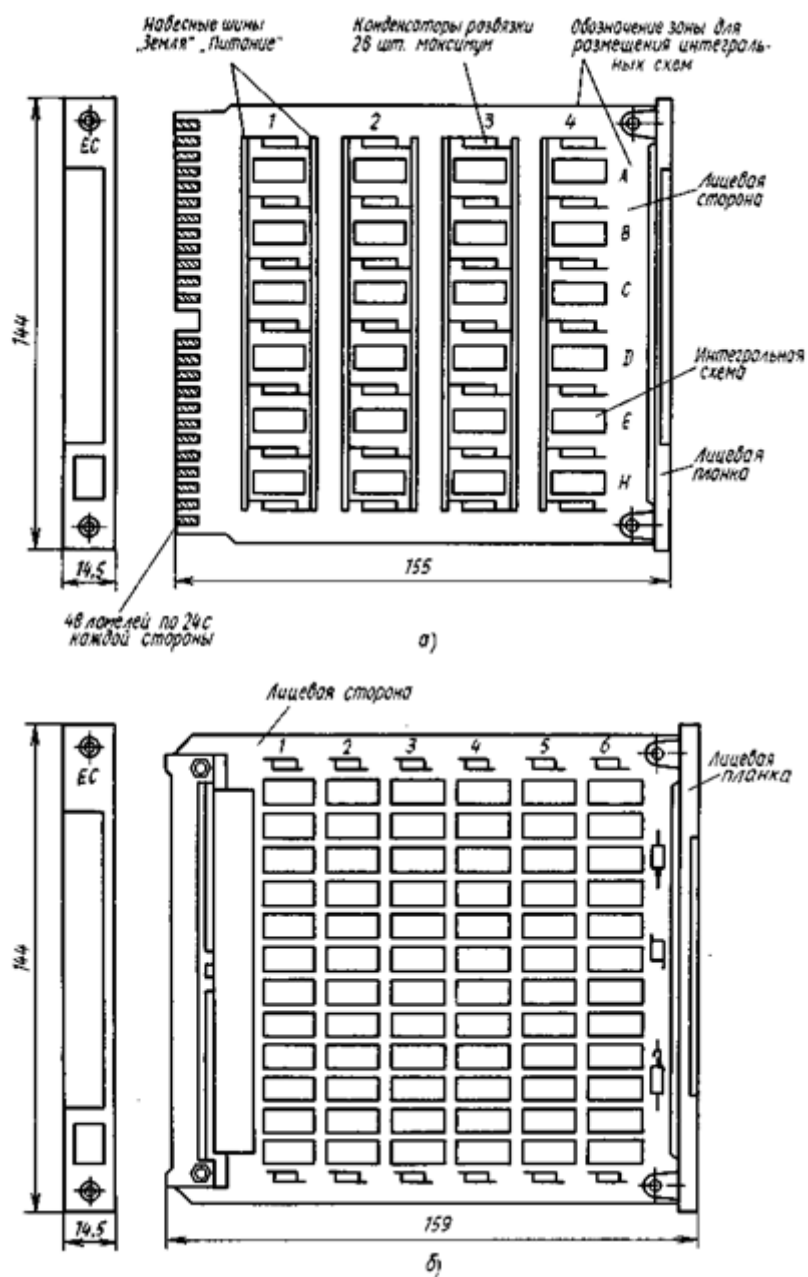


Рис. 1.1.9. Логические типовые элементы замены ЕС ЭВМ на основе двусторонней (а) и многослойной (б) печатной платы

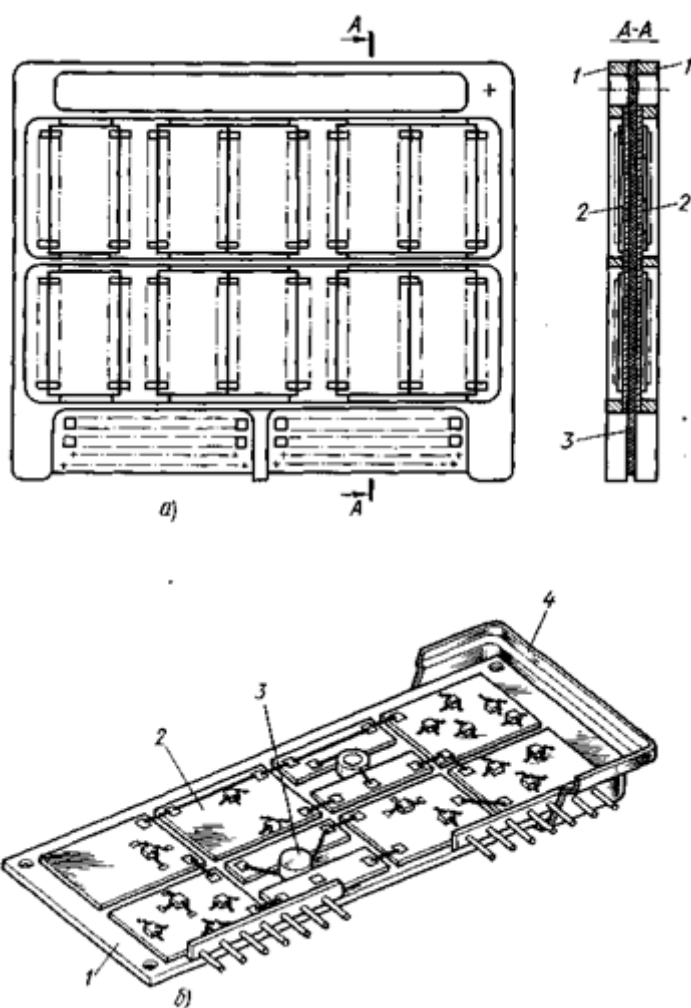


Рис. 1.1.10. Конструкция узлов РЭС четвертого поколения

а – ячейка бортовой ЭВМ на бескорпусных компонентах: 1-рамка, 2-микросборки, 3-печатная плата; б – приемник: 1-плата, 2-микросборка, 3-дискретный ЭРЭ, 4-корпус со снятой герметизирующей крышкой

## 1.2. Ограничения при проектировании

**Структура и взаимосвязь ограничений.** Ограничениями являются факторы, не изменяемые конструктором: ресурсные, системотехнические, схемотехнические, конструкторские, технологические, эксплуатационные.

*К ресурсным относятся материальные, временные, кадровые и энергетические ограничения.*

*Системотехническими ограничениями являются такие, как тип РЭС: аналоговые или цифровые, наземные или бортовые, с информационным или структурным резервированием или без него, работающие в режиме разового, многократного, непрерывного, периодического использования и т. д.*

*Схемотехническими ограничениями, задаваемыми электрической схемой, являются элементная база (быстродействие, токи, помехоустойчивость, тер-*

мочувствительность, стабильность параметров и т. д.), число и типы функциональных узлов, требования к их взаимному расположению и т. д.

*Конструкторские ограничения:* масса и габариты; рекомендуемые типы базовых несущих конструкций, методы реализации электрических связей; ограничительные перечни на материалы, полуфабрикаты, комплектующие изделия; требования к внешнему виду; патентоспособность и т. д.

*Технологические ограничения:* требование преемственности конструкций, тип производства, вид технологических процессов, время запуска в производство, повторяемость выпуска, номенклатура освоенных технологических процессов и их стабильность, требования по автоматизации и т. д.

*Эксплуатационные ограничения:* объект установки, уровень дестабилизирующих факторов — механических, климатических, тепловых, радиационных, электромагнитных воздействий; технологический уровень ремонтной базы, квалификация обслуживающего персонала, требования по ремонтнопригодности конструкции, время хранения, время эксплуатации (ресурс) и т. д.

Система показателей качества  $Z$  определяет пригодность конструкции для использования ее по тому или иному назначению, что регламентируется техническим заданием на разработку конструкции. Каждый показатель зависит от характера конструкции и ограничений:  $Z = \varphi(F, X_i, Y_j)$ .

**Виды технологичности: производственная и эксплуатационная.** Для оценки мер по повышению технологичности вновь разрабатываемой конструкции РЭС проводится технико-экономический анализ, в результате которого устанавливается технико-экономический эффект, обусловленный внедрением новой техники и технологии с учетом дополнительных затрат на проектирование и подготовку производства. Технико-экономический эффект проявляется в виде экономии затрат и удовлетворения каких-либо потребностей людей (видеозапись, получение прогноза погоды. помощью спутников, улучшение качества продукции, повышение безопасности, решение научных задач и т. д.). Основной предпосылкой повышения экономического эффекта как при изготовлении, так и при эксплуатации является повышение технологичности конструкции.

Различают производственную, эксплуатационную и ремонтную технологичность конструкции. Производственная технологичность определяет объем работ по технологической подготовке производства, сложность изготовления, удобство монтажа вне предприятия-изготовителя; эксплуатационная технологичность определяет объем работ при подготовке изделия к использованию по назначению, техническому ремонту и утилизации (возвращению в производство отходов); ремонтная технологичность характеризует свойства изделия при всех видах ремонта, кроме текущего.

**Требования микроминиатюризации.** Микроминиатюризация – постоянно действующая тенденция в развитии РЭС.

Расширение областей использования и усложнение РЭС ведут к увеличению числа входящих в них элементов и компонентов, что повышает стоимость, габариты, массу, энергопотребление и снижает надежность РЭС. Вначале для улучшения этих параметров осуществляли миниатюризацию элементов (например, применяли электровакуумные лампы типа «дробь», «желудь», «пальчиковой» серии). Развитие интегральной гибридной и полупроводниковой технологии позволило резко уменьшить размеры элементов и перейти к микроминиатюризации.

Для дальнейшего улучшения параметров РЭС используют различные системотехнические, схемотехнические, конструкторские и технологические решения, в совокупности называемые комплексной микроминиатюризацией. Это увеличение степени интеграции ИС и модулей, разработка методов структурного резервирования, сложение мощностей маломощных источников излучения СВЧ, отвод тепла с помощью «тепловых труб», защита от механических воздействий с помощью вязкоупругих компаундов, защита от влаги бескорпусных элементов в составе блока общей оболочкой, использование микромощных элементов на основе КМДП-структур и транзисторных пар, изготовленных в едином технологическом цикле, замена электромеханических узлов электронными и т. д. Актуальность комплексной микроминиатюризации не снижается, так как отношение объема, занимаемого элементами в интегральном исполнении, к объему РЭС составляет 1:10 и менее.

**Техническое задание (ТЗ) как форма постановки задачи оптимизации конструкции РЭС.** Техническое задание (ТЗ) составляется исполнителем на основании технических требований заказчика. На основе общего ТЗ могут быть составлены частные ТЗ для субподрядчиков. Объем экономических и производственных требований в этих ТЗ меньше, а технические требования более подробные, чем в основном ТЗ.

Требования, которым должна отвечать конструкция РЭС, определяются ее назначением, областью применения, условиями эксплуатации, типом производства и представляются ТЗ, которое является основным исходным документом для разработки изделия в соответствии с ГОСТ 15.001 и ГОСТ 15.005. Объем исходных данных зависит от назначения и сложности проектируемого изделия.

Если проектировщику предлагается задание, проработанное до мелочей, то им пользоваться легко – как неким «сводом предписаний». Однако в ряде случаев задания выдаются краткие и общие. В частности, для проведения разработки конструкции РЭС в рамках курсового и дипломного проектирования студенту выдается типовый бланк ТЗ, который заполняется в соответствии с конкретным заданием. Однако, информации, приведенной в типовом бланке, недостаточно для анализа, либо она записана в сокращенном виде.

Поэтому первым этапом работы над проектом является формирование уточненного и расширенного технического задания.

**Структура и состав ТЗ.** Согласно ГОСТ 2.103 составление технического задания является первой стадией разработки РЭС, а само ТЗ – основным документом для принятия решения на последующих этапах проектирования.

Техническое задание может быть составлено как на все изделие, так и на его составные части и содержит необходимые ограничения, связанные с условиями эксплуатации (климатические, механические, биологические воздействия), объект установки (стационарная, возимая, носимая и т.д.), обслуживания (эргономические и другие факторы), производства РЭС (серийность выпуска, показатели технологичности), принципами функционирования (требования безопасности), а также сроки проектирования.

ТЗ оформляется в соответствии с ГОСТ 15.001 и ГОСТ 2.105 на листах формата А4 и его разделы нумеруются арабскими цифрами.

*Рекомендуемый порядок построения и изложения технического задания в соответствии с ГОСТ 15.005 следующий:*

1. Общие сведения о разработке.
2. Сведения о мировом уровне данного вида продукции.
3. Технические требования.
4. Экономические требования.
5. Требования к разработке.
6. Требования к изготовлению.
7. Требования к монтажу.
8. Требования к техническому обслуживанию и ремонту.

В экономических требованиях указываются контингент потребителей разрабатываемого изделия, его новизна и конкурентоспособность.

В разделе требования к разработке указываются график выполнения работ и перечень конструкторской документации, подлежащей разработке, а также соответствие КД требованиям, изложенным в ЕСКД и других стандартах.

Раздел ТЗ требования к изготовлению заполняется, когда известно конкретное предприятие – изготовитель, технологическое оборудование которого может наложить ограничения на выбор конструктивно – технологических решений при проектировании изделия и его составных частей.

В разделе требования к монтажу указываются ограничения к монтажу изделия, обусловленные объектом установки и квалификацией персонала, выполняющего монтаж изделия.

В требованиях к техническому обслуживанию и ремонту должна содержаться информация о субъективных условиях эксплуатации: квалификация обслуживающего персонала, вид ремонтных мастерских и т.п.

Классификация РЭС по климату и категории исполнения (ГОСТ 15150).



Таблица 1.2.1

## Обозначения климатических исполнений изделий РЭС

Климатические исполнения изделий	Обозначения		
	буквенные		цифровые
	русские	латинские	
Изделия, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озерах			
Для макроклиматического района с умеренным климатом	У	(N)	0
Для макроклиматического района с умеренным и холодным климатом	УХЛ	(NF)	1
Для макроклиматического района с влажным тропическим климатом	ТВ	(TH)	2
Для макроклиматического района с сухим тропическим климатом	ТС	(TA)	3
Для макроклиматического района как с сухим, так и с влажным тропическим климатом	Т	(T)	4
Для всех макроклиматических районов, кроме макроклиматического района с очень холодным климатом	О	(U)	5
Изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с морским климатом			
Для макроклиматического района с умеренно-холодным морским климатом	М	(M)	6
Для макроклиматического района с тропическим морским климатом, в том числе для судов каботажного плавания или иных, предназначенных для плавания только в этом районе	ТМ	(TM)	7
Для макроклиматических районов как с умеренно-холодным так и с тропическим морским климатом, в том числе для судов неограниченного плавания	ОМ	(MU)	8

Изделия, предназначенные для эксплуатации во всех микроклиматических районах на суше и на море, кроме макроклиматического района с очень холодным климатом	В	(W)	9
--	---	-----	---

Таблица 1.2.2.

## Характеристика категорий исполнения РЭС

Укрупненная категория	Обозначение	Дополнительная категория	Обозначение
Для эксплуатации на открытом воздухе (воздействие совокупности климатических факторов, характерных для данного климатического района)	1	Для работы и эксплуатационного хранения в помещениях категории 4 и для кратковременной работы в других условиях	1.1
Для эксплуатации под навесом или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе и имеется доступ наружного доступа, а также изделия категории 1	2	Для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категорий 1; 1,1; 2, конструкция которых исключает возможность конденсации влаги на встроенных элементах	2.1
Для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий	3	Для эксплуатации в нерегулярно отапливаемых помещениях	3.1
Для эксплуатации в закрытых помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями	4	Для эксплуатации в помещениях с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом. Для эксплуатации в лабораторных, капитальных жилых и других подобного типа помещениях	4.1

Для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью	5	Для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категории 5, при условии отсутствия на них конденсации влаги	5.1
---	---	--	-----

**Климатические факторы.** Нормальными климатическими условиями являются: температура  $+25\pm 10$  °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, большая 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 большую 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 сер-

нистый газ и хлориды. Благоприятное сочетание температуры и влажности способствует существованию более 10000 видов плесневых грибов.

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<sup>2</sup>), 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. 14 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.

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.

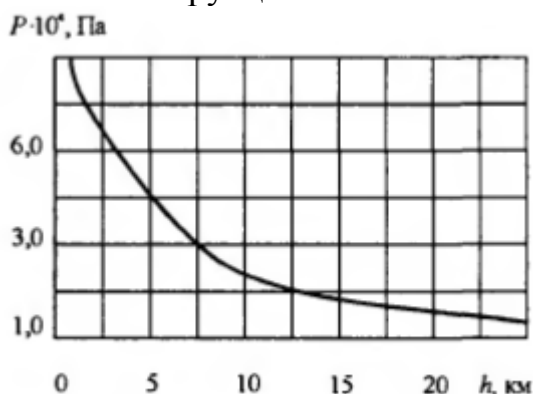


Рис. 1.2.1. График зависимости давления воздуха от высоты над уровнем моря

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<sup>3</sup>.

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<sup>3</sup>), атмосфера промышленного района (сернистый газ 0,02...2 мг/м<sup>3</sup>, хлористые соли не более 0,3 мг/м<sup>3</sup>), морская атмосфера (хлористые соли 2... 2000 мг/м<sup>3</sup>).

Солнечное облучение также активно воздействует на работоспособность ЭА. Спектр излучаемой солнцем энергии состоит из трех составляющих: ультрафиолетовая часть (длина волны менее 390-10<sup>-10</sup> м), видимая часть (длина волны 390-10<sup>-10</sup>...760-10<sup>-10</sup> м), инфракрасная часть (длина волны более 760-10<sup>-10</sup> 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<sup>2</sup>, при этом 42 Вт/м<sup>2</sup> приходится на ультрафиолетовую часть спектра.

Грибковые образования (плесень) относят к низшим растениям, не имеющим фотосинтеза. В процессе своей жизнедеятельности они выделяют ли-

монную, 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 явля-



ются 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. 1.2.3, в которой приведена динамика роста требований нормативно-технических документов по механическим нагрузкам.

Таблица 1.2.3.

## 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	400
Линейное ускорение, g	25	75	150	500
Одиночные удары, g	75	150	500	1000
Множественные удары, g	40	75	150	150
Акустические шумы, дБ	-	-	-	165

**Условия эксплуатации ЭВС.** Общие требования к средствам вычислительной техники (СВТ), стационарным, применяемым в автоматизированных системах управления различного назначения всех уровней, в системах обработки данных, сетях ЭВМ, на вычислительных центрах автономно, а также встраиваемым в машины, оборудование и приборы, устанавливает ГОСТ 21552.

СВТ предназначены для сбора, подготовки, ввода, накопления, обработки, вывода, отображения, приема и передачи информации.

В зависимости от устойчивости к воздействию внешних климатических факторов в процессе эксплуатации СВТ подразделяют на пять групп. *Нормальными климатическими условиями эксплуатации СВТ 1-3-й групп должны быть:*

- температура окружающего воздуха -  $20 \pm 5$  °С;
- относительная влажность -  $60 \pm 15$  %;
- атмосферное давление - от 84 до 107 кПа (от 630 до 800 мм рт. ст.).

Температура воздуха внутри СВТ 1-3-й групп не должна более чем на 20°С превышать температуру окружающего воздуха или воздуха, подаваемого для охлаждения СВТ, при этом температура внутри СВТ 1 и 2-й групп не должна быть выше 60°С.

Для СВТ, встраиваемых в другое оборудование и в другие СВТ, а также в машины и приборы, содержащие источники тепла, верхнее значение температуры окружающего воздуха следует устанавливать с учетом перегрева. Значения температуры перегрева следует выбирать из ряда: 5, 10, 15, 20°С.

*На конкретные СВТ должны быть установлены следующие показатели надежности:*

- средняя наработка на отказ, ч;
- средняя наработка на сбой, ч;
- среднее время восстановления работоспособного состояния, ч;
- коэффициент технического использования - не менее 0,95;

- средний срок службы - не менее 10 лет с учетом проведения восстановительных работ;
- средний срок сохраняемости (до ввода в эксплуатацию) - не менее 9 мес;
- коэффициент готовности - не менее 0,98.

Время готовности аналоговых и аналого-цифровых вычислительных машин высокой точности к решению контрольных задач не должно превышать 30 мин, а к проверке точности выполнения операции интегрирования - 60 мин.

*СВТ должны быть построены по модульному и (или) блочно-агрегатному принципу, обеспечивающему:*

- взаимозаменяемость сменных одноименных составных частей;
- ремонтпригодность;
- возможность построения и расширения, совершенствования и изменения технико-эксплуатационных характеристик комплексов технических средств.

Конструктивное исполнение СВТ должно обеспечивать:

- удобство эксплуатации;
- исключение возможности (при необходимости) несанкционированного доступа;
- возможность ремонта;
- доступ ко всем элементам, узлам и блокам, требующим регулирования или замены в процессе эксплуатации.

Основные размеры базовых конструкций электронных цифровых вычислительных машин общего назначения и электронных цифровых вычислительных комплексов - по ГОСТ 25122, ГОСТ 26.202 и ГОСТ 20504.

Масса отдельных сменных блоков СВТ должны быть не более 30 кг.

Ручки основных органов управления следует размещать на передних панелях СВТ, органы настройки - внутри, обеспечив легкий доступ к ним и удобство работы.

Органы электрического управления должны иметь следующие положения и направления движения:

- нажатая кнопка или положение ручки вверх или вправо - рабочее положение;
- отпущенная кнопка или положение ручки вниз или влево - нерабочее положение;
- поворот ручки по часовой стрелке - увеличение, а против часовой стрелки - уменьшение значения регулируемого параметра.

Направление вращения и другое перемещение ручек должны совпадать с движением индикаторов, наблюдаемых оператором. Возрастающие цифр или переход к последующим буквам алфавита соответствует увеличению значения регулируемого параметра. На органах ручного управления должны быть нанесены надписи или обозначения, указывающие их назначение. Классификация, состав, обозначения и наименования алфавитно-цифровых наборов символов,

специальные знаки, а также функциональные характеристики управляющих символов, применяемых в СВТ, - по ГОСТ 19767.

*Уровень промышленных радиопомех, создаваемых при работе СВТ, не должен превышать значений, установленных:*

- в ГОСТ 23511 — для СВТ, эксплуатируемых в жилых домах и учреждениях (предприятиях), электрические сети которых подключены к сетям жилых домов;

- в «Общесоюзных нормах допускаемых промышленных радиопомех (Нормы 8-72)» - для СВТ, эксплуатируемых только вне жилых домов и не связанных с их электрическими сетями;

- в «Общесоюзных нормах допускаемых промышленных радиопомех (Нормы 15-78)» - для СВТ, устанавливаемых совместно со служебными радиоприемными устройствами.

Требования к промышленным радиопомехам не распространяются на СВТ, встраиваемые в другие СВТ, а также на составные части СВТ, не подключаемые к бытовым и промышленным электрическим сетям напряжением 220 или 380 / 220 В.

Электрическое сопротивление изоляции СВТ между разобращенными токоведущими цепями, а также между токоведущими цепями и корпусом в зависимости от климатических условий эксплуатации должно быть не менее значений, указанных в табл. 1.2.4.

Таблица 1.2.4.

Нормы сопротивления изоляции для СВТ

Климатические условия эксплуатации	Сопротивление изоляции, МОм, не менее, при рабочих напряжениях (амплитудное значение),			
	до 0,1	св. 0,1 до 0,5	св. 0,5 до 10,0	
Нормальные	5,0	20,0	100,0	
При наибольшем значении рабочей температуры	1,0	5,0	20,0	
При наибольшем значении относительной влажности	0,2	1,0	2,0	

Меры защиты от поражения электрическим током должны соответствовать требованиям ГОСТ 25861 и ГОСТ 12.1019. Защитное заземление изделий должно быть выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.007.0 и ГОСТ 25861.

*На СВТ должна быть нанесена потребительская маркировка, содержащая:*

- наименование или товарный знак предприятия-изготовителя;
- шифр или условное наименование СВТ;

- порядковый номер СВТ по системе нумерации предприятия-изготовителя;

- дату изготовителя (год и месяц).

Маркировку наносят на табличку, прикрепленную к корпусу СВТ и изготовленную в соответствии с требованиями ГОСТ 12969 и ГОСТ 12971.

СВТ в упакованном виде должны сохранять внешний вид и работоспособность после воздействия ударных нагрузок многократного действия с пиковым ударным ускорением не более  $147 \text{ м/с}^2$  при длительности действия ударного ускорения 10-15 м • с.

**Условия эксплуатации бытовой РЭС.** Названия видов и систему их обозначения для аппаратуры радиоэлектронной бытовой устанавливает ГОСТ 26794. При выборе наименования конкретного изделия следует учитывать, что существуют и недопустимые термины. Например, для активной акустической системы нельзя использовать термин ЗВУКОВАЯ КОЛОНКА.

Номенклатуру входных и выходных параметров бытовой РЭС определяет ГОСТ 24838. Их численные значения, включаемые в показатели назначения изделия, определяют группу сложности.

Требования к электрическим соединителям штепсельным для аппаратов бытового и аналогичного назначения приведены в ГОСТ Р 51322.1 (общие требования и методы испытаний), ГОСТ 7396.1 (основные размеры) и ГОСТ 7396.2 (частные требования к вилкам с предохранителями).

Требования по безопасности бытовой аппаратуры оговаривают следующие стандарты: ГОСТ 12.2.006 (требования безопасности и методы испытаний бытовой РЭА); ГОСТ Р МЭК 335-1 и ГОСТ 27570.0 (общие требования к безопасности бытовых и аналогичных электрических приборов).

Условия эксплуатации для бытовой РЭС определены ГОСТ 11478.

Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение радиоэлектронной бытовой аппаратуры должны проводиться в соответствии с требованиями ГОСТ 28594. При этом вид и размеры маркировки условных функциональных обозначений должны соответствовать приведенным в ГОСТ 25874.

Каждое изделие бытовой РЭС должно быть упаковано в индивидуальную (потребительскую) тару по ГОСТ 12301.

Бытовая РЭС должна транспортироваться всеми видами транспорта в условиях группы 5 по ГОСТ 15150 с использованием транспортных средств — крытые вагоны, закрытые автомашины, универсальные контейнеры, в самолетах с отапливаемыми герметическими отсеками. Допускается транспортировать ПТ другими транспортными средствами в транспортной таре при защите их от прямого воздействия атмосферных осадков и механических повреждений.

Бытовую РЭС хранят в упаковке, в отапливаемых и вентилируемых складах в условиях хранения группы 1 по ГОСТ 15150.

### 1.3. Стандартизация в проектировании РЭС

**Основные понятия, цели и задачи стандартизации при проектировании РЭС. Стандартизация как метод повышения эффективности разработок. Виды и уровни стандартов. Системы стандартов.** Стандартизация является важным звеном в системе управления техническим уровнем и качеством продукции, в том числе РЭС. Особое значение стандартизация приобретает в условиях перевода народного хозяйства на интенсивные методы, ускорения темпов научно-технического прогресса, сокращения сроков морального износа конструкций (РЭС гражданского назначения—до 6...8 лет; технологического оборудования—до 4...5 лет; изделий специального назначения — до 2...3 лет), что требует сокращения сроков проектирования и внедрения при одновременном улучшении качества конструкций.

По определению Международной организации по стандартизации, **стандартизация** — это процесс установления и применения правил с целью упорядочения деятельности в данной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности для достижения всеобщей оптимальной экономии, с соблюдением функциональных условий и требований безопасности. Она основывается на результатах развития науки, техники, практического опыта, определяет основу не только настоящего, но и будущего развития и должна быть неразрывна с прогрессом. Это определение отражает все многообразие функций стандартизации, характеризует ее как деятельность, направленную на упорядочение, а не только на соблюдение каких-то правил и условностей.

*Задачи стандартизации:* превращение стандартов в средство внедрения новой техники; улучшение качества сырья, материалов и готовых изделий; применение стандартизации для управления техническим уровнем продукции и ее качеством; создание крупных межотраслевых систем стандартов, обеспечивающих оптимальные условия для проведения сложных работ в различных отраслях народного хозяйства.

*Формы стандартизации:* комплексная, опережающая и стандартизация межотраслевых систем. По определению Постоянной комиссии СЭВ по стандартизации, при комплексной стандартизации осуществляется целенаправленное и планомерное установление и применение системы взаимоувязанных требований как к объекту стандартизации в целом, так и к его основным элементам в целях обеспечения оптимального решения конкретной проблемы. При этом стандартизации подлежит не только сам объект производства (его конструкция), но и материалы, полуфабрикаты, оснастка, оборудование, технологические процессы.

Опережающий характер стандартизации достигается разработкой стандартов на изделия, которые не начали проектироваться, внедряться, изготавливаться серийно. Особое внимание при этом обращается на организацию внедрения опережающего стандарта, для чего одновременно с его разработкой го-

товят директивный документ о внедрении, план организационно-технических мероприятий, перечень предприятий, на которых будет внедрен стандарт.

Стандарт считается внедренным на предприятии, если установленные им нормы, требования и правила отражены в действующей технической документации, полностью выполняются в производстве и выпускаемая продукция полностью им соответствует. Направление стандартизации при переходе от опытного образца к серийному смещается от стандартизации объекта производства к стандартизации оборудования, технологической оснастки, технологических процессов.

**Межотраслевая стандартизация.** Ярким примером этого является осуществление принципа стандартизации в самой стандартизации: создана Государственная система стандартизации, представляющая комплекс взаимосвязанных стандартов. Кроме того, существует ряд крупных межотраслевых систем: Единая система конструкторской документации (ЕСКД); Единая система технологической документации (ЕСТД); Система разработки и постановки продукции на производство (СППП); Система стандартов в области автоматизированного проектирования и др.

*В настоящее время существует большое число стандартов, вид которых зависит от нескольких групп факторов:*

способа реализации стандарта — документа, содержащего нормы (требования), подлежащие выполнению, основной единицы или физической константы (ампер, абсолютный нуль температуры), предмета для физического сравнения (метр);

категории стандарта по масштабу охвата народного хозяйства: государственный стандарт, отраслевой стандарт, стандарт предприятия, республиканский стандарт, международный стандарт (СТ СЭВ);

вида стандарта по назначению для конкретного изделия — технические условия, параметры (размеры, напряжения и т. д.), марки материалов, сортамент, методы испытаний, правила приемки, типовой технологический процесс и т. д.;

вида стандарта по методическим признакам — организационно-методический, общетехнический (ЕСКД), проектно-конструкторской, производственно-технический.

При конструировании используют стандарты в виде документа, содержащего нормы (требования), подлежащие выполнению. Рассмотрим стандарты по масштабу охвата народного хозяйства. Государственные стандарты (ГОСТ) устанавливаются преимущественно на продукцию массового или серийного производства, имеющую межотраслевое применение. В частности, ГОСТ определяют терминологию, требования по устойчивости РЭС к механическим, климатическим, радиационным воздействиям, параметры некоторых конструктивных систем РЭС.

Отраслевые стандарты (ОСТ) устанавливаются на те виды продукции, которые не являются объектами государственной стандартизации, — на нор-

мы, правила, требования, понятия и обозначения, регламентация которых необходима для обеспечения оптимального качества продукции данной отрасли, а также для упорядочения производства, обеспечения координации производственно-технической деятельности предприятий отрасли. Отраслевые стандарты могут также устанавливать ограничения (по номенклатуре, типоразмерам, нормам, требованиям и т. д.) или развивать государственные стандарты применительно к особенностям отрасли, если это не нарушает параметрических (например, размерных) рядов, не снижает качественных и эксплуатационных показателей, установленных государственными стандартами. Объектами отраслевой стандартизации, в частности, могут быть: отдельные виды продукции ограниченного применения, технологическая оснастка, предназначенная для производства и применения в данной области, сырье, материалы, полуфабрикаты внутриотраслевого применения, отдельные виды товаров народного потребления. Отраслевыми стандартами определяются размеры многих конструкционных систем РЭС и элементов.

Республиканские стандарты (РСТ) устанавливаются по закрепленным группам продукции, изготавливаемой предприятиями министерств и ведомств союзных республик. Республиканские стандарты устанавливаются также на товары народного потребления. Как правило, при конструировании РЭС специального назначения РСТ не используются.

Стандарты предприятий (СТП) устанавливаются на нормы, правила, требования, методы и другие объекты, имеющие применение только на данном предприятии. Объектами стандартизации на предприятии могут быть детали, узлы и агрегаты изготавливаемых (разрабатываемых) изделий, нормы для разработки продукции предприятия и методы расчета, нормы в области организации и управления производством предприятия, технологические нормы и требования, типовые технологические процессы, оснастка, инструмент и т. д. Стандарты предприятия могут носить характер ограничений или развития (по номенклатуре, типоразмерам, применяемым материалам и т. п.) государственных, отраслевых, республиканских стандартов применительно к особенностям данного предприятия при условии, что это не ухудшает показателей, установленных государственными, отраслевыми или республиканскими стандартами.

Особое место в системе стандартизации занимает совместная работа, проводимая странами — членами СЭВ для дальнейшего повышения эффективности производства, удовлетворения потребностей людей, производства товаров с показателями качества выше мирового уровня. Это достигается путем сокращения сроков разработки и внедрения отечественных стандартов (уменьшения объема работ по разработке новых стандартов благодаря использованию опыта социалистических стран) и обеспечения специалистов информацией о передовом зарубежном опыте. К объектам международной стандартизации в области РЭС относятся термины и определения, требования к материалам, элементам (соединителям, ИС и т. д.), аппаратуре для радио-



вещания, телевидения, записи и воспроизведения информации, средствам измерения и автоматизации, ЭВМ и т. д.

Особая роль отводится стандартизации с внедрением автоматизированных систем управления (АСУ, АСУ ТП) и необходимостью выпуска продукции на уровне лучших мировых образцов. Для успешного выполнения этих задач требуется дальнейшее совершенствование самой стандартизации. Так, система присвоения десятичных номеров конструкторским документам недостаточно удобна, так как составлена по геометрическим признакам изделий, без учета их функционального назначения. Поэтому платы бытовых РЭС и РЭС специального назначения имеют одинаковый десятичный номер, хотя технологическая характеристика их разная. Это затрудняет управление производством с использованием АСУ.

В настоящее время число ГОСТов достигает 20 000, ОСТов и СТП—еще больше, что затрудняет поиск информации при разработке конструкции и контроль на соответствие требованиям стандартов. Технический уровень и качество продукции на внутреннем и мировом рынке постоянно повышаются. Поэтому стандарты не являются чем-то неизменным. Устаревшие стандарты аннулируются, вместо них вводятся новые. Все изменения отражаются в специальных периодических изданиях Госстандарта СССР, к которым в первую очередь относятся Указатель государственных стандартов СССР (ежегодник), Указатель отраслевых и республиканских стандартов (ежегодник), Информационный указатель ГОСТ СССР (ежемесячник), Информационный указатель отраслевых и республиканских стандартов (выходит раз в два месяца), Информационный указатель технических условий (ежемесячник). В указателях содержатся номера и названия стандартов, действующих в текущем году. Все изменения отражаются в информационных указателях.

**Основные используемые пакеты и системы автоматизированного проектирования (САПР) – Компас, Protel, ТРИАНА и др.** Современный этап развития РЭС предъявляет жесткие требования к надежности и качеству создаваемой аппаратуры, а именно к показателям безотказности, технологичности, срокам проектирования, к массогабаритным и экономическим показателям и т.д. Обеспечение указанных требований приводит к необходимости постоянно совершенствовать технологию проектирования РЭС. Большую роль в этом играют новые подходы к обеспечению надежности и качества РЭС, основанные на внедрении средств автоматизации во все стадии жизненного цикла РЭС. При внедрении средств автоматизации особое внимание уделяют начальным стадиям жизненного цикла РЭС (эскизный, технический и рабочий проекты), так как именно на них закладываются основные показатели надежности и качества создаваемого РЭС. Кроме этого, качество проектных процедур, выполненных на начальных стадиях, во многом определяет число доработок проекта на последующих стадиях жизненного цикла РЭС, что напрямую связано с экономическими и временными затратами проекти-

руемого устройства. Организация проектных процедур с позиции системного анализа технических систем позволяет значительно повысить качество проектных решений, полученных средствами САПР.

Система *Protel DXP* представляет собой полностью 32-разрядное приложение, предназначенное для работы под управлением операционных систем *Windows NT/XP* и предоставляющее разработчикам печатных плат все необходимые инструменты. Основу системы составляет программная оболочка *Design Explorer*, которая интегрирует в себе различные модули, выполняющие определенные функции проектирования, например, редактор принципиальных схем, редактор печатных плат, автотрассировщик, программа моделирования, интерфейсы импорта и экспорта. Наличие полнофункциональной демоверсии дает возможность по достоинству оценить все возможности пакета. В данном учебнике представлены основные приемы проектирования и моделирования схем, передачи информации в редактор печатных плат, размещения компонентов, трассировки проводников и генерации файлов для производства.

Комплекс ТРиАНА предназначен для моделирования на ПЭВМ стационарных и нестационарных тепловых процессов, протекающих в конструкциях РЭС, таких как стоечные конструкции, блоки с регулярной и нерегулярной структурами, печатные узлы (ПУ), функциональные ячейки (ФЯ), микросборки (МСБ). Комплекс рассчитан на инженеров-конструкторов промышленных предприятий, НИИ, КБ, занимающихся разработкой радиоэлектронной аппаратуры. Комплекс является составной частью автоматизированной системы обеспечения надежности и качества аппаратуры. Целью моделирования, проводимого при помощи комплекса ТРиАНА, является получение тепловых полей конструкций РЭС 3-го и 4-го уровней конструктивной иерархии (температур конструктивных узлов, элементов и потоков хладоносителя в сети каналов конструкции стойки или крэйта), тепловых полей конструктивных узлов 2-го уровня конструктивной иерархии (тепловых полей оснований функциональных ячеек, печатных плат, подложек, температур активных зон и корпусов электрорадиоэлементов).

*В целом комплекс позволяет решать следующие задачи:*

- определение тепловых режимов работы всего множества радиокомпонентов и несущих конструкций с учетом конструктивно-технологических и эксплуатационных особенностей РЭС различного назначения (авиационной, космической, морской; автомобильной и др. РЭС) и внесение изменений в конструкцию с целью обеспечения необходимого (с точки зрения электрических характеристик или показателей надежности и т.п.) теплового режима работы РЭС;

- выбор лучшего варианта конструкции РЭС из нескольких имеющихся, точки зрения тепловых характеристик;

- обоснование в необходимости дополнительной защиты РЭС от температурных воздействий;

- создание эффективной программы испытаний аппаратуры на тепловые воздействия (выбор параметров испытательных воздействий, наиболее удобное расположение мест установки регистрирующих датчиков и т.п.).

**Единая система конструкторской документации (ЕСКД).** Единая система конструкторской документации (ЕСКД) - комплекс государственных стандартов, устанавливающих взаимосвязанные правила и положения по порядку разработки, оформления и обращения конструкторской документации, разрабатываемой и применяемой организациями и предприятиями РФ.

ГОСТ 2.001-70 «ЕСКД. Общие положения» - один из основополагающих стандартов данной системы - устанавливает общие положения по назначению, области применения, классификации и обозначению стандартов комплекса ЕСКД.

*Основное назначение стандартов ЕСКД заключается в установлении в организациях и на предприятиях единых правил выполнения, оформления и обращения конструкторской документации, обеспечивающих:*

- возможность взаимообмена конструкторскими документами между организациями и предприятиями без их переоформления;
- стабилизацию комплектности, исключающую дублирование и разработку не требуемых производству документов;
- возможность расширения унификации при конструкторской разработке проектов промышленных изделий;
- упрощение форм конструкторских документов и графических изображений, снижающих трудоемкость проектно-конструкторских разработок промышленных изделий;
- механизацию и автоматизацию обработки технических документов, и содержащейся в них информации;
- улучшение условий технической подготовки производства, а также эксплуатации промышленных изделий;
- оперативную подготовку документации для быстрой переналадки действующего производства.

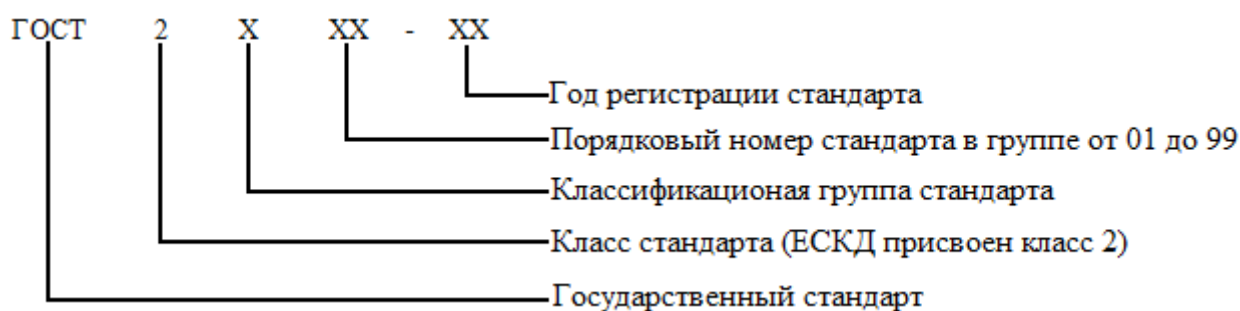
*Установленные стандартами ЕСКД правила и положения по разработке, оформлению и обращению документации распространяются на:*

- все виды конструкторских документов (чертежи, схемы, технические условия и др.), установленные ГОСТ 2.102-68 «ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов»;
- учетно-регистрационную документацию (например, карточка учета документов, инвентарная книга регистрации документов) и документацию по внесению изменений в конструкторские документы (извещение об изменении).

Стандарты ЕСКД должны служить основанием для разработки организационно-методической и инструктивно-производственной документации: например, положений, устанавливающих структуру и функции технических

подразделений предприятий (служб нормконтроля, отделов технической документации); положения о порядке прохождения и согласования конструкторской документации в отрасли или на предприятии; инструкции по хранению технической документации.

**Виды изделий и конструкторских документов.** Обозначение стандартов ЕСКД строится по классификационному принципу. В общем виде обозначение любого стандарта ЕСКД следующее:



Например, государственный стандарт «Виды изделий» имеет обозначение: ГОСТ 2.101-68.

ГОСТ 2.101—68 устанавливает виды изделий при выполнении конструкторской документации и их структуру, ГОСТ 2.102-68 - виды и комплектность конструкторских документов на изделия.

Изделием называется любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии (например, гайка, валик, печатная плата, отрезок кабеля заданной длины, самолет). В зависимости от назначения их делят на изделия основного производства и изделия вспомогательного производства. Изделия основного производства предназначены для поставки предприятием-изготовителем заказчику, а вспомогательного - для собственных нужд предприятия, которое их изготавливает.

Изделия, предназначенные для реализации и одновременно используемые для собственных нужд предприятием, которое их изготавливает, относятся к изделиям основного производства.

Согласно ГОСТ 2.101 68 различают четыре вида изделий рис. 1.3.1.



Рис. 1.3.1. Виды изделий

И в зависимости от наличия или отсутствия в них составных частей изделия делят на неспецифицированные (детали) - не имеющие составных частей, и специфицированные (сборочные единицы, комплексы, комплекты) — состоящие из двух и более составных частей.

**Деталь** - изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций, например: литой корпус, катушка из провода (без каркаса), пластина из биметаллического листа, отрезок кабеля заданной длины и др. Деталь может иметь защитное или декоративное покрытие (винт, подвергнутый хромированию).

**Сборочная единица** — изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями (свинчиванием, с паркой, пайкой, клепкой, опрессовкой, развальцовкой, склеиванием, сшивкой, укладкой и т. п.), например: сварной корпус, редуктор, телефонный аппарат, микромодуль, автомобиль, станок, катушка индуктивности.

*К сборочным единицам также относят:*

а) изделия, для которых конструкцией предусмотрена разборка их на составные части предприятием-изготовителем, например, для удобства упаковки и транспортирования;

б) совокупность сборочных единиц и (или) деталей, имеющих общее функциональное назначение и совместно устанавливаемых на предприятии-изготовителе в другой сборочной единице, например: электрооборудование станка, автомобиля, самолета;

в) совокупность сборочных единиц и (или) деталей, имеющих общее функциональное назначение, совместно уложенных на предприятии-изготовителе в укладочные средства (футляр, коробку и т. п.), например: готовальня, комплект концевых плоскопараллельных мер длины.

**Комплекс** - два и более специфицированных изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций, например: за-

вод-автомат, радиолокационная станция, автоматическая телефонная станция, метеорологическая ракета и т. п.

В комплекс, кроме изделий, выполняющих основные функции, могут входить и изделия, предназначенные для выполнения вспомогательных функций, например: изделия для монтажа комплекса, укладочные средства и тара, запасные части и др.

**Комплект** — два и более изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например, комплект запасных частей, комплект измерительных инструментов и т. п.

К комплектам также относятся сборочные единицы или детали, поставляемые вместе с набором других сборочных единиц и (или) деталей, предназначенных для выполнения вспомогательных функций при эксплуатации этой сборочной единицы или детали (осциллограф в комплекте с укладочным ящиком, запасными частями, монтажным инструментом, сменными частями).

Виды и комплектность конструкторских документов. В соответствии с ГОСТ 2.102-68 конструкторскими документами являются графические (чертежи, схемы) и текстовые (спецификации, технические условия, пояснительные записки и т.п.) документы, которые в отдельности или в совокупности определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта. Документация подразделяется на проектную и рабочую.

К проектной документации относятся документы, состоящие из технического предложения, эскизного и технического проектов. Рабочая документация составляется на детали, сборочные единицы, комплексы и комплекты и предназначена непосредственно для изготовления, ремонта, эксплуатации изделия.

Номенклатура конструкторских документов приведена в табл. 1.3.1.

Таблица 1.3.1.

Вид документа	Код документа	Определение
Чертеж детали	-	Документ, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для его изготовления и контроля
Сборочный чертеж	СБ	Документ, содержащий изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для ее сборки (изготовления) и контроля
Чертеж общего вида	ВО	Документ, определяющий конструкцию изделия, взаимодействие его ос-

		новых составных частей и поясняющий принцип работы изделия
Теоретический чер- теж	ТЧ	Документ, определяющий геометрическую форму (обводы) изделия и координаты расположения составных частей
Габаритный чертеж	ГЧ	Документ, содержащий контурное изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами
Электромонтажный чертеж	МЭ	Документ, содержащий данные, необходимые для выполнения электрического монтажа изделия
Монтажный чертеж	МЧ	Документ, содержащий контурное изображение изделия, а также данные, необходимые для его установки (монтажа) на месте применения. К монтажным чертежам также относятся чертежи фундаментов, специально разрабатываемых для установки изделия
Упаковочный чертеж	УЧ	Документ, содержащий необходимые данные для выполнения упаковки изделия
Схема	По ГОСТ 2.701-84	Документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними
Перечень элементов	ПЭЭ	Документ, определяющий состав электрической схемы
Спецификация	-	Документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса, комплекта
Ведомость спецификаций	ВС	Документ, содержащий перечень всех спецификаций составных частей изделия с указанием их количества и

		входимости
Ведомость ссылочных документов	ВД	Документ, содержащий перечень документов, на которые имеются ссылки в конструкторских документах изделия
Ведомость покупных изделий	ВП	Документ, содержащий перечень покупных изделий, применяемых в разрабатываемом изделии
Ведомость разрешения применения покупных изделий	ВИ	Документ, содержащий перечень покупных изделий, разрешенных к применению в соответствии с ГОСТ 2.124-85
Ведомость держателей подлинников	ДП	Документ, содержащий перечень предприятий (организаций), на которых хранят подлинники документов, разработанных и (или) применяемых для данного изделия
Ведомость технического предложения	ТП	Документ, содержащий перечень документов, вошедших в техническое предложение
Ведомость эскизного проекта	ЭП	Документ, содержащий перечень документов, вошедших в эскизный проект
Ведомость технического проекта	ТП	Документ, содержащий перечень документов, вошедших в технический проект
Пояснительная записка	ПЗ	Документ, содержащий описание устройства и принципа действия разрабатываемого изделия, а также обоснование принятых при его разработке технических и технико-экономических решений
Технические условия	ТУ	Документ, содержащий требования (совокупность всех показателей, норм, правил и положений) к изделию, из-



		готовлению, контролю, приемке и поставке, которые нецелесообразно указывать в других конструкторских документах
Программа и методика испытаний	ПМ	Документ, содержащий технические данные, подлежащие проверке при испытании изделий, а также порядок и методы их контроля
Таблица	ТБ	Документ, содержащий в зависимости от его назначения соответствующие данные, сведенные в таблицу
Расчет	РР	Документ, содержащий расчеты параметров и величин
Эксплуатационные документы	По ГОСТ 2.601-68	Документы, предназначенные для использования при эксплуатации, обслуживании и ремонте изделия в процессе эксплуатации
Ремонтные документы	По ГОСТ 2.602-68	Документы, содержащие данные для проведения ремонтных работ на специализированных предприятиях
Инструкция	И	Документ, содержащий указания и правила, используемые при изготовлении изделия (сборке, регулировке, контроле, приемке и т. п.)

Документы в зависимости от характера их выполнения и использования бывают следующих видов: оригиналы, подлинники, дубликаты, копии.

**Оригинал** - документ, выполненный на любом материале и предназначенный для изготовления по нему подлинника.

**Подлинник** - документ, оформленный подлинными установленными подписями и выполненный на любом материале, позволяющем многократное воспроизведение с него копий. Допускается в качестве подлинника использовать оригинал, репрографическую копию или экземпляр образца, изданного типографским способом, завизированные подлинными подписями лиц, разработавших данный документ и ответственных за нормоконтроль.

**Дубликат** - копия подлинника, обеспечивающая идентичность воспроизведения подлинника, выполненного на любом материале, позволяющем снятие с него копий.

**Копия** - документ, выполненный способом, обеспечивающим его идентичность с подлинником (дубликатом), и предназначенный для непосредственного использования при разработке, в производстве, эксплуатации и ремонте изделий. Копиями являются также микрофильмы — копии, полученные с микрофильма-дубликата.

При определении комплектности конструкторских документов на изделия различают: основной конструкторский документ, основной комплект конструкторских документов, полный комплект конструкторских документов.

*Основными конструкторскими документами являются:* для деталей - чертеж детали; для сборочных единиц, комплексов и комплектов - спецификация.

Основной комплект конструкторских документов изделия объединяет конструкторские документы, относящиеся ко всему изделию в целом, например, сборочный чертеж, принципиальная электрическая схема, технические условия и др. В основной комплект документов изделия не входят конструкторские документы составных частей.

Полный комплект конструкторских документов изделия состоит из основного комплекта конструкторских документов на данное изделие и основных комплектов конструкторских документов на все его составные части.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Понятия конструкции РЭС, её структура, представление конструкции РЭС как системы?
2. Опишите иерархию конструирования РЭС.
3. Какие требования предъявляются к конструкторской документации, предназначенной для производства РЭС?
4. Как организуются опытно-конструкторские (ОКР) и научно-исследовательские работы (НИР)?
5. Поколения РЭС, особенности конструкций, перспективы.
6. Какие факторы ограничивают конструктора при проектировании РЭС?
7. Виды технологичности.
8. Как достигается минимизация габаритов и массы конструкции РЭС?
9. Какова структура и состав ТЗ?
10. Как влияют климатические факторы?
11. Как влияют механических факторов?
12. Условия эксплуатации ЭВС.
13. Условия эксплуатации бытовой РЭС.
14. Какие факторы определяют виды и уровни стандартов?
15. Какие системы автоматизированного проектирования применяются для конструирования РЭС?

16. Какую функцию выполняет Единая система конструкторской документации (ЕСКД)?

## 2. Компоновка и несущие конструкции РЭС

### 2.1. Компоновка РЭС. Эргономическое и эстетическое качество конструкций РЭС

**Основные положения. Определение компоновки. Принципы компоновки.** Задача компоновки заключается в распределении модулей низшего уровня по конструктивным модулям высшего уровня.

При этом считается, что каждый модуль является конструктивно неделимым компонентом по отношению к модулю более высокого уровня и, как правило, функционально и конструктивно унифицированным. Среди задач компоновки можно выделить два характерных класса:

К первому из них относятся задачи, в которых осуществляется разбиение схемы устройств на конструктивные модули с учетом таких ограничений, как количество компонентов в модуле, число внешних выводов на модуле, суммарная площадь, занимаемая компонентами. Главными критериями оптимальности компоновки в этом случае являются: минимум числа образующихся в результате компоновки модулей высшего уровня, минимум числа соединений между модулями и другие. К отмеченным выше критериям и ограничениям могут быть добавлены и другие, например условия электромагнитной совместимости в модуле, нормального теплообмена, минимизации задержек в распространении сигналов. Эти условия должны быть выяснены до начала компоновки либо они проверяются по окончании компоновки.

Такие задачи возникают при разбиении схемы устройства на узлы большей степени сложности, к которым не предъявлены строгие требования в отношении схемной и функциональной унификации.

Примером таких задач являются задачи разбиения схемы на большие интегральные схемы частного применения, распределения микросхем по печатным платам и отдельных печатных плат по панелям. Подводя итог вышесказанному, отметим, что к первому классу задач компоновки относятся такие, в которых критерий модулей может включать несколько логических элементов или их функциональных групп, в общем случае соединенных между собой. Иногда эти задачи выделяют в отдельный класс и называют задачами покрытия функциональной схемы заданным набором конструктивных модулей. Эти задачи более трудны в формализации, их решение до настоящего времени считается весьма сложным.

Задачи размещения и трассировки являются тесно связанными, так как в процессе размещения определяются условия для трассировки межсоединений. Совместное решение этих задач представляет значительные трудности, и при алгоритмическом подходе к их решению эти задачи рассматриваются, как правило, раздельно. Сначала осуществляется размещение модулей низшего уровня в модуле высшего, например, микросхем на печатной плате, а затем осуществляется трассировка межсоединений. Если трассировка оказывается

неудовлетворительной, то процесс размещения повторяется с учетом недостатков предыдущего варианта размещения. В большинстве случаев для решения задач конструкторского проектирования радиоустройство представляется множеством конструктивных модулей, функциональное назначение которых не конкретизируется и группы контактов которых связаны эквипотенциальными электрическими соединениями. Такое представление устройства называют коммутационной схемой

### **Методология конструирования и иерархия конструктивных уровней. Синтез и анализ при конструировании. Базовый принцип.**

Снизить затраты на разработку, подготовку производства и освоение РЭА, обеспечить совместимость и преемственность аппаратурных решений с одновременным улучшением качества, увеличением надежности и срока службы аппаратуры в эксплуатации позволяет модульный принцип конструирования изделий.

Модульный принцип конструирования предполагает проектирование изделий РЭА на основе максимальной конструктивной и функциональной взаимозаменяемости составных частей конструкции - модулей.

**Модуль** - составная часть аппаратуры, выполняющий в конструкции подчиненные функции, имеющий законченное функциональное и конструктивное оформление и снабженный элементами коммутации и механического соединения с подобными модулями и с модулями низшего уровня в изделии.

В основе модульного принципа лежит разукрупнение (разбивка, расчленение) электронной схемы РЭА на функционально законченные подсхемы (части), выполняющие определенные функции. Эти подсхемы разбиваются на более простые модули, и так далее, пока электронная схема изделия не будет представлена в виде набора модулей разной сложности, а низшим модулем не окажется *корпус микросхемы (МС)* с обслуживающими ее радиоэлементами.

Модули низшего уровня устанавливаются и взаимодействуют между собой в модулях следующего уровня иерархии на какой-либо конструктивной основе (несущей конструкции) и реализуются в виде типовых конструктивных единиц, которые устанавливаются и взаимодействуют в модуле более высокого уровня, и т. д. В зависимости от сложности проектируемого изделия может быть задействовано разное число уровней модульности (уровней конструктивной иерархии).

Конструкция современной РЭА представляет собой иерархию модулей, каждая ступень которой называется уровнем модульности. При выборе числа уровней модульности проводится типизация модулей, сокращение их разнообразия и установление таких конструкций, которые выполняли бы достаточно широкие функции в изделиях определенного функционального назначения. Применение микросхем с различными корпусами в пределах одного устройства нецелесообразно, так как здесь требуется обеспечить их совместимость по электрическим, эксплуатационным и конструктивным параметрам.

При использовании интегральных микросхем операции сборки конструкции начинают на уровне схем, выполняющих определенные функции.

Интегральная микросхема при этом является исходным унифицированным конструктивным элементом, унификация которого требует унификации и других конструктивных единиц, для того чтобы она была технологичной в производстве, надежной в работе, удобной в наладке, ремонте и эксплуатации.

Уровни конструктивной иерархии. В конструкции радиоэлектронной аппаратуры можно выделить четыре основных уровня (рис. 2.1.1).

**Уровень 0.** Конструктивно неделимый элемент - интегральная микросхема с радиоэлементами ее обслуживания.

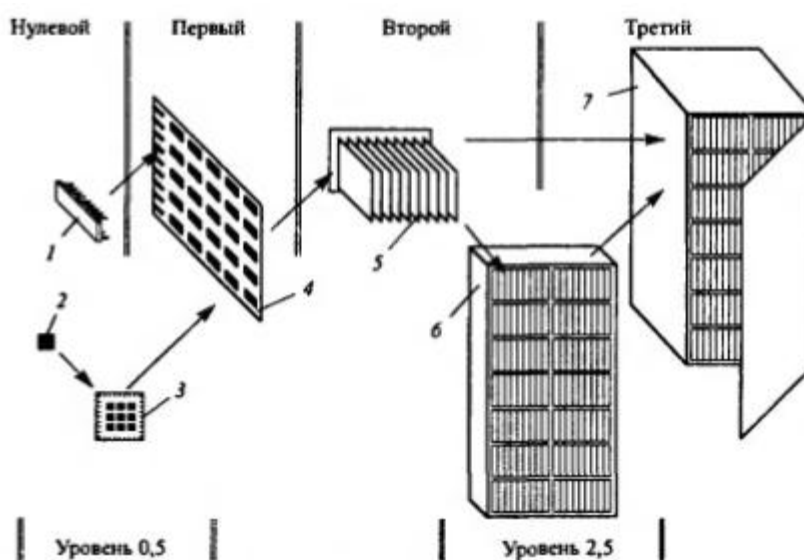


Рис. 2.1.1. Конструктивная иерархия и входимость модулей:

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

**Уровень I.** На уровне I неделимые элементы объединяются в схемные сочетания, имеющие более сложный функциональный признак, образуя ячейки, модули, типовые элементы замены (ТЭЗ). Эти конструктивные единицы не имеют лицевой панели и содержат единицы и десятки микросхем. К первому структурному уровню относят печатные платы и большие гибридные интегральные схемы (БГИС), полученные путем электрического и механического объединения бескорпусных микросхем и кристаллов полупроводниковых приборов на общей плате.

**Уровень II.** Этот уровень включает в себя конструктивные единицы - блоки, предназначенные для механического и электрического объединения элементов уровня I. Основными конструктивными элементами блока является панель с ответными соединителями модулей первого уровня. Межмодульная коммутация выполняется соединителями, расположенными по периферии панели блока. Модули первого уровня размещаются в один или несколько рядов. Кроме соединительной конструктивные единицы уровня II могут содержать лицевую панель, образуя простой функциональный прибор.

**Уровень III.** Уровень III может быть реализован в виде стойки или крупного прибора, внутренний объем которых заполняется конструктивными единицами уровня II - блоками.

Число уровней конструктивной иерархии может быть изменено как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения в зависимости от класса аппаратуры и уровня технологии ее изготовления. При разработке несложной аппаратуры высшие уровни модульности отсутствуют. Большая многопроцессорная аппаратура со сложной структурой требует использования четырех, а иногда и пяти уровней конструктивной иерархии. Так, крупные системы могут рассматриваться как уровень IV, включающий в свой состав несколько стоек, соединенных кабелями.

Таблица 2.1.1.

Связь между конструктивной и схемной модульностью	
Конструктивный модуль	Схемный модуль
Корпус микросхемы	Логический элемент
ТЭЗ	Функциональный узел
Блок	Устройство
Рама	Комплекс
Стойка	Система

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

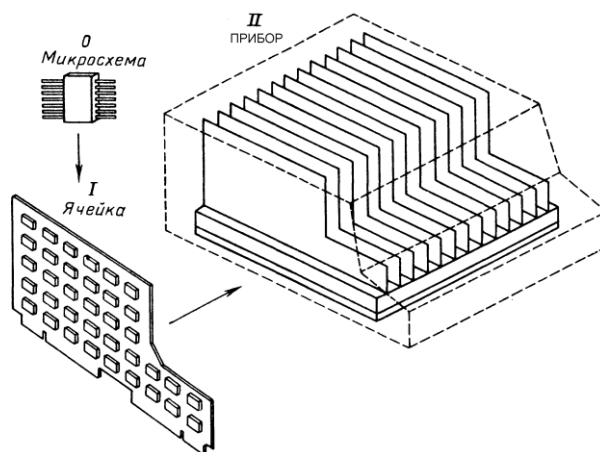


Рис. 2.1.2. Структурные уровни конструктивной иерархии небольшого прибора

Приведенная 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. В больших интегральных схемах (БИС) реализуются целиком устройства (например, пре-

образователи, запоминающие устройства) или их крупные фрагменты, при этом несложная система может быть конструктивно выполнена на одной печатной плате.

Для небольших изделий нет необходимости использования конструктивных единиц уровня II и приборы монтируют непосредственно из ячеек. При этом размеры ячеек и число монтируемых на них микросхем, как правило, больше, чем в больших системах. Это связано с тем, что разбиение функциональной схемы сравнительно небольших приборов на повторяющиеся мелкие узлы приводит к появлению большого числа проводных и разъемных соединений. На рис. 2.1.2 представлены структурные уровни конструктивной иерархии небольшого прибора. Ячейки вместе со смонтированными на них микросхемами устанавливаются непосредственно на базовую плату, образуя блок, который затем помещают в кожух с пультом управления (настольный вариант) или с разъемом (бортовой вариант).

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

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

- функциональной законченности, когда выделяемая подсхема должна обладать необходимой полнотой и выполнять определенные частные функции;
- минимизации внешних связей подсхем, либо, если электрические соединители модулей заданы, чтобы число внешних связей не превысило число контактов соединителя;
- максимального заполнения отводимого конструктивного пространства модулями, компоненты не должны существенно отличаться между собой по габаритным размерам и массе;
- модули подсхем должны рассеивать приблизительно одинаковые мощности во избежание местных перегревов;
- модули подсхем не должны быть чрезмерно чувствительными к электрическим, магнитным и электромагнитным помехам и не должны создавать чрезмерных помех.

Функциональная законченность подсхем сокращает число межмодульных электрических соединений, позволяет вносить конструктивные изменения на более поздних стадиях проектирования, упрощает и удешевляет контроль модулей.

*Разделение конструкции РЭА и ГИВС на уровни позволяет:*

- 1) организовать производство по независимым циклам для каждого структурного уровня;



- 2) автоматизировать процессы сборки и монтажа;
- 3) сократить период настройки, так как может быть произведена предварительная настройка отдельных конструктивных единиц порознь;
- 4) автоматизировать решение задач размещения элементов и трассировки соединений;
- 5) унифицировать стендовую аппаратуру для испытания конструктивных единиц;
- 6) повысить надежность конструктивных единиц.

Принципы иерархического конструирования. В настоящее время получили широкое распространение такие принципы конструирования, как моно-схемный, схемно-узловой, каскадно-узловой, функционально-узловой и модульный.

Моносхемный принцип конструирования заключается в том, что полная принципиальная схема радиоэлектронного аппарата располагается на одной печатной плате и, поэтому, выход из строя одного элемента приводит к сбою всей системы.

Оперативная замена вышедшего из строя элемента затруднена из-за сложности его обнаружения. РЭА, построенная по моносхемному принципу, должна быть смонтирована из нескольких БИС, в которых предусмотрены меры увеличения надежности путем введения аппаратурной и информационной избыточности. Нахождение неисправностей при этом должно производиться программными методами.

**Схемно-узловой принцип конструирования.** При этом принципе конструирования на каждой из печатных плат располагают часть полной принципиальной схемы радиоаппарата, имеющую четко выраженные входные и выходные характеристики. По такому принципу сконструированы настольные и бортовые приборы, где различные устройства приборов выполняют на одной или нескольких платах, а объединение их между собой производят с помощью коммутационной платы и проводных жгутов.

**Каскадно-узловой принцип конструирования** заключается в том, что принципиальную схему радиоаппарата делят на отдельные каскады, которые не могут выполнять самостоятельных функций. Системы с относительно сложной и большой структурой строятся по каскадно-узловому принципу, а системы с более простой структурой - по схемно-узловому принципу.

**Функционально-узловой принцип конструирования** нашел широкое распространение при разработке больших систем. Базовым элементом конструкции здесь является ТЭЗ. Имея необходимый набор ТЭЗ, можно построить целый ряд систем с различными техническими характеристиками.

**Модульный принцип конструирования** предполагает, что основные функциональные узлы аппаратуры взаимосвязаны с помощью одного канала. Чтобы установить связь с модулем-приемником, модуль-передатчик посылает нужный сигнал вместе с адресом по одной (или более) шине. Сигналы поступают на входы всех подключенных к каналу модулей, но отвечает только за-

прашиваемый.

Применяя этот принцип, можно построить систему с практически неограниченной производительностью и сложностью, сохраняя при этом гибкость в ее организации, так как разработчик использует ровно столько модулей, сколько ему требуется. Разработчик системы может также легко модернизировать конструкцию, меняя или добавляя отдельные модули и получая при этом необходимые параметры.

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

Конструкционная система 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.

**Базовый принцип.** 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 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 для создания модификаций аппаратурных решений. Иерархическое построение базовых конструкций с гибкой структурой и числом уровней не более четырех является вполне достаточным для разработки РЭА 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.

Оптимальными с позиций стандартизации следует считать ряды, обес-

печивающие наибольший экономический эффект от их использования и опережающую стандартизацию. Опережающая стандартизация позволяет увеличить сроки действия стандартов.

**Модули нулевого уровня.** На низшем нулевом уровне конструктивной иерархии РЭА находятся МС. По функциональному назначению МС делят на логические (цифровые), линейно-импульсные и линейные (аналоговые). Элементы электрической схемы полупроводниковых МС формируют в объеме или на поверхности полупроводникового материала (подложки). Формирование активных и пассивных элементов схемы производят введением концентраций примесей в различные части монокристаллической пластины. В зависимости от применяемых активных элементов полупроводниковые МС подразделяют на схемы с биполярными и униполярными структурами. В гибридных МС пассивную часть схемы выполняют в виде пленок, наносимых на поверхность диэлектрического материала (подложки), а активные элементы, имеющие самостоятельное конструктивное оформление, крепят к поверхности подложки.

Степень интеграции  $K_n$  микросхемы определяется числом  $N$  содержащихся в ней элементарных схем:  $K_n = [lgN] + 1$ , где  $[lgN]$  - целая часть  $lgN$ . Микросхема, содержащая до 10 элементарных схем, имеет первую степень интеграции (малая МС), до 100 схем - вторую (средняя МС), до 1000 схем - третью (БИС), свыше 1000 схем - сверхбольшую МС (СБИС).

Ряд функциональных микросхем, объединенных по виду технологии изготовления, напряжениям источников питания, входным и выходным сопротивлениям, уровням сигналов, конструктивному оформлению и способам монтажа, образуют серию МС. Обычно в серию МС входит такой набор функциональных микросхем, из которых можно построить законченное устройство. Существуют также серии специальных микросхем, предназначенных для работы в специфических условиях, или специального назначения.

**Корпуса микросхем.** По конструктивному оформлению МС делят на корпусные с выводами, корпусные без выводов и бескорпусные. Корпуса МС служат для защиты помещенных в них полупроводниковых кристаллов, подложек и электрических соединений от внешних воздействий. Корпуса микросхем бывают 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. На корпус МС наносится маркировка в соответствии с ее условным обозначением и выполняется нумерация выводов относительно ключа или метки. По форме тела корпуса и расположению выводов корпуса делят на типы и подтипы.

Для правильной установки МС на плату корпуса имеют ключ, расположенный в зоне первого вывода. 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.

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 жесткие штыревые выводы с ортогональной ориентацией относительно основания позволяют устанавливать микросхемы на плату без дополнительной поддержки даже при жестких вибрационных и ударных нагрузках. Пластмассовые корпуса дешевы, обеспечивают хорошую защиту от механических воздействий, но хуже других типов корпусов защищают от климатических воздействий, перегрева.

Основной недостаток корпусных микросхем и построенных на них устройств - большой объем вспомогательных конструктивных элементов: корпусов, выводов, элементов герметизации, и т. п., не несущих функциональной нагрузки. Использование корпусных микросхем приводит к непроизводительно большому затратам полезного объема и массы устройства, уменьшает на один - два порядка плотность компоновки элементов по сравнению с плотностью их размещения в кристалле или на подложке.

**Микросборки.** Наивысшая плотность компоновки РЭА имеет место при использовании бескорпусных компонентов. Однако установка и монтаж последних на печатных платах 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 - устранил этот недостаток.

Бескорпусные активные компоненты фиксируются клеем на подложке, на которой методом тонко- или толсто пленочной технологии выполняются проводники, контактные площадки цепей входа и выхода, пленочные пассивные компоненты. Подобные конструкции называют микросборками. Микросборки представляют собой бескорпусные гибридные МС индивидуального применения. Интегральные микросхемы микросборок не обязательно должны быть согласованы по входу и выходу, это обеспечивается пассивными элементами схемы микросборки. 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 толсто пленочной технологии ниже тонко пленочной, в ней сравнительно легко удается реализовать многослойные конструкции и повысить плотность компоновки.

Материалом подложек микросборок могут быть некоторые виды стекол

и керамики. Легкость получения гладких поверхностей и дешевизна являются основными преимуществами стекол. Однако низкая теплопроводность, препятствующая рассеиванию больших мощностей, хрупкость, трудность получения сложных форм подложек ограничивает их применение. Керамику отличает большая механическая прочность, лучшая теплопроводность, хорошая химическая стойкость, но и повышенная стоимость и относительно грубая поверхность.

В качестве материалов подложек используется ситалл (на основе стекла), поликор (керамика на основе окиси алюминия), гибкие полиамидные пленки. Размеры ситалловых подложек обычно не превышают 48x60 мм, поликоровых — 24x30 мм. Для увеличения механической жесткости и тепловой стойкости гибкие пленки чаще всего фиксируют на пластине из алюминиевого сплава. Максимальные размеры таких подложек составляют 100x100 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.

**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 изделия, что приводит к уменьшению многообразия подсхем и номенклатуры различных типов ТЭЗ.
- Выбор серии микросхем, корпусов микросхем, дискретных радиоэлементов.
- Выбор единого максимально допустимого числа выводов соединителя для всех типов модулей. За основу принимают число внешних связей наиболее повторяющегося узла с учетом цепей питания и нулевого потенциала и до 10 % 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 печатных плат.
- 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. 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 типовой элемент замены (ТЭЗ) (рис. 2.1.3). На печатную плату

устанавливают микросхемы 4 и для исключения влияния на работу микросхем помех по электропитанию - развязывающие конденсаторы 5.

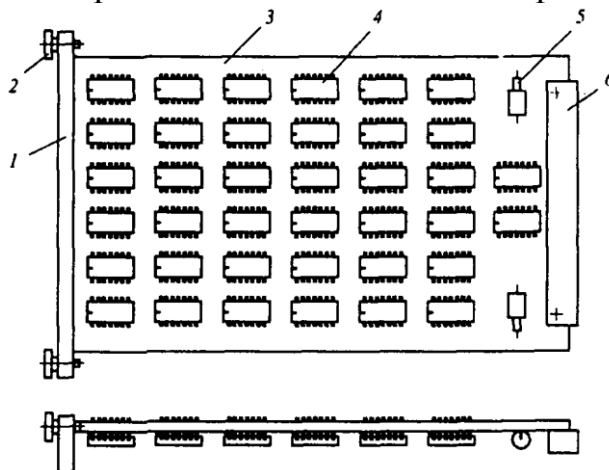


Рис. 2.1.3. 1-лицевая панель, 2-невыпадающий винт, 3-печатная плата, 4-микросхема, 5-развязывающий конденсатор, 6-электрический соединитель (разъем).

Лицевая панель выполняет одновременно несколько функций. На ней располагают элементы индикации и управления, контрольные гнезда, иногда электрические соединители, которые взаимодействуют с платой проводным монтажом. На панели в резьбовые отверстия помещают невыпадающие винты 2, которыми ТЭЗ жестко фиксируется на несущей конструкции модуля второго уровня, наносится адрес, позволяющий отличить ТЭЗ среди подобных в наборе РЭА, а также предотвратить неправильную установку 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 блоках транспортируемой аппаратуры печатные платы модулей, как правило, закреплены жестко на несущей конструкции. Модули первого уровня взаимодействуют между собой приборными соединителями печатного монтажа, непосредственной подпайкой проводов к монтажным отверстиям плат, с использованием переходных штырьков и колодок.

Соединители обеспечивают быструю замену модулей и бывают прямого и косвенного сочленения. Вилка соединителя прямого сочленения является частью печатной платы с печатными ламелями, розетка соединителя - открытого и закрытого исполнения. В розетках открытого исполнения прорезь для установки печатной платы открыта с концов, что позволяет устанавливать в нее различные по ширине платы. Розетки закрытого типа ограничены с концов 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. Фик-

сация модуля в розетке открытого исполнения производится за счет пружинящих контактов розетки, в розетке закрытого исполнения могут быть защелки на торцевых поверхностях соединителя. Расстояние между соседними печатными ламелями выбирается из ряда: 1,25; 2,5; 3,75 и 5 мм. Малое омическое сопротивление и высокая износостойкость контактной пары ламель - контакт розетки достигается покрытием медных поверхностей ламелей серебром, палладием, золотом, родием. Толщина покрытия варьируется в пределах 3-50 мкм.

*При конструировании печатных плат необходимо решать задачи:*

- выбор проводниковых и изоляционных материалов, формы и размеров печатных плат, способов установки компонентов;
- определение ширины, длины и толщины печатных проводников, расстояний между ними, диаметров монтажных и переходных отверстий, размеров контактных площадок;
- трассировка печатного монтажа.

**Модули второго уровня.** К модулям второго уровня относятся блоки различных видов, в том числе одноплатные бескаркасные приборы.

Несущей конструкцией одноплатного бескаркасного настольного прибора со встроенным блоком питания обычно является основание. Для придания жесткости в углах конструкции основания задается определенная форма и устанавливаются кронштейны для закрепления передней и задней панели, боковых стенок и крышки. Для закрепления модулей в основании прибора могут выполняться выдавки с отверстиями, в которые вставляют резьбовые втулки под винты.

На основание прибора устанавливают блок питания, все дополнительные устройства прибора, и объединительную плату электроники с соединителями для ТЭЗ и другими недостающими компонентами схемы прибора. В зарубежной литературе такую плату называют *motherboard*—материнской платой.

При конструировании блоков РЭА с достаточно большим количеством ТЭЗ применяют стеллажный, этажерочный и книжный варианты конструкций в форме параллелепипеда в негерметичном и герметичном исполнении.

Блоки стеллажного типа (рис. 2.1.4) 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. Относительно лицевой панели монтажная панель может занимать как горизонтальное, так и вертикальное поперечное или продольное положение.

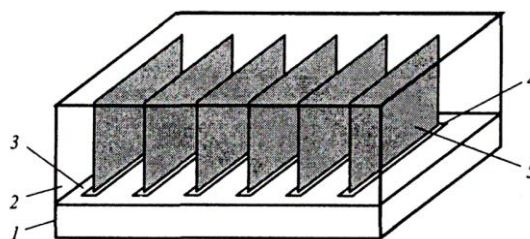


Рис. 2.1.4. 1-каркас, 2-лицевая панель, 3-монтажная панель, 4-соединитель, 5-ТЭЗ.

Блоки с защитными кожухами и крышками являются самостоятельными приборами и в таком виде эксплуатируются. На переднюю панель прибора настольного типа устанавливают элементы индикации, измерительные узлы, элементы управления, 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 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.

Горизонтальное расположение монтажной панели 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. При комплектации блоками рам и стоек шкафного типа в конструкции блоков не вводят кожухи или крышки. При значительной длине ТЭЗ блок с вертикальным расположением монтажной панели можно устанавливать непосредственно в стойку.

Конструктивное исполнение блоков разнообразно, но у всех блоков можно отметить наличие монтажной панели (шасси), каркаса, направляющих и элементов фиксации в модуле высшего уровня. На монтажных панелях выделяют центральную и периферийную зоны. В центральной зоне располагают ответные части соединителей ТЭЗ и направляющие, в периферийной - колодки или соединители внешней коммутации, жгуты, подводы напряжения питания и нулевого потенциала. Желательно ответные соединители ТЭЗ устанавливать на многослойную печатную плату. Однако в процессе отработки аппаратуры часто появляется необходимость во внесении изменений, которые проще всего выполнить проводным монтажом. Используется монтаж одиночным проводом, свитой парой, жгутовой монтаж. 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 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. Различают коллективные направляющие, предназначенные для установки одновременно нескольких ТЭЗ, и индивидуальные. В качестве конструкционных материалов направляющих используется пластмасса и металл. Тепловое сопротивление металлических направляющих ниже, чем пластмассовых, и зависит от конкретной конструкции.

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 большинстве случаев групповое крепление осуществляется прижимной крышкой с наклеенной с внутренней стороны пористой прокладкой.

В блоках книжной конструкции механическое объединение печатных плат между собой и с несущей конструкцией обеспечивается шарнирными узлами, позволяющими поворачивать платы подобно страницам книги. Шарнирные узлы могут выполняться совместно с рамкой, индивидуально, на шарнирный узел может устанавливаться одна или несколько плат. В рабочем состоянии платы объединяют в пакет стяжными винтами. Электрические соединения выполняют объемными проводами или печатными жгутами.

В блоках с откидными платами (рис. 2.1.5) платы 2 механически объединяют между собой и с несущей конструкцией 4 подвижным соединением на оси 5, позволяющим обеспечивать откидывание любой платы и контроль этой платы в откинутом положении при функционировании блока. В рабочем состоянии платы объединяют в пакет и крепят к несущей конструкции. Электрические соединения выполняют объемными проводами, жгутами, соединителями.

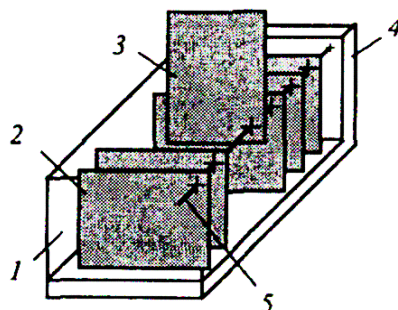


Рис. 2.1.5. 1-кожух, 2-плата, 3-откинутая плата, 4-несущая конструкция, 5-ось шарнира.

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. 2.1.6) 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.

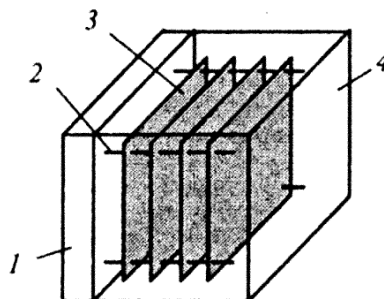


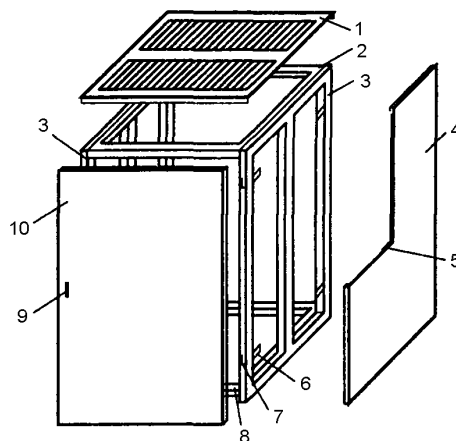
Рис. 2.1.6. 1-установочная панель, 2-стяжной винт, 3-плата, 4-кожух.

Несущей конструкцией блока является установочная панель. Возможны вертикальная и горизонтальная установка панели в модуле высшего уровня. На выбор способа ориентации панели влияет конструкция, тепловой режим блока, 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. Преимуществом компоновки является простота конструкции, недостатком - низкая ремонтпригодность.

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. Производственные условия рекомендуют применять однотипные конструкции ТЭЗ, элементов несущих конструкций, фиксации, крепления, монтажа.

В герметичные корпуса блоков устанавливают один или несколько пакетов модулей первого уровня, особо чувствительных к влиянию условий эксплуатации. Компактные герметичные блоки могут размещаться в любом месте объекта эксплуатации, что является преимуществом подобной компоновки, но при этом возрастают длины электрических соединений между блоками. Необходимо отметить, что в каждом конкретном случае выбор конструктивного исполнения блока решается комплексно и с учетом ограничений, накладываемых объектом эксплуатации.

**Модули третьего уровня.** Модуль третьего уровня конструктивной иерархии - стойка, шкаф - предназначен для установки и коммутации блоков или рам (объединенных конструктивно блоков) и обеспечения их работоспособности в составе РЭА.



**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. 2.1.7.**

Конструктивной основой любой стойки является каркас, обычно изготавливаемый из стального уголкового профиля или труб прямоугольного или квадратного сечений. На рис. 2.1.7 представлен каркас шкафной стойки, который собирается из двух боковин 3, нижнего 8 и верхнего 2 оснований каркаса. Боковины и основания сварены из труб 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 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. 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 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 детали каркаса, щиты, дверцы электрически объединяют оплеткой экранированного проводника с контактными лепестками «под винтовое соединение». На детали каркаса привариваются бобышки, на щиты и дверцы - скобы. В бобышках и скобах нарезают резьбовые отверстия, и устанавливают контактные лепестки оплетки.

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.

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 РЭА 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.

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 комплектуется из блоков, глубина которых во много раз меньше глубины каркаса стойки. В этом случае блоки устанавливают в промежуточную конструкцию — раму. В стойке размещают вертикально 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.

В двухрамной стойке для доступа к монтажным сторонам и лицевым панелям блоков одна или обе рамы 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.

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.

## 2.2. Несущие конструкции РЭС

Унификация механических конструкций для электронного оборудования. Рассмотрены проблемы развития отечественных базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств и пути их решения. Термин «механическая конструкция для электронного оборудования» вошел в обиход одновременно с началом внедрения в отечественную практику стандартов разработки технического комитета (ТК 48) «Электромеханические компоненты (соединители) и механические конструкции для электронного оборудования» Международной электромеханической комиссии (МЭК).

Для отечественной практики более привычен термин «несущая конструкция», реализованный в ГОСТ 21676-2000 и относящийся к элементам конструкции или их совокупности, предназначенным для размещения технических средств и обеспечения их устойчивости и прочности в заданных условиях эксплуатации. Базовой (БНК) является несущая конструкция, габаритные, установочные и присоединительные размеры которой стандартизованы. Целью данной статьи является анализ состояния и обоснование путей развития отечественных БНК в современных условиях.

На основе БНК в настоящее время построено более 80% разрабатываемой аппаратуры, поэтому без развития системы БНК невозможно обеспечить рациональное сокращение номенклатуры создаваемых и используемых радиоэлектронных средств (РЭС), необходимое качество и, что особенно важно при рыночной экономике, снижение затрат. Именно развитие системы БНК позволяет перейти на качественно новый уровень разработки аппаратуры – гибкое комплексирование систем РЭС на основе стандартных электронных модулей (СЭМ), стандартного программного обеспечения и единой системы высокопроизводительных интерфейсов, что в конечном итоге обеспечит:

- повышение технико-экономической эффективности разработки, производства и эксплуатации РЭС;
- обеспечение высокой эксплуатационной надежности РЭС;
- внедрение новых информационных технологий;

- конкурентно - способность аппаратуры на международном рынке;
- решение вопросов импортозамещения электронных модулей;

Поэтому основной задачей унификации БНК является выбор лучших технических решений на основе сравнения альтернативных вариантов по получаемому эффекту и затрачиваемым средствам. При этом необходимо учитывать, что система БНК базируется на оптимизации параметрических (типоразмерных) рядов и методов конструирования, обеспечивающих межвидовую унификацию и взаимозаменяемость конструкций РЭС.

*Основными требованиями, предъявляемыми к БНК РЭС, являются:*

- размещение РЭС с минимальными потерями площади и объема;
- соответствие изделий требованиям отечественных и международных стандартов по конструктивным и размерным характеристикам;
- размерная совместимость изделий различных уровней разукрупнения, а также наличие интерфейсов совместимости изделий, построенных в разных модульных сетках;
- размерная взаимозаменяемость изделий одного типоразмера в пределах одного уровня разукрупнения - ячейка, блочный каркас, шкаф (стойка);
- обеспечение современных требований по технической эстетике, эргономике и безопасности РЭС:

Для изделий спецтехники и двойного применения необходимо также обеспечить требования технического задания в части механических, климатических и спецвоздействий.

Остановимся на важнейших из этих требований более подробно:

Размещение РЭС с минимальными потерями площади и объема. В данном случае речь идет о рациональном размещении элементов на печатной плате (ячейке), ячеек в блочном каркасе (вставном блоке), блочных каркасов в шкафу (стойке, пульте), шкафов на объекте-носителе (автомобиле, корабле, контейнере или просто в комнате). Решение в данном случае одно - применение принципа размерно-модульной координации, которая проявляется двумя стандартизуемыми характеристиками: размерностью модуля и рядом размерных чисел (шагов). В отечественной практике большинство БНК были построены на следующей системе размерных модулей 2.5, 5 и 20 мм (1). В международной практике наиболее развита так называемая «дюймовая» система с модулем в 2.54 мм (1 дюйм). Однако все более широко начинает внедряться «метрическая» система с модулями 0.5, 5 и 25 мм (рис. 1).

Практика показала, что наиболее жизнеспособными являются так называемые «сквозные» модульные системы, в которых на основе единого модульного шага разрабатываются изделия электронной техники (ИЭТ), печатные платы, ячейки, блочные каркасы, корпуса приборов, шкафы и т.п. При этом приходится констатировать, что инициатива в данном направлении исходит от органов международной стандартизации. Так, стратегический план деятельности ТК48 МЭК, принятый на заседании в г. Хьюстоне (октябрь 1998 г.) предусматривает дальнейшее развитие стандартизации БНК, построенных на основе

модульного принципа конструирования, в тесной взаимосвязи с разработками других комитетов: ТК91 «Технология электронных узлов», ТК74 «Безопасность и экономичность оборудования» и др. Определенное, хотя и недостаточное, внимание данной проблеме уделяет и руководство Российского Агентства по системам управления (РАСУ).

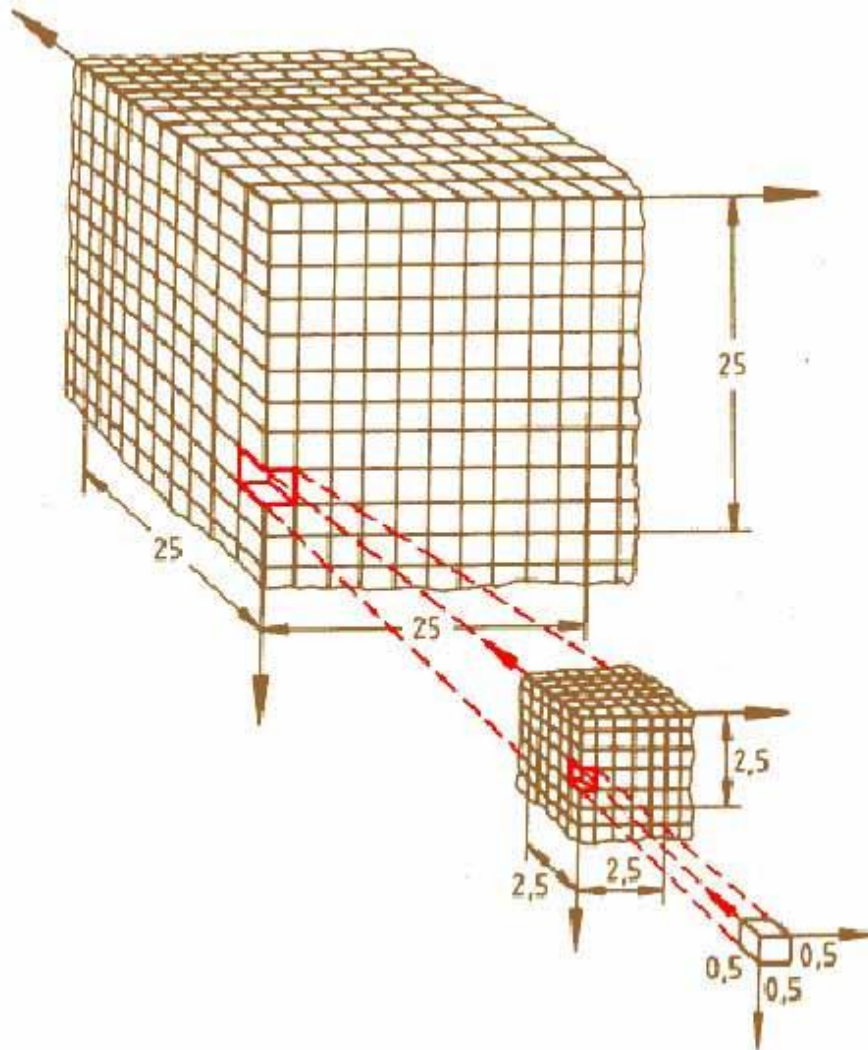


Рис.2.2.1. Метрическая система размерно-модульной координации

И, если в 50-60 годы были определены принципы модульного построения РЭС и разработаны одни из первых в стране унифицированные модули, в 70-80 годы комплекс работ по унификации БНК позволил сократить номенклатуру в несколько раз, в 90-е годы была разработана принципиально новая современная система БНК, то в настоящее время средства выделяются только на поддержание системы нормативно-технической документации.

Соответствие изделий требованиям отечественных и международных стандартов. Здесь, в первую очередь, хочется остановиться на коренных отличиях в системах стандартизации. Так комплексы международных стандартов МЭК основываются исключительно на добровольности их применения. Стан-

дарты не регламентируют собственно конструкцию, лишь рекомендуют при разработке обеспечивать взаимозаменяемость за счет выдерживания определенных размеров. Тем не менее, конструктивы разных компаний и стран полностью совместимы. Очевидно, что решающими факторами здесь являются экономические. Возможность широкого использования международной кооперации оказалась более экономически целесообразней, чем «натуральное хозяйство», до последнего времени процветающее в нашей стране. Ведь и сейчас целый ряд отраслей, ведомств и крупных предприятий держатся за свои давно морально устаревшие конструктивы. Сейчас в стране используется более 200 видов БНК, причем объем выпуска их подавляющего числа составляет единицы штук в год. Все эти БНК регламентированы стандартами (государственными, отраслевыми, предприятий), несоблюдение которых до последнего времени «преследовалось по закону». Все попытки директивного уменьшения номенклатуры БНК к желаемому результату не привели. Остается надеяться на экономические рычаги и внедрение нового «Закона о техническом регулировании».

Сложившейся ситуацией воспользовались иностранные фирмы - производители БНК. Отечественный рынок буквально захлестнули конструктивы таких фирм, как *Rittal*, *Schroff* и других. Приходится констатировать, что высокопроизводительное оборудование, современные технологии и материалы и, самое главное, совместимость и взаимозаменяемость конструктивов позволили данным компаниям практически полностью взять под контроль российский рынок БНК общепромышленного назначения. Попытки целого ряда отечественных производителей БНК противостоять этому в большинстве случаев не увенчались успехом из-за высокой цены и низкого качества продукции. Выход видится только в объединении усилий всех заинтересованных предприятий по разработке и организации централизованного производства БНК. В противном случае скоро и рынок БНК для аппаратуры спецприменения будет безвозвратно отдан импортерам.

Первым шагом должно являться дальнейшее совершенствование системы стандартизации и ее полная гармонизация с международными стандартами. На рис. 2.2.2 представлены результаты анализа соответствия действующих отечественных и международных стандартов.





Рис. 2.2.2. Соответствие отечественных и международных стандартов на БНК

Как видно из рисунка, в части конструктивов в мире применяются две равноправных системы построения БНК - дюймовая и метрическая. Дюймовая система (серия стандартов МЭК 60297), полностью сформировавшаяся к 1984 году, в настоящее время наиболее широко распространена. Конструктивы этой системы широко используются в РЭС, наиболее «продвинутые» интерфейсы *VME*, *VXS* построены на их основе, имеется оснащенное производство, налажена реклама и реализация. Поэтому данная система будет существовать достаточно долго.

Достоинства данной системы достаточно широко разрекламированы и в нашей стране, поэтому в первую очередь хочется сказать о недостатках. Важнейшим из них является недостаточная прочность блочных каркасов, причем регламентируемые стандартами размерные соотношения не позволяют решить эту проблему. Испытания показывают, что толщина горизонтального профиля каркасов - не более 10 мм, и торцевой способ его крепления с боковой стенкой - торцом делает невозможным использование данного конструктива в РЭС, к которому предъявляются даже не самые жесткие требования по механической прочности. Вторым существенным недостатком является недостаточная величина так называемого «контактного поля». Иначе говоря количества контактов разъемов серии МЭК 60603, совместимых с конструкциями по МЭК 60297 не хватает для современных высокопроизводительных интерфейсов, таких как *Compact PCI*.

Начиная с 1990-х годов МЭК выпустила целый ряд стандартов серии 60917-метрических. Технические решения, предлагаемые данными стандартами являются гораздо более совершенными, поэтому начиная с 2000 года началось фактическое слияние двух систем. В новую серию дюймовых стандартов (МЭК 60297-5-100...107) включены метрические элементы заземления, экранирования, механического кодирования. Данная серия наряду с разъемами

дюймового шага выводов (МЭК 60603) предполагает использование разъемов метрического шага (МЭК 61076). Из «метрических» стандартов заимствовано и двухсторонняя (передняя плюс задняя) установка ячеек.

Таким образом, очевидно, прослеживается тенденция слияния двух систем построения БНК, а поскольку метрическая система является более современной и обеспечивает возможность встраивания в свои конструктивы конструктивов дюймовой системы более низкого уровня (ячеек в блочные каркасы, каркасов в шкафы), для отечественной системы построения БНК она видится более перспективной. Именно по этому пути пошло предприятие ОАО «Авангард» при разработке системы Государственных стандартов РФ на БНК (2...11). Данный комплекс стандартов, разработанный под руководством Главного конструктора БНК, безвременно ушедшего П.И. Овсищера полностью соответствует стандартам МЭК 60917. Однако из рис.2 видно что гармонизация отечественных и зарубежных стандартов не завершена. В настоящее время в ОАО «Авангард» совместно с Госстандартом и Российской комиссией экспертов (РКЭ) подкомитета (ПК48D) проводится комплекс работ по дальнейшему развитию системы ГОСТов на БНК.

Размерная взаимозаменяемость изделий различных уровней разукрупнения. Уровни разукрупнения РЭС и, соответственно, БНК регламентированы ГОСТ 26632 ... . Система построения БНК, разрабатываемых при головной роли ОАО «Авангард» согласно МЭК 60917... и ГОСТ Р 50756 ... представлена на рис.3, при этом необходимо отметить, что эти стандартные конструктивы прошли полный цикл испытаний и обеспечивают прочность и стойкость аппаратуры к механическим и климатическим воздействиям в соответствии с КТС «Мороз-6» для наземных и морских носителей.

Данная система межотраслевых БНК первоочередной номенклатуры является конструктивной основой для наземных стационарных, возимых на колесных и гусеничных шасси, а также морских РЭС (в том числе двойного применения). При рассмотрении типоразмерных рядов представленных на рис. 2.2.3 конструктивов видно, что их габаритные и присоединительные размеры обеспечивают совместимость с аналогичными конструктивами дюймовой системы при незначительных потерях полезного объема. Так дюймовые ячейки с печатными платами  $3U$  (высотой 100 мм.) и  $6U$  (233,35 мм.) могут при незначительных доработках направляющих блочных каркасов устанавливаться на место метрических ячеек с печатными платами  $6SU$  (высотой 115 мм.) и  $12SU$  (265 мм.). Размеры по глубине совпадают. Аналогичная ситуация с блочными каркасами и шкафами - дюймовые конструктивы имеют меньший размер по ширине.

К сожалению, приходится констатировать, что в настоящее время из-за недостаточного финансирования ход работ по дальнейшему развитию БНК существенно замедлился. Так, разработанная «Межотраслевая программа унификации, стандартизации и развития БНК на 2001-2005 гг.» не была утверждена. Поэтому заинтересованным предприятиям приходится рассчиты-

вать лишь на свои силы. Инструментом для решения данной задачи является сформированной в 2000 г. Межотраслевой Совет Главных конструкторов (МСГК) по БНК, в состав которого вошли ведущие специалисты более 70 предприятий и организаций промышленности, Заказчика, Госстандарта.

МСГК проводится большая работа по определению стратегических путей развития БНК, анализу новых разработок, управлению системой нормативно-технической документации. Результатом этой работы явились, например, разработка, изготовление, испытания и включение в систему ГОСТ БНК для подводной морской аппаратуры разработки ОАО «Авангард» в 2002 г. и экранированной сейсмостойкой БНК разработки НИИ Автоматической аппаратуры в 2003 г.

МСГК проводится также большая работа по обеспечению электромагнитной совместимости, вибро-, ударо- и сейсмозащиты, оборудования рабочих мест оператора.

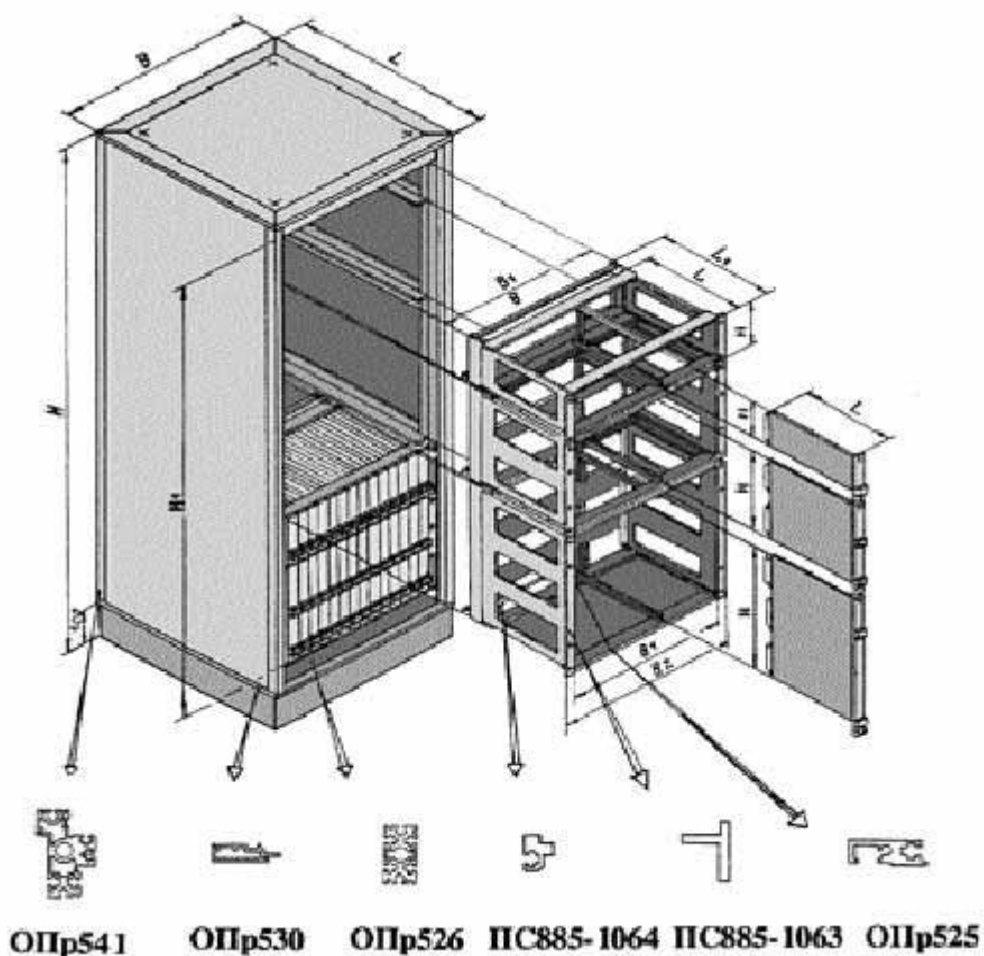


Рис. 2.2.3. Система построения БНК по МЭК 60912 и ГОСТ Р 50756

БНК 2	Размеры, мм	
B	400	500
B <sub>1</sub>	375	475
B <sub>2</sub>	435	535
L	175, 250, 300	
L <sub>1</sub>	225, 300, 350	
H	115, 265, 415	

БНК 3	Размеры, мм				
B	500	600			
B <sub>1</sub>	400	500			
L	500	300	400	500	600
H	600...2000 через 200		2600	600...2000 через 200	
H <sub>1</sub>	H-250				

Размерная взаимозаменяемость изделий в пределах одного уровня разукрупнения. Размерная взаимозаменяемость является одним из важнейших принципов проектирования БНК и РЭС на их основе. Обеспечение взаимозаменяемости возможно только при наличии современного высокопроизводительного производства, разработке и неукоснительном соблюдении технологии изготовления, рациональном выборе материалов и покрытий. В полной мере выполнение данных требований возможно только при осуществлении централизованного производства и поставок БНК. Сложившаяся в 80-х годах система кооперации, производства и поставок БНК практически разрушена, что вызывает резкое увеличение цен на БНК. Другой важной проблемой является резкое увеличение цен на алюминий, а ведь большинство БНК построены на основе прессованного алюминиевого профиля.

**Алгоритмы компоновки.** На этапе конструкторского проектирования решаются вопросы, связанные с компоновкой элементов логической схемы в модули, модулей в ячейки, ячеек в панели и т. д. Эти задачи в общем случае тесно связаны между собой, и их решение позволяет значительно сократить затраты и трудоемкость указанного этапа в САПР. Обычно задачи компоновки рассматриваются как процесс принятия решений в определенных или неопределенных условиях, в результате выполнения которого части логической схемы располагаются в конструктивных элементах  $i$ -го уровня, а эти элементы размещаются в конструктивных элементах  $(i+1)$ -го уровня и т. д., причем расположение выполняется с оптимизацией по выбранному критерию.

Компоновкой электрической схемы РЭА на конструктивно законченные части называется процесс распределения элементов низшего конструктивного уровня в высший в соответствии с выбранным критерием. Основным для компоновки является критерий электромагнитотепловой совместимости элемен-

тов низшего уровня. Данный критерий определяет область допустимых разбиений схемы, на которой формулируются другие критерии. Такими критериями могут быть: минимум типов конструктивно законченных частей, плотность компоновки, минимум соединений между устройствами и др. Очевидно, что внешние соединения между частями схем являются одним из важнейших факторов, определяющих надежность РЭА. Поэтому наиболее распространенным критерием является критерий минимума числа внешних связей. Выполнение этого критерия обеспечивает минимизацию взаимных наводок, упрощение конструкции, повышение надежности и т. д.

Для построения формальной математической модели компоновочных задач удобно использовать теорию графов. При этом электрическую схему интерпретируют ненаправленным мультиграфом, в котором каждому конструктивному элементу (модулю) ставят в соответствие вершину мультиграфа, а электрическим связям схемы – его ребра. Тогда задача компоновки формулируется следующим образом, Задан мультиграф  $G(X, U)$ . Требуется “разрезать” его на отдельные куски  $G_1(X_1, U_1), G_2(X_2, U_2), \dots, G_k(X_k, U_k)$  так, чтобы число ребер, соединяющих эти куски, было минимальным, т.е.

$$\text{минимизировать } \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k U_{i,j}, \quad i \neq j$$

при

$$\forall G_i(X_i, U_i), G_j(X_j, U_j) \subset G(X, U) [G_i(X_i, U_i) \neq G_j(X_j, U_j) \Rightarrow (X_i \cap X_j = \emptyset \& U_i \cap U_j = U_{ij})]$$

$$\bigcup_{i=1}^k G_i(X_i, U_i) = G(X, U) \quad i, j = 1, 2, \dots, k,$$

где  $U_{ij}$  – множество ребер, соединяющих куски  $G_i(X_i, U_i)$  и  $G_j(X_j, U_j)$ .

Другими словами разбиениями частей совокупности  $G$  на графы считаются, если любая часть из этой совокупности не пустая; для любых двух частей пересечение множества ребер может быть не пустым; объединение всех частей в точности равно графу  $G$ .

*Известные алгоритмы компоновки можно условно разбить на пять групп:*

1. алгоритмы, использующие методы целочисленного программирования.
2. последовательные алгоритмы
3. итерационные алгоритмы
4. смешанные алгоритмы

Алгоритмы первой группы хотя и позволяют получить точное решение задачи, однако для устройства реальной сложности фактически не реализуемы на ЭВМ. В последнее время наибольшее распространение получили приближенные алгоритмы компоновки (последовательные, итерационные, смешанные). При использовании последовательных алгоритмов сначала по опреде-

ленному правилу выбирают вершину графа, затем осуществляют последовательный выбор вершин (из числа нераспределенных) и присоединение их к формируемому куску графа. После образования первого куска переходят ко второму и т. д. до получения желаемого разрезания исходного графа. В итерационных алгоритмах начальное разрезание графа на куски выполняют произвольным образом; оптимизация компоновки достигается парными или групповыми перестановками вершин графа из различных кусков. Процесс перераспределения вершин заканчивают при получении локального экстремума целевой функции, удовлетворяющим требованиям разработчика. В смешанных алгоритмах компоновки для получения начального варианта “разрезания” используется алгоритм последовательного формирования кусков; дальнейшая оптимизация решения осуществляется перераспределением вершин между отдельными кусками графа.

**Последовательные алгоритмы компоновки.** В последовательных алгоритмах компоновки «разрезание» исходного графа  $G(X,U)$  на куски  $G_1(X_1,U_1), G_2(X_2,U_2), \dots, G_k(X_k,U_k)$  сводится к следующему. В графе  $G(X,U)$  находят вершину  $x_i \in X$  с минимальной локальной степенью  $\rho(x_i) = \min \rho(x_f)$ .

Если таких вершин несколько, то предпочтение отдают вершине с максимальным числом кратных ребер. Из множества вершин, смежных с вершинами формируемого куска графа  $G_1(X_1,U_1)$ , выбирают ту, которая обеспечивает минимальное приращение связей куска с еще нераспределенными вершинами. Данную вершину  $x_i \in X \setminus X_1$  включают в  $G_1(X_1,U_1)$ , если не происходит нарушения ограничения по числу внешних связей куска, т.е.

$$[x_j \in \Gamma X_1 \ \& \ \delta(x_j) = \rho(x_j) - 2 \sum_{\varepsilon \in E} a_{j\varepsilon} = \min_{x_r \in \Gamma X_1} \delta(x_r) \ \& \ \sum_{g \in j \cup E} \delta(x_g) \leq m] \Rightarrow x_j \cup X_1,$$

где  $a_{j\varepsilon}$  – элемент матрицы смежности исходно графа  $G(X,U)$ ;  $\delta(x_g)$  – относительный вес вершины  $x_g$ , равный приращению числа внешних ребер куска  $G_1(X_1,U_1)$  при включении вершины  $x_g$  во множество  $X_1$ ;  $E$  – множество индексов вершин, включенных в формируемый кусок графа на предыдущих шагах алгоритма;  $m$  – максимально допустимое число внешних связей отдельно взятого куска со всеми оставшимися.

Указанный процесс продолжается до тех пор, пока множество  $X_1$  не будет содержать  $n$  элементов либо присоединение очередной нераспределенной вершины  $x_j$  к куску  $G_1(X_1,U_1)$  не приведет к нарушению ограничения по числу внешних соединений куска, равному

$$\sum_{k_g \in X_1} \delta(x_g)$$

Следует отметить, что величина  $\sum_{k_g \in X_1} \delta(x_g)$  не является монотонной функцией  $|X_1|$ , поэтому, для того чтобы убедиться в невозможности дальнейшего

формирования куска вследствие нарушения последнего ограничения, необходимо проверить его невыполнимость на последующих шагах увеличения множества  $X_1$  вплоть до  $n$ . В качестве окончательного варианта выбирают кусок  $G_1^0(X_1^0, U_1^0)$ , содержащий максимально возможное число вершин графа  $G(X, U)$ , для которого выполняются ограничения на число внешних связей и входящих в него вершин ( $n_{\min} - n_{\max}$ ).

После преобразования куска  $G_1^0(X_1^0, U_1^0)$  процесс повторяют для формирования второго, третьего и т.д. кусков исходного графа с той лишь разницей, что рассмотрению подлежат вершины, не вошедшие в предыдущие куски.

*Сформулируем алгоритм последовательной компоновки конструктивных элементов.*

1)  $t:0$

2)  $X_f = X_t = \emptyset$ ;  $t=t+1$ ;  $\Theta=1$ ;  $\alpha=n_{\max}$ ,

Где  $t$ ,  $\Theta$  – порядковые номера формируемого куска и присоединяемой вершины;  $\alpha$  – ограничение на число вершин в куске.

3) По матрице смежности исходного графа  $|a_{hp}|_{N \times N}$ , где  $N$  – число вершин исходного графа (при большом значении  $N$  для сокращения объема оперативной памяти ЭВМ используем не саму матрицу смежности, а её кодовую реализацию), определяем локальные степени вершин  $X_f \in X : \rho(x_f) = \sum_{p=1}^N a_{fp}$ .

4) Из множества нераспределенных вершин  $X$  выбираем вершину  $x_j$  с  $\rho(x_j) = \min_{x_f \in X} \rho(x_f)$ . Переходим к п.6. Если таких вершин несколько, то переходим к п.5

5) Из подмножества вершин  $X_1$  с одинаковой локальной степенью выбирают вершину  $x_j$  с максимальным числом кратных ребер (минимальным числом смежных вершин), т.е.  $|\Gamma x_j| = \min_{x_f \in X_1} |\Gamma x_f|$ .

6) Запоминаем исходную вершину формируемого куска графа  $x_1^{(t)} = x_j$ . Переходим к п.10

7) По матрице смежности  $|a_{hp}|_{N \times N}$  строим множество  $X_s = X \cap \Gamma X_t$  и определяем относительные веса вершин  $x_r \in X_s$ :

$$\delta(x_r) = \rho(x_r) - 2 \sum_{\varepsilon \in E} a_{r\varepsilon}.$$

8) Из множества  $X_s$  выбираем вершину  $x_j$  с  $\delta(x_j) = \min_{x_r \in X_s} \delta(x_r)$ . Переходим к п.10. Если таких вершин несколько, то переходим к п.9.

9) Из подмножества вершин  $X_v$  с одинаковым относительным весом выбираем вершину  $x_j$  с максимальной локальной степенью, т.е.  $\rho(x_j) = \max_{x_r \in X_v} \rho(x_r)$ .

10)  $X_t = X_t \cup \{x_j\}$ .

11) Если  $\sum_{x_g \in X_t} \delta(x_g) > m$ , то переходим к п.13.

12) Рассмотренные вершины включаем в формируемый кусок  $X_f = X_t$ .

- 13)  $\Theta = \Theta + 1$ .
- 14) Если  $\Theta > \alpha$ , то переходим к п.15, а противном случае – к п.7.
- 15) Если  $|X_f| < n_{\min}$ , где  $n_{\min}$  – минимально допустимое число вершин в куске, то переходим к п.21.
- 16) Выбираем окончательный вариант сформированного куска графа:  
 $X_t = X_f$ ;  $X = X \setminus X_t$ ;  $\alpha = n_{\max}$ .
- 17) Если  $|X| > n_{\max}$ , то переходим к п.20.
- 18) Если  $|X| < n_{\min}$ , то переходим к п.21.
- 19) Определяем число внешних связей последнего куска графа:

$$\sum_{x_g \in X} \delta(x_g) = \sum_{g \in F} \rho(x_g) - 2 \sum_{\substack{g \in F \\ h \in F \\ g \neq h}} a_{gh},$$

где  $F$  – множество индексов вершин, входящих в  $X$ . Если  $\sum_{x_g \in X} \delta(x_g) > m$ , то переходим к п.21, в противном случае – к п.24.

20) Если  $t < k - 1$ , где  $k$  – число кусков разрезания графа, то переходим к п.2, в противном случае – к п.23.

21) Предыдущий цикл «разрезания» считаем недействительным. Если  $t > 1$ , т.е. имеется как минимум один ранее сформированный кусок, то переходим к п.22. в противном случае – к п.23.

22) Ищем другой допустимый вариант формирования предыдущего куска с меньшим числом вершин:  $t = t - 1$ ;  $X = X \cup X_t$ ;  $X_t = \{x_i^{(t)}\}$ ;  $a = |X_t| - 1$ ;  $\Theta = 2$ .

Переходим к п.7.

23) Задача при заданных ограничениях не имеет решения.

24) Конец работы алгоритма.

Рассмотренный алгоритм прост, легко реализуется на ЭВМ и позволяет получить решение задачи компоновки. Также среди достоинств данной группы алгоритмов выступает высокое быстродействие их при решении задач компоновки.

Основным недостатком последовательного алгоритма является неспособность находить глобальный минимум количества внешних связей (не анализируются возможные ситуации). Наибольшая эффективность метода последовательного разбиения графа имеет место, когда число вершин графа  $G$  значительно больше вершин в любой части разбиения.

**Итерационные алгоритмы компоновки.** Сущность данной группы алгоритмов заключается в выборе некоторого начального «разрезания» исходного графа на куски (вручную или с помощью последовательного метода компоновки) и последующего его улучшения с помощью итерационного парного или группового обмена вершин из различных кусков. При этом для каждой итерации осуществляется перестановка тех вершин, которая обеспечивает максимальное уменьшение числа связей между кусками графа или максимальное улучшение другого выбранного показателя качества с учетом исполь-



зуемых ограничений (например, на максимальное число внешних ребер любого отдельно взятого куска).

Найдем выражение для подсчета приращения числа ребер, соединяющих куски  $G_A(X_A, U_A)$  и  $G_B(X_B, U_B)$ , при парном обмене вершин  $x_g \in X_A$  и  $x_h \in X_B$ .

Очевидно, что парная перестановка вершин  $x_g$  и  $x_h$  приведет к изменению числа только тех связывающих куски  $G_A(X_A, U_A)$  и  $G_B(X_B, U_B)$  ребер, которые инцидентны этим вершинам. Общее число соединительных ребер между  $G_A(X_A, U_A)$  и  $G_B(X_B, U_B)$ , инцидентных  $x_g$  и  $x_h$ , до перестановки вершин определяются по матрице смежности следующим образом:

$$r_{gh} = \sum_{i \in I} a_{gi} + \sum_{j \in J} a_{hj} - a_{gh},$$

где  $I$  и  $J$  – множества индексов вершин, принадлежащих  $X_B$  и  $X_A$ . В этом выражении первые два слагаемых определяют число ребер, соединяющих вершины  $x_g$  с  $G_B(X_B, U_B)$  и  $x_h$  с  $G_A(X_A, U_A)$ , а наличие третьего члена обусловлено тем, что связь двух слагаемых учитывалась дважды.

После перестановки вершин  $x_g$  и  $x_h$  получим:

$$r_{gh} = \sum_{i \in I} a_{hi} + \sum_{j \in J} a_{gj} + a_{gh}.$$

Третий член выражения указывает на сохранение связи  $(x_g, x_h)$  после перестановки вершин. Следовательно, в результате перестановки  $x_g$  и  $x_h$  приращение числа ребер, соединяющих  $G_A(X_A, U_A)$  и  $G_B(X_B, U_B)$ ,

$$\Delta r_{gh} = r_{gh} - r_{hg} = \left( \sum_{i \in I} a_{gi} - \sum_{j \in J} a_{gj} \right) + \left( \sum_{j \in J} a_{hj} - \sum_{i \in I} a_{hi} \right) - 2a_{gh}.$$

Перестановка вершин целесообразна, если  $\Delta r_{gh} > 0$ , причем эффективность её тем выше, чем больше  $\Delta r_{gh}$ .

Если исходный граф  $G(X, U)$  задан матрицей смежности  $A = |a_{ij}|_{N \times N}$ , то «разрезание»  $G(X, U)$  на  $k$  кусков эквивалентно разбиению матрицы  $A$  на  $k \times k$  подматриц:

$$A = \begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline A_{11} & & A_{1j} & & A_{1k} \\ \hline & & & & \\ \hline A_{r1} & & A_{rj} & & A_{rk} \\ \hline & & & & \\ \hline A_{k1} & & A_{kj} & & A_{kk} \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array}$$

Операция парного обмена вершин  $x_g$  и  $x_h$  сводится к перестановке соответствующих строк и столбцов матрицы  $A$ . Так как сумма элементов любой подматрицы  $A_{rj}$  определяет число ребер, связывающих  $G_r(X_r, U_r)$  и  $G_j(X_j, U_j)$ , то процесс оптимального разрезания графа  $G(X, U)$  на куски заключается в отыскании на каждой итерации таких парных перестановок строк и столбцов матрицы  $A$ , при которых максимизируется сумма элементов в диагональных подматрицах  $A_{jj}(j=1, 2, \dots, k)$ , что равносильно минимизации числа соединительных ребер.

В итерационных алгоритмах предусмотрена возможность поиска оптимального варианта для различных начальных разбиений. Это связано с тем, что при использовании итерационных алгоритмов оптимальность решения в значительной мере зависит от того, насколько удачно было произведено начальное разбиение графа  $G(X, U)$ .

Итерационные алгоритмы компоновки обеспечивают высокое качество решения задачи, однако требуют больших затрат машинного времени, чем последовательные алгоритмы. Для сокращения числа итераций обмена вершин между кусками в смешанных алгоритмах для получения начального «разрезания» графа применяют последовательные методы формирования его кусков. С этой целью в некоторых итерационных алгоритмах используют процесс групповой перестановки взаимно непересекающихся пар вершин.

**Эргономическое проектирование изделий РЭА.** Эргономика занимается исследованием трудной деятельности с целью её улучшения, т.е. синтезом оптимальных связей и условий в системе «Человек – оператор – РЭА». С позиций кибернетики система есть перечень факторов, которые должны быть приняты в расчёт. В эргономическом проектировании такими факторами являются антропометрические данные и условия окружающей среды, исходные данные при проектировании оптимальных характеристик рабочего места оператора.

Данные антропометрии необходимо обрабатывать с учётом конкретного типа аппарата. РЭА не требует большой точности в соразмерности, и данные антропометрии для неё регламентируются не абсолютными величинами, а определёнными диапазонами и требуют модульного выражения. При этом

важно найти параметрические интервалы «безразличия» антропометрических данных по отношению к эргономически важным размерам устройств и оборудования. Необходим и достаточен учёт минимальных и максимальных значений антропометрических данных статистически значимой выборки потребителей.

*Важнейшим этапом эргономического проектирования является оптимизация взаимодействия оператора с РЭА, компоновка панелей и пультов управления. Методика компоновки включает следующее:*

1. Анализ ТЗ.
2. Составление схемы связей и алгоритма (последовательности операций) при работе оператора с панелью или пультом управления.
3. Формирование сенсорного поля (средств отображения информации), построение маршрутных карт обзора.
4. Формирование моторного поля (зоны управления), построение маршрутных карт рабочих движений.
5. Формирование зоны подсоединений и вариантов конструктивного исполнения.
6. Сравнение и оценка полученных вариантов панели, в частности, и по критерию минимума спонтанной отвлекаемости оператора, возникающей при попадании в маршрут обзора или управления незадействованных индикаторов и органов управления.

Эргономическое и эстетическое качество изделий радиоэлектронной аппаратуры определяет ее конкурентоспособность и удобство, надежность в эксплуатации. Хотя проектирование этих качеств радиоэлектронной аппаратуры является прерогативой особых подразделений, конструктор обязан знать основные требования и правила обеспечения требуемого эргономического и эстетического уровня конструкции, чтобы исключить лишние трудности и издержки в дизайнерском проектировании. *Для эргономической проработки проекта необходимо, используя справочные данные:*

1. Вычертить схему рабочего места оператора и по антропометрическим таблицам определить его размеры (рис. 2.2.7).
2. Согласовать динамические характеристики органов управления и отображения информации с психофизиологическими возможностями сенсомоторного аппарата человека.
3. Составить схему связей и алгоритм (последовательность операций) (рис. 2.2.8) при работе оператора с пультом управления, при наличии нескольких режимов работы аппаратуры; сделать соответствующие эскизные компоновки пульта, из которых нужно выбрать оптимальную по критерию минимума спонтанной отвлекаемости оператора (организации циклов, устранения пересечений и.т.д.).
4. Определить условия производственной среды на рабочем месте оператора. При выполнении пп. 3 и 4 необходимо:

- а) наиболее важные органы управления и индикаторы располагать в оптимальных зонах рабочего, удобных для обслуживания и наблюдения;
- б) органы управления и индикаторы группировать в логические блоки;
- в) органы управления и индикаторы размещать с учетом частоты их использования;
- г) аварийные органы управления и индикаторы устанавливать в легкодоступных местах;
- д) второстепенные органы управления и индикаторы располагать в пределах полных и обязательно оптимальных;
- е) в функциональной группировке все органы управления или индикатору размещать совместно;
- ж) каждый индикатор располагать непосредственно над связанным с ним органом управления или все индикаторы размещать в верхней части, а все органы управления - в нижней части панели;
- з) устанавливать правильную и постоянную взаимосвязь между каждым органом управления и соответствующим ему индикатором

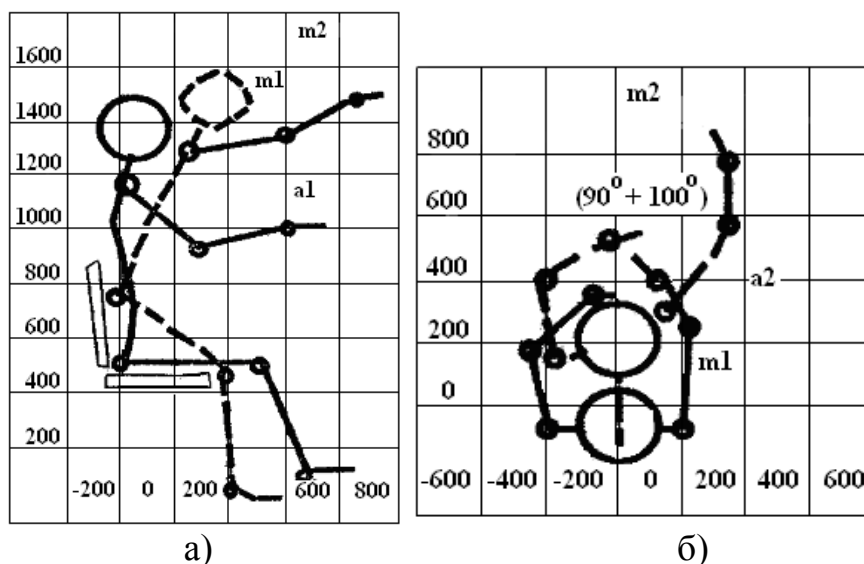


Рис. 2.2.7. Схема эргономической компоновки пультов управления (ПУ) радиоэлектронных систем (РЭС) в вертикальной (а) и горизонтальной (б) проекции

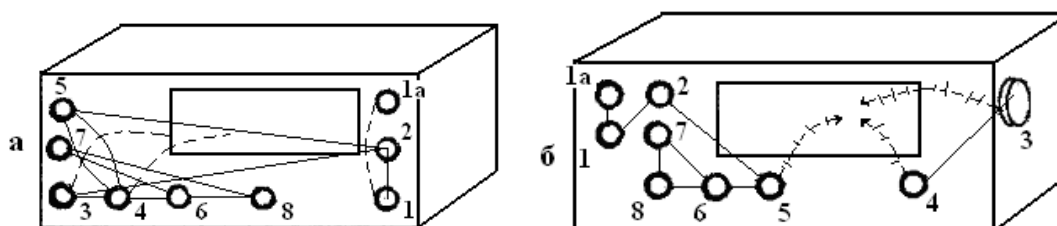


Рис. 2.2.8. Последовательность операции и схема связи. а - исходный вариант; б - оптимизированный вариант.

1 - включение питания тумблером; 1а - контроль включения индикаторной лампочкой; 2 - переключение режима тумблером; 3 - переключение диапазона ручкой; 4 - настройка ручкой и контроль; 5 - уточнение настройки при включенном тумблере фильтра; 6 - окончательная регулировка громкости ручкой; 7 - подбор тона внутреннего генератора; 8 - регулировка тембра ручкой;

маршрут рабочих движений  
правая рука \_\_\_\_\_ ; левая рука ----- ; маршрут обзора -/-/-/.

Таблица 2.2.1

Измеряемая величина	Размер женского тела			
	средний	среднеквадратическое отклонение	наименьший (исключить 5% снизу)	наибольший (исключить 5% сверху)
1	2	3	4	5
Рост	1567	57	1470	1560
Зона вертикальной досягаемости	1981	76	1860	2100
Длина вытянутой руки	661	30	510	711
Зона боковой досягаемости (от плечевой точки)	568	26	526	610
Длина ноги	330	11	765	900
Ширина колен	226	18	200	256
Ширина плеч	349	16	323	375
Длина плеча	202	16	276	330
Ширина расстановки ног	726	72	600	846
Высота глаз	1458	52	600	1548
Высота плечевой точки	1281	52	1200	1365
Высота пальцевой точки	584	36	524	644
Длина руки	697	31	646	748
Высота верхнегрудинной точки	1271	50	1190	1350
Высота линии талии	976	43	906	1046
Длина руки, вытянутой вперёд	686	31	635	737
Рост сидя II	1211	45	1136	1286
Высота глаз (сидя)	1100	42	1030	1170
Локтевая ширина	452	44	380	525
Наибольший диаметр бедер	383	31	337	439
Рост сидя I	842	30	790	890
Высота сиденья	370	22	334	406
Высота глаз над сиденьем	725	28	630	770

Высота плеч над полом	930	41	863	1010
Высота локтя над полом	605	35	550	663
Высота локтя над сиденьем	235	25	195	276
Высота колена	467	24	427	507
Длина предплечья и кисти	427	18	395	457
Длина бедра редуцированная	472	22	436	508
Длина бедра	568	28	522	614
Длина ноги	983	47	905	1060
Диаметр бедра	143	13	122	164
Поясничный диаметр	255	40	188	332

Таблица 2.2.2

Измеряемая величина	Размер мужского тела			
	средний	средне-квадратичное отклонение	наименьший (исключить 5% снизу)	наибольший (исключить 5% сверху)
1	2	3	4	5
Рост	1680	58	1585	1775
Зона вертикальной досягаемости	2110	84	2000	2280
Длина руки, вытянутой в сторону	723	33	670	777
Зона боковой досягаемости (от плечевой точки)	622	30	572	672
Длина ноги	900	43	830	971
Ширина колен	230	18	200	260
Ширина плеч	380	18	350	410
Длина плеча	327	17	300	355
Ширина расстановки ног	830	72	710	950
Высота глаз	1560	58	1465	1655
Высота плечевой точки	1370	55	1280	1460
Высота пальцевой точки	620	33	565	675
Длина руки	754	35	696	812
Высота верхнегрудинной точки	1360	52	1275	1445
Высота сосковой точки	1210	51	1125	1305
Высота линии талии	1035	47	955	1110
Длина руки, вытянутой вперёд	743	33	688	100
Наибольший сагитальный диаметр	300	-	-	-
Рост сидя II	1310	43	1240	1400
Высота глаз (сидя)	1180	43	1140	1250
Наибольший диаметр бедер	344	21	310	380
Рост сидя I	887	31	836	938
Высота сиденья	422	22	386	458
Высота глаз над сиденьем	770	30	720	820
Высота плеч над полом	1010	42	940	1080
Высота локтя над полом	654	33	600	710



Высота лопаток над полом	435	27	390	478
Высота локтя над сиденьем	232	25	190	273
Высота плеча над сиденьем	586	27	543	629
Высота колена	506	24	466	546
Длина предплечья и кисти	465	20	432	500
Длина бедра редуцированная	490	22	455	525
Длина бедра	590	27	540	633
Длина ноги	1040	18	960	1120
Диаметр бедра	135	12	115	155
Поясничный диаметр	230	28	184	276

Оптимальное поле зрения сидящего оператора охватывает пространство, простирающееся на  $60^\circ$  ниже уровня глаз и на  $30^\circ$  в любую сторону от средней плоскости тела. Данные антропометрии необходимо обработать с учетом конкретного типа аппаратуры. Радиоэлектронная аппаратура не требует большой точности в соразмерности; данные антропометрии для нее регламентируются не абсолютными величинами, а определенными диапазонами и требуют модульного выражения. При этом важно найти параметрические интервалы «безразличия», соответствующие антропометрическим важным размерам устройств и оборудования.

Необходимым и достаточным является учет минимальных и максимальных значений антропометрических данных статистически значимой выборки потребителей т.е. средних значений и дисперсий.

Важным этапом эргономического проектирования считается оптимизация взаимодействия оператора с радиоэлектронной аппаратурой при компоновке панелей и пультов управления. *Методика компоновки включает следующее:*

- анализ технического задания;
- составление схемы связей и алгоритма последовательности операций при работе оператора с панелью или пультом управления;
- формирование сенсорного поля (средств отображения информации), построения маршрутных карт обзора;
- формирование моторного поля (зоны управления), построение маршрутных карт рабочих движений;
- формирование зоны подсоединений и вариантов конструктивного исполнения;
- сравнение и оценка полученных вариантов панели, в частности, по критерию минимума спонтанной отвлекаемости оператора, возникающей при по-

падании в маршрут обзора или управления незадействованных индикаторов и органов управления.

Композиционные построения и гармонизация частей и целого в конструкции. Композиция (лат. *compositio* - составление, расположение, сочинение) - структура, взаимосвязь важнейших элементов произведения искусства или промышленного изделия, которыми определяется их смысл, выражается замысел. В основе композиции промышленного изделия лежит выбор элементов (или их группы) и их соподчиненности. В качестве элементов используют геометрические, светотеневые, или цветовые свойства формы изделия. Композиция характеризуется категориями, свойствами, средствами. Наиболее общими категориями композиции являются тектоника и объемно-пространственная структура изделия. Главные и второстепенные свойства и качества композиции весьма разнообразны. Их выбор будет определять главное, организующее начало композиции конкретного изделия. При этом кроме знания и учета объективных факторов формообразования изделия, необходимо знание общих закономерностей композиции и средства их выражения, общих подходов к отношениям объемов изделия и пространства. Рассмотрим основные категории композиции: тектонику, объемно - пространственную структуру и их взаимосвязь.

**Тектоника** - зримое отражение в форме изделия существа его конструкции и организации в нем материала. По существу именно в тектонике выражается связь формы и содержания изделия.

**Объемно-пространственная структура** – вторая важная категория композиции. Ею определяется взаимодействие, отношение формы (изделия) и пространства. Инженер о втором компоненте объемно-пространственной структуры - пространстве - часто не думает. Дизайнер же не может создать эстетически полноценного изделия без учета пространства. При разработке объемно-пространственной структуры изделия необходимо знать закономерности строения формы, которые облегчают понимание принципа развития форм. Это особенно важно при разработке сложных по объемно - пространственной структуре изделий, в которых должна быть органическая и упорядоченная связь между отдельными элементами. Поэтому при художественно - конструкторской проработке РЭА, в которой используется множество регуляторов и индикаторов, очень важной является группировка элементов в композиционные общности. Композиционные общности должны иметь функциональную внутреннюю связь, которая помогает человеку в работе с изделием и обладает определенной эстетической выразительностью. Между материалом конструкции, ее тектоникой и объемно - пространственной структурой существует взаимосвязь.

Тектоника изделия воспринимается через свойства материала конструкции. Поэтому нельзя пренебрегать свойствами материала, ибо правильное выражение свойств материала создает выразительную тектонику конструкции, а,

выразительная тектоника является основой выразительности отношения объемно-пространственной структуры. В свойствах и качествах композиции выделяются следующие показатели изделия: гармоническая целостность формы изделия, соподчиненность элементов, композиционное равновесие элементов, симметрия и асимметрия и их комбинации, динамичность и статичность, единство характера. Современные материалы позволяют создавать прочные и устойчивые конструкции самой необычной формы, которые зрительно представляются весьма неустойчивыми. Задача дизайнера и заключается в том, чтобы создавать придавать зрительную устойчивость изделию. Под симметрией (греч. *σῑμμετρία*- соразмерность) в эстетике понимают гармоничное расположение отдельных частей целого, соразмерность и соответствие между ними.

*Простейшие виды симметрии: зеркальная, центральная плоскостная и осевая* - широко известны, но в практике художественного конструирования используются редко. Многообразие элементов изделий (в том числе и радиоэлектроники) и правила работы человека с изделием практически не позволяют использовать строго симметричные структуры. Поэтому дизайнеру часто приходится иметь дело с частной асимметрией формы изделия, с асимметричными, но композиционно уравновешенными структурами. Одними из основных способов создания композиционного равновесия являются контраст и нюанс.

**Контраст** - противопоставление элементов структуры по форме, текстуре, цвету, а нюанс - тонкое и взаимосвязанное изменение в композиции.

Не случайно контрастные элементы РЭА в виде разнообразных ручек управления выполняют не черными, а серыми или коричневыми. При их большом количестве такие тона способствуют достижению целостности панели, облегчают психофизиологическую нагрузку оператора при длительной работе оператора с изделием. Если внешнее воздействие контраста резкое и сильное, то нюанс воспринимается гораздо слабее. Однако отсюда нельзя делать вывод о слабости воздействия нюансных отношений (особенно при длительной работе оператора с изделием) и о простоте нюансировки формы.

В отличие от контраста (который часто определяется функциональной компоновкой элементов изделия) нюанс слабо зависит от функциональной компоновки и объемно-пространственной структуры, являясь в основном сферой чисто художественного осмысливания формы и материала изделия. В этом - его богатейшие возможности и причина сложности реализации.

Метрический повтор и ритм определение закономерности повторения различных по контрасту элементов. Если шаг повторов постоянный (или зрительно кажущийся постоянным), то это - метрический повтор. Если шаг повторов постепенно меняется, то это - ритмика. Ритм - закономерное изменение порядка структуры элементов. Метрический повтор технологических стыков конструктивных модулей, элементов крепежа, органов управления и контроля, цветовых полей и других подобных структур - характерная особенность РЭА. Именно в РЭА наиболее полно проявляют себя различные виды размерно-

параметрических рядов, построенных на едином художественно-конструкторском модуле.

Исходя из того, что при мгновенном наблюдении человек способен воспринять от 3 до 8 характеристик различий, можно принять нижнюю границу метрического повтора примерно в 5-6 элементов. Поэтому на самых начальных этапах разработки РЭА необходима тщательная проработка метрических повторов, которые могут выступить в роли средства гармонизации изделия в целом. К средствам композиции относятся: определяющий композиционный прием, пропорции и масштаб, контраст и нюанс, метрический повтор. При разработке пластики объёмно-пространственной структуры изделия на этапе предварительной (форэскизной) проработки конструкции дизайнер стремится найти образ изделия с помощью прорисовки структуры, состоящей из набора простых геометрических элементов, отражающих тектонику изделия. При этом используется опыт, накопленный поколениями выдающихся художников - рисовальщиков.

Очень поучительны в этом смысле рисунки японского художника К. Хокусая. Он оставил большое художественное наследие. Наряду с огромным количеством блестящих композиционных работ известно много эскизов его жизненных наблюдений, опубликованных в пятнадцати сборниках под общим названием «Манга». Во времена Хокусая слово «манга» обычно означало произвольные наброски, смешанные картины. В «Манга» и других альбомах, картинах и книгах он ставил задачу создания образцов для учеников. В альбоме «Ускоренное руководство по рисованию» изложены принципы упрощения формы, которые тесно связаны и прекрасно передают движение.

Дух анализа пронизывает композиции и рисунки Хокусая. В основе всех форм, по его мнению, лежат геометрические фигуры. Аналитические разборы, помещенные в альбоме, не заслоняют поэтического восприятия природы, не нарушают гармоничности композиции листа в целом и никогда не покидавшего автора чувства пластики. В дизайне такой анализ формы позволяет обеспечить стилевое единство объёмно-пространственной структуры изделия (рис. 2.2.9).

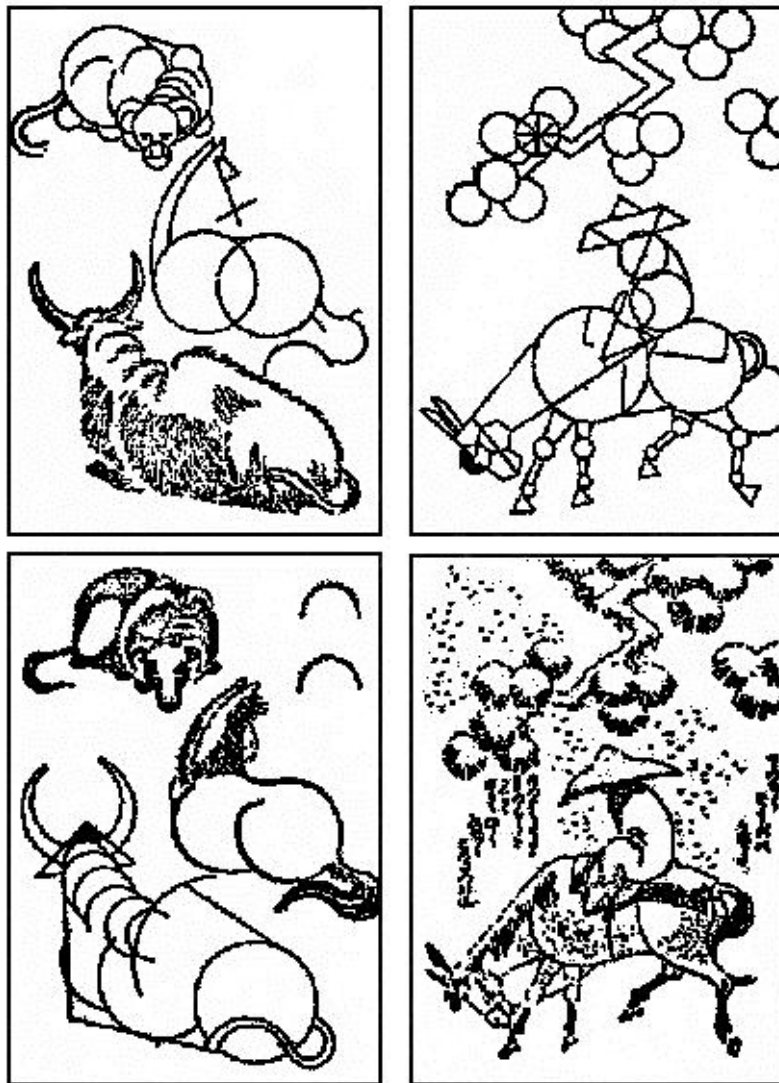


Рис. 2.2.9. Аналитические рисунки «манга» К. Хокусая

После того, как на стадии технического предложения или эскизного проекта определены основные элементы изделия и возможные варианты их компоновки, обеспечивающие заданные технические параметры, дизайнер должен выбрать определяющий композиционный прием, выявить идею композиции изделия, обеспечить единство формообразования как целой конструкции, так и ее частей вплоть до установочных изделий (клавиши, кнопки, индикаторы и т. п.). Зная вариации технической компоновочной схемы, дизайнер создает свои художественно-конструкторские варианты, определяет общую картину формообразования: радиусные лекальные или плоские рубленые формы образующих поверхностей, нюансное или контрастное решение формы, материала, стыки элементов формы и т. п. (рис. 2.2.10). Это позволяет в композиционном проекте воплотить единство средств композиции данного изделия или их группы.

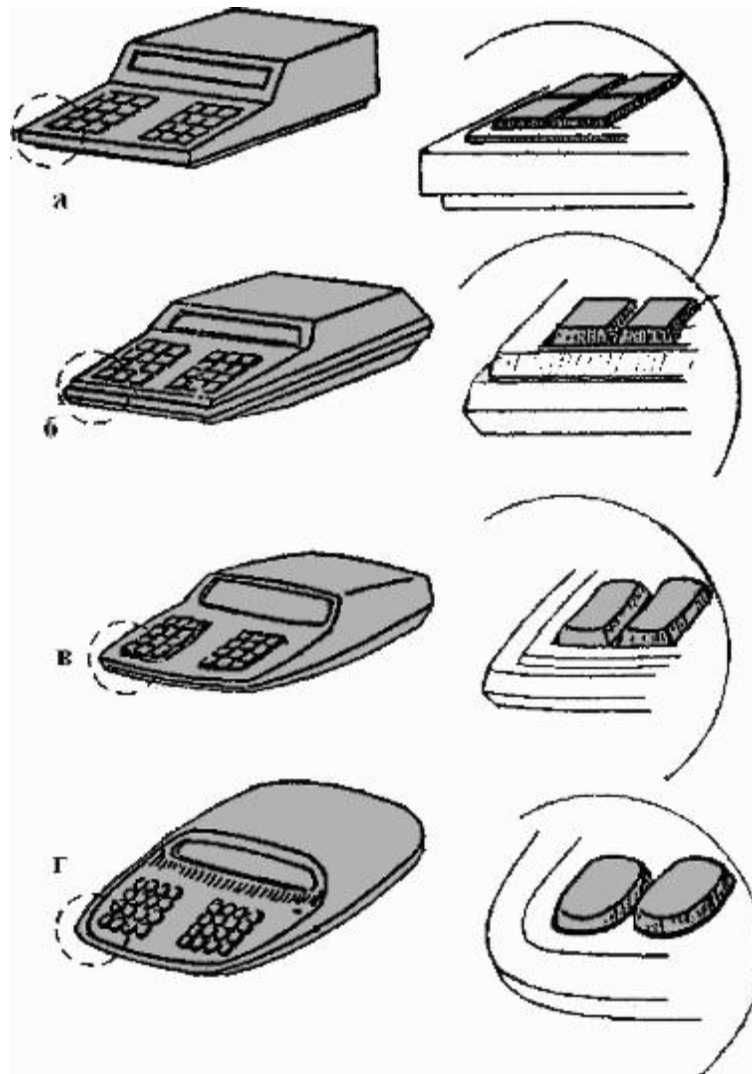


Рис. 2.2.10. Виды формообразования: *а* - плоскопараллельное; *б* – рубленое; *в* - лекальное; *г* - овальное или обтекаемое

Пропорции и масштаб - особые по важности средства композиции. Пропорции являются мощным средством гармонизации формы. Часто пытаются использовать канонические соотношения типа «золотое сечение». Однако практический опыт показывает, что дело не только и не сколько в канонических соотношениях, сколько в умении дизайнера гармонизировать сложную форму. Необходимо учитывать два очень важных фактора: 1) восприятие пропорций зависит от характера поверхности формы и ее рисунка, который может сильно изменить зрительное восприятие; 2) пропорционирование должно охватывать все элементы формы в единой системе взаимопроникающих пропорций, обязательно соотносенных с человеком. «Золотое сечение» относится к области пропорций, т. е. к связи частей целого друг с другом. Под многочисленными наименованиями «Золотого сечения» (числа), «гармонического деления», «божественной пропорции» подразумевается всем известное из школьного курса математики деление отрезка в среднем и крайнем отношениях:

$$\frac{a}{b} = \frac{b}{a+b}. \quad (2.2.1)$$

Т.е. меньший отрезок,  $a$  относится к большему  $b$  так же, как больший к их сумме.

Решив уравнение (2.2.1), найдем численное значение этой «божественной пропорции»:

$$X = \frac{a}{b} = \frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0,618 \quad (2.2.2)$$

Вот это-то значение ( $X=0,618$ ) занимало умы огромного числа теоретиков и практиков искусства в течение многих веков.

Отношению «золотого сечения» уделялось столь большое внимание потому, что объекты, пропорции которых ему отвечают, представлялись большинству людей гармоничными, прекрасными, естественными и т. д. , хотя в дизайнерской практике широко применяются и другие отношения при условии сохранения самоподобия частей и целого (рис. 2.2.13).

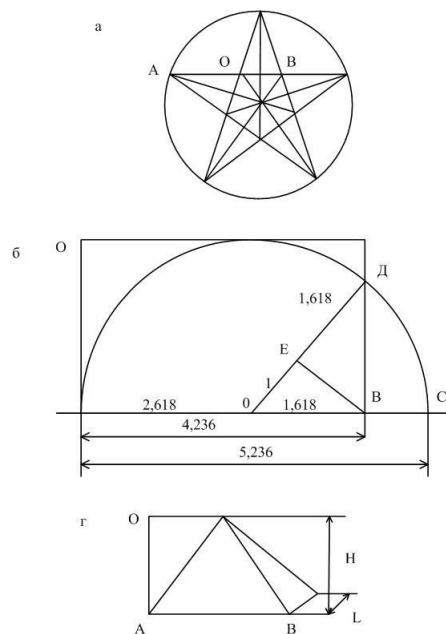


Рис. 2.2.12. Примеры построения «золотого сечения»:  $a$  - звездчатый пятиугольник - эмблема пифагорейцев;  $b$  - геометрическая интерпретация «золотого сечения»;  $c$  - пропорции пирамиды Микерина

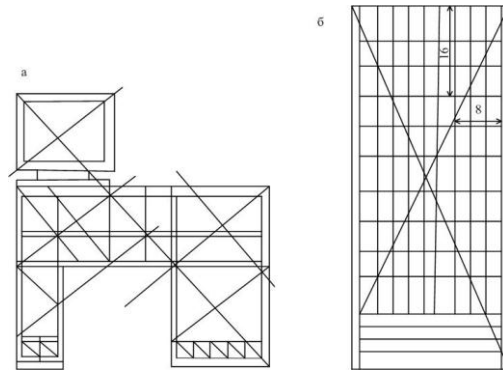


Рис. 2.2.13. Гармонизация формы конструкции РЭА: *а* - методом геометрического подобия; *б* - использованием принципа модульности

**Цвет в художественном конструировании РЭА.** Свыше 80% всей информации человек получает за счет зрения. Свет и цвет являются основными составляющими этого потока информации. Отсутствие цвета действует на человека удручающе. Так, в условиях крайнего севера не только холод, но и цветное однообразие угнетают человека. Цвет играет в нашей жизни не менее важную роль и как средство познания окружающего нас мира. Цвет служит очень простым и удобным показателем различных свойств предметов и материалов. Например, цвет минерала указывает на его состав, цвет - указатель температуры и т.д.

Наконец, цвет - очень удобное средство информации (сигнально-предупредительная окраска, цветовое кодирование и т.п.). Задачи, решаемые с помощью цвета, разнообразны, но их можно объединить в три основные группы: - цвет как средство информации, - цвет как фактор психофизиологического комфорта, - цвет как фактор эмоционально-эстетического воздействия. Для решения этих задач нужно рассмотреть три группы вопросов. К первой группе относятся вопросы физики цвета, в частности, вопросы обозначения и измерения цвета. Вторая группа - это вопросы восприятия цвета человеком. Сюда входят вопросы физиологии зрения и психологического восприятия цвета и света.

И, наконец, третья группа вопросов - эстетика цвета. Выбирая ту или иную цветовую схему изделия, проектировщик должен дать такое цветовое решение, которое было бы не только полезно с точки зрения физиологии зрения, но и вызвало бы у человека чувство эстетического удовлетворения. Все эти вопросы самым тесным образом взаимосвязаны, их в совокупности изучает цветоведение, с основами которого инженеру-конструктору необходимо познакомиться. В проектной практике и производственных условиях часто возникает необходимость обозначения цвета. *Существует три основных способа обозначения цвета:* словесное описание, сравнение данного цвета с эталонным рядом цветов, измерение параметров цвета. При словесном описании изучаемый цвет сравнивается с каким-либо известным в природе предметом или явлением. Но таким образом совершенно точно охарактеризовать цвет нельзя. И хотя глаз че-



ловека может с высокой степенью точности различать малейшие оттенки цвета, выразить такие незначительные различия чисто описательным путем невозможно. Все же данный способ задания цвета находит широкое применение. Его достоинства: простота и доступность. Возможности этого способа значительно расширяются и точность определения цвета повышается, если названия цветов регламентируются по какой-либо системе.

В некоторых отраслях производства (текстильном, лакокрасочном, полиграфическом и др.) требуются более точные способы задания цвета. Точным измерением цвета занимается колориметрия, позволяющая выражать любой цвет количественно, в виде системы чисел. Для измерения цвета используют расчетный метод, когда цвет измеряется с помощью приборов - фотоэлектрических колориметров, которые дают точное значение параметров цвета, либо визуальный метод, в котором цвет сравнивается с градуированным набором цветных эталонов (атлас цветов, картотека, шкала цветов, колерная книжка и т.п.).

Совпадение эталона и испытуемого образца дает возможность получить параметры цвета. Точность определения параметров цвета этим путем бывает для многих случаев вполне достаточна. Все наблюдаемые в природе цвета принято делить на две большие группы: ахроматические и хроматические цвета. Ахроматические цвета, условно называемые также «бесцветными» цветами, отличаются между собой только по светлоте или яркости (т.е. между ними существует чисто количественное различие). К ним относятся белый, серый, черный цвет. Яркость  $B$  характеризуется мощностью отраженного светового потока, идущего в сторону наблюдателя. Яркость поверхности пропорциональна ее освещенности  $E$ , т.е.

$$B=r*E ,$$

где коэффициент пропорциональности  $r$  характеризует отражательную способность поверхности и называется светлотой (коэффициентом отражения).

**Хроматические цвета** - все остальные цвета, кроме белого, серого и черного. Хроматические цвета различаются прежде всего по цветовому тону (по названию), который представляет собой основную количественную характеристику цвета. Цветовой тон зависит от характера излучения и определяется длиной волны  $\lambda$  в миллимикронах (мкм).

Известный из физики непрерывный спектр, полученный разложением белого солнечного света, состоит из семи основных цветов. Естественная последовательность расположения цветов соответствует цветам радуги (рис. 2.2.14).

Для каждого спектрального цвета можно подобрать другой цвет, который при оптическом смешении с первым в определенной пропорции дает белый цвет. Каждая пара таких цветов называется взаимодополнительными. Зеленый цвет не имеет в спектре дополнительного цвета, но последний может быть получен смешением красного цвета с фиолетовым, в результате чего получается

пурпурный цвет. Если расположить цвета видимого спектра в естественной последовательности по окружности и замкнуть спектр пурпурным цветом, то мы получим так называемый цветовой круг, в котором все взаимодополнительные цвета лежат на противоположных концах диаметра (рис. 2.2.15).

Хроматические цвета отличаются друг от друга не только по названию, но также по насыщенности и светлоте (яркости). Насыщенность выражает степень близости данного цвета к спектральному, измеряется в процентах и обозначается  $p$ . У чистого спектрального цвета  $p=100\%$ .

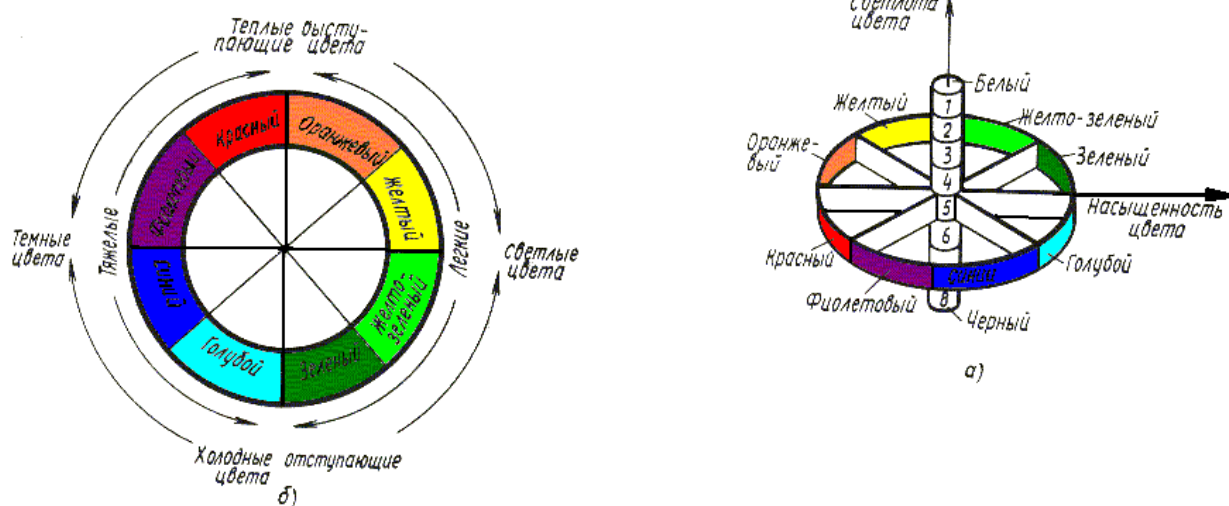


Рис. 2.2.14. Естественная последовательность расположения цветов

Итак, основными характеристиками цвета является цветовой тон ( $l$  мкм), насыщенность ( $p$  %), яркость или светлота ( $r$  %). Наличие трех независимых параметров, определяющих цвет, говорит о том, что все многообразие существующих цветов нельзя наглядно изобразить на плоской диаграмме подобно цветовому кругу, для этого необходимо трехмерное пространство. Существует много вариантов пространственных цветовых диаграмм (цветовых тел) - сфера, сдвоенный конус и др. (рис. 2.2.16).

Для выбора цветовых решений необходимо пользоваться такими параметрами, как цветовой тон, светлота, или степень ахроматичности и насыщенность. Они должны обеспечивать гармоничность цветовой композиции изделия в целом.

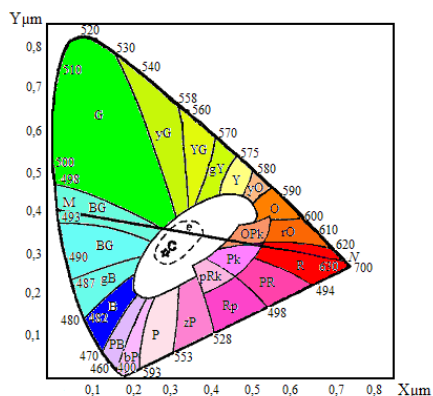


Рис.2.2.15. Цветовой график МКО

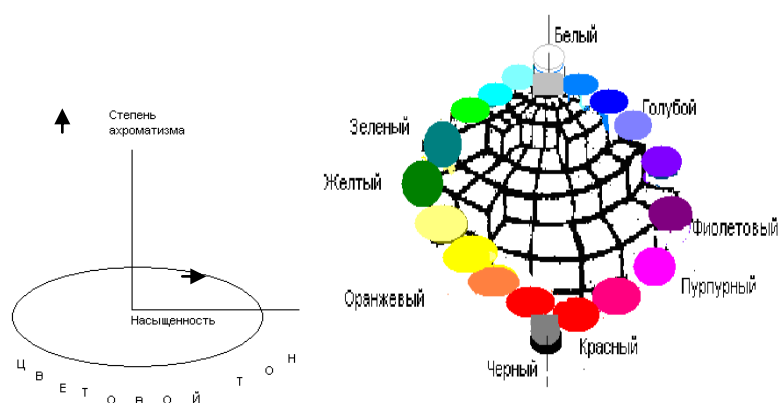


Рис.2.2.16. Трехмерная модель цвето-

вого тела

Несмотря на полноту отражения существующих цветов, модели цветочных тел неудобны для практики, так как внутренние их части малодоступны и сложны в изготовлении. На практике находят применение так называемые цветочные атласы. Благодаря простоте и удобству пользования они нашли широкое применение в промышленности.

### Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение компоновке РЭС, назовите принципы компоновки.
2. Что такое базовый принцип конструирования РЭС?
3. Какие работы выполняются при конструировании модулей первого уровня?
4. Дайте определение БКН.

5. Как разместить РЭС с минимальными потерями площади и объема?
6. Чем различаются системы стандартизации?
7. Какие особенности имеют технологии изготовления БНК из листовых материалов?
8. Какие алгоритмы компоновки вы знаете?
9. Как осуществляется эргономическое проектирование?
10. Что такое тектоника, объемно-пространственная структура?
11. Роль цвета в художественном конструировании РЭА.

### 3. Обеспечение передачи информации. Проектирование линии связи.

#### 3.1. Проектирование объемного монтажа

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 обуславливает 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. 3.1.1 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.



Рис. 3.1.1. Виды и конструктивные особенности линий передач

Для повышения производительности труда при сборке ЭА, упрощения электромонтажных работ ЛП объединяют конструктивно-технологически в узлы (рис. 3.1.2), 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.



Рис. 3.1.2. Конструктивно-технологическое объединение линий передач

Электрически короткой (далее короткой) называют ЛП, длина которой  $l_k$  для гармонического сигнала определяется по выражению

$$l_k \leq 0,1\lambda \leq c/(\sqrt{\varepsilon}f),$$

где  $\lambda, f$  — длина волны и частота сигнала;  $c$  — скорость света;  $\varepsilon$  — 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  $f = 0,4/t_\phi$ , где  $t_\phi$  — 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  $t_\phi$  и времени задержки прохождения сигнала по линии  $t_3$ . Если имеет место неравенство  $t_\phi/t_3 > 2$ , то ЛП электрически короткая, если же сохраняется соотношение  $t_\phi/t_3 < 2$ , 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. 3.1.3, а показаны модули 7 и 2, электрически соединяемые короткой ЛП. Модуль 7, 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.

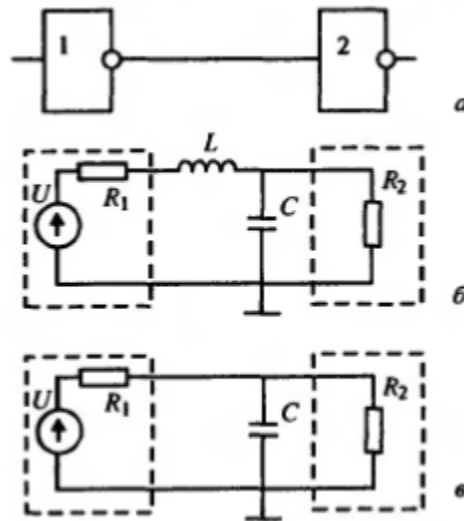


Рис. 3.1.3. Электрически короткая линия передачи (а), индуктивно-емкостная (б) и емкостная (в) расчетные схемы

Эквивалентную схему короткой линии (рис. 3.1.3, 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. 3.1.3), 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  $L \ll CR_1^2/2$ . В этом случае индуктивностью линии можно пренебречь и рассматривать ЛП в виде емкостной схемы замещения (рис. 3.1.3, 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

$$t_{\text{cp}} \geq \tau \left| \ln(1 - U_{\text{порог}} / U) \right|,$$

где  $\tau = R_1 C$  — постоянная времени;  $U_{\text{порог}}$  — пороговое напряжение логического элемента.

Если длительность импульса много больше  $\tau$ , 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. 3.1.4). 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. 3.1.4, а), при  $[CR_3 R_4 / (R_3 + R_4)] \leq t_{\text{д}} / 2,5$  можно представить в виде:

$$U_3 = C \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \frac{dU}{dt} + M \frac{R_3}{R_3 + R_4} \frac{dI}{dt};$$

$$U_4 = C \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \frac{dU}{dt} - M \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{dI}{dt};$$

где  $R_1, R_3 \in R_2, R_4$  — соответственно выходные и входные сопротивления модулей;  $C, M$  — емкость и взаимная индуктивность между ЛП.

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 7 моделируется генератором напряжения  $U$  с  $R_1 = 0$  ( $I = U / (R_1 + R_2)$ ). Принятые допущения правомерны для большинства практических случаев.

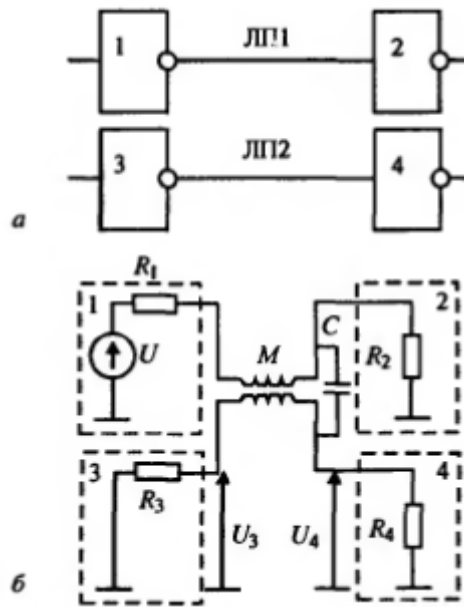


Рис. 3.1.4. Перекрестные помехи в коротких линиях передачи: *а* — электрическая схема; *б* — расчетная схема

На рис. 3.1.4 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:

$$U_3 \approx C \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \frac{\Delta U}{t_\phi} + M \frac{R_3}{R_3 + R_4} \frac{\Delta I}{t_\phi};$$

$$U_4 = C \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \frac{\Delta U}{t_\phi} - M \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{\Delta I}{t_\phi};$$

где  $\Delta U$ ,  $\Delta I$ ,  $t_\phi$  — 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  $\Delta I$ , 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. 3.1.5).

Статическая помехоустойчивость — максимальная амплитуда помехи для напряжения высокого  $U^1_{\text{пом}}$  и низкого  $U^0_{\text{пом}}$  уровней, определяется из уравнений:

$$U^1_{\text{ии}} = U^1 - U^1_{\text{ид}}, \quad U^0_{\text{ии}} = U^0 - U^0_{\text{ид}},$$

где  $U^1_{\text{ии}}$  и  $U^0_{\text{ии}}$  — пороговые входные напряжения для логических уровней 1 и 0, при которых происходит переход в область неопределенного состояния логической схемы;  $U^1$  и  $U^0$  — выходные напряжения логических уровней 1 и 0.

Точки А и В, а соответственно и напряжения  $U^1_{\text{ид}}, U^0_{\text{ид}} \in U^1, U^0$ , находятся на перегибах передаточной характеристики. Параметры статической помехоустойчивости микросхем приводятся в технических условиях.

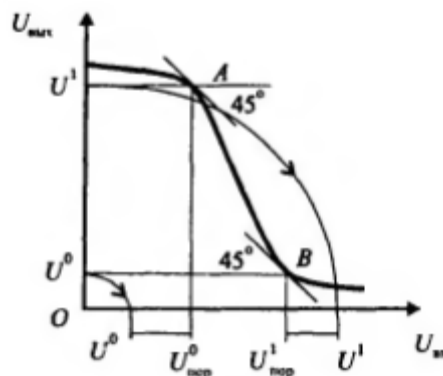


Рис. 3.1.5. Передаточная характеристика

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. 3.1.6), где  $R_{\text{п}}$ ,  $L_{\text{п}}$ ,  $C_{\text{п}}$  — 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  $Z_0$ . Приблизительно волновое сопротивление можно определить по выражению

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_{\text{п}}}{\tilde{N}_{\text{п}}}}$$

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, передающаяся 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  $U_{\text{п}}$  определяется выражением

$$\frac{U_0}{U_{\text{п}}} = \frac{R - Z_0}{R + Z_0} = \rho_0,$$

где  $\rho_0$  — 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  $\rho_{01}$  и выходе  $\rho_{02}$  линии соответственно будут  $0 > \rho_{01} > -1$  и  $0 < \rho_{02} < 1$ .

Искажение импульсного сигнала, когда длительность передаваемого импульса  $t_{\text{с}} \ll t_{\text{с}}$ , при прохождении его по ЛП показано на рис. 3.1.7. Сигналы на графиках соответствуют моментам их поступления на вход  $U_1$  и выход  $U_2$  ЛП. Следует обратить внимание на изменение полярности отражаемых сиг-

налов. Таким образом, на вход линии поступил один импульс, а на входе нагруженной на линию МС с периодом  $2t_3$  оказывается несколько импульсов, от которых МС может менять свое состояние до тех пор, пока очередной импульс не окажется меньше ее порога срабатывания.

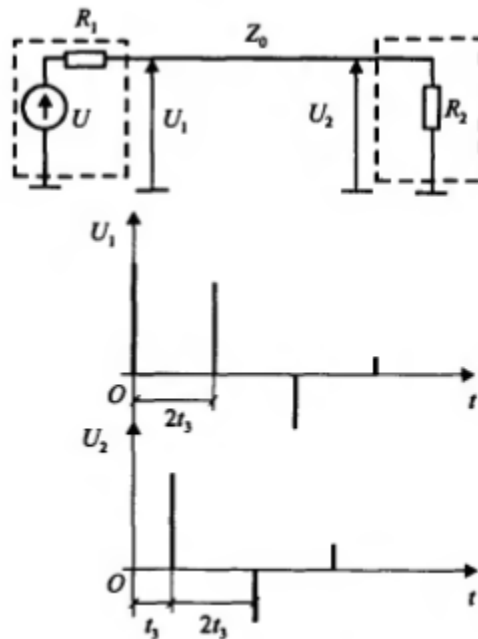


Рис. 3.1.7. Эквивалентная схема линии передачи и сигналы на входе и выходе линии при многократных отражениях

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. 3.1.8). Согласование ЛП обеспечивается использованием ЛП с высокой стабильностью волнового сопротивления и введением согласующих элементов.

Подключение согласующего резистора  $R_c$  последовательно (рис. 3.1.8, а) с выходным сопротивлением передатчика сигнала (последовательное согласование) используется, если выходное сопротивление его много меньше  $Z_0$  линии. В параллельно согласованной линии (рис. 3.1.8, б) резистор  $R_c$  подключают к входу приемника линии передачи.

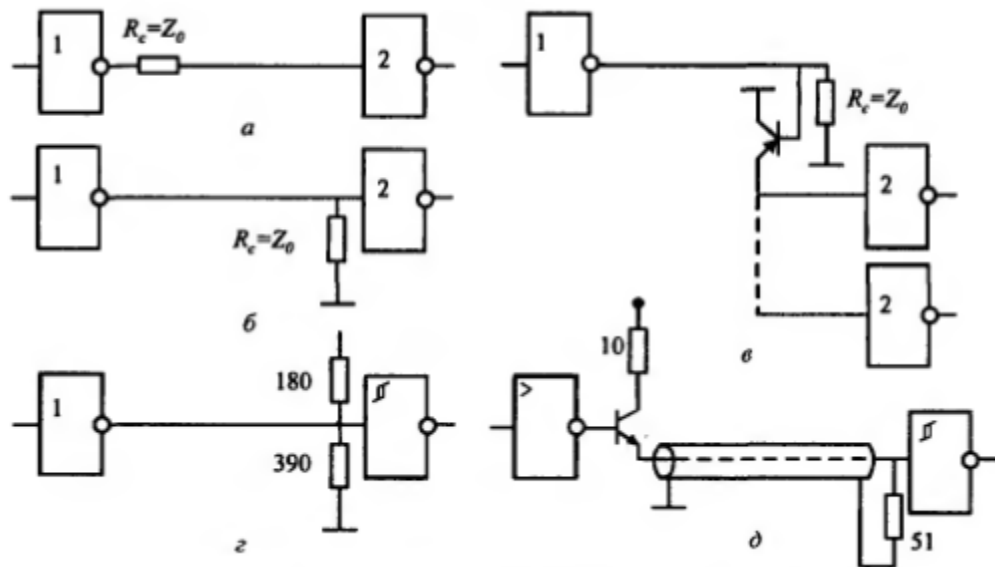


Рис. 3.1.8. Способы согласования электрически длинных линий передач

Способ согласования 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 большем количестве нагрузок для согласования используют эмиттерные повторители (см. рис. 3.1.8, 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 (рис. 3.1.8, г, д). В схеме согласования коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом (рис. 3.1.8, 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. 3.1.9) низкоомным согласующим резистором  $R_c = Z_0$  передающий элемент линии должен формировать значительный выходной ток, который обеспечивается только работающими на линию формировавателями. Для восстановления фронтов импульсов в качестве приемного элемента используют триггер Шмитта. Восприимчивость к внешним помехам является недостатком схемы, приведенной на рис. 3.1.9, а. При

формировании разнополярного сигнала на обоих проводах свитой пары (рис. 3.1.9, 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.

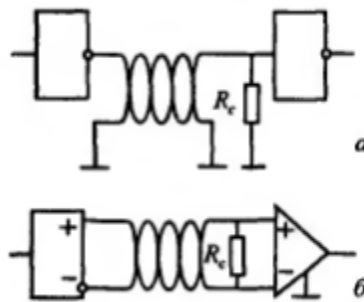


Рис. 3.1.9. Согласование свитой пары несимметричным (а) и симметричным (б) способом

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. 3.1.10 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 не устраняет емкостную связь между центральными проводами. Заземление экранов приводит к разрыву паразитной емкостной связи.

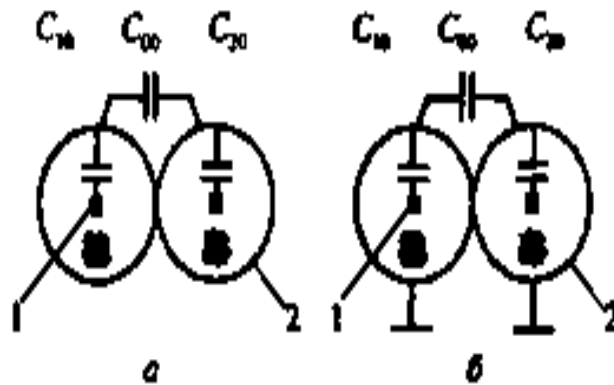


Рис. 3.1.10. Электрическое экранирование линий передач:

1 — центральный провод; 2 — оплетка (экран);  $C_{10}$ ,  $C_{20}$  — емкость провод—экран первой и второй линий передач;  $C_{00}$  — емкость между оплетками (экранами)

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.

Проектирование объемного монтажа. 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 вибраций. 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<sup>2</sup>. 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. 3.1.1.

Таблица 3.1.1

Допустимые токи нагрузки медных монтажных проводов

Электрический параметр	Диаметр, мм									
	0,25	0,3 5	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	1,8	2,5
Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	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  $\rho$  — удельное сопротивление материала провода (табл. 3.1.2), Ом • мм<sup>2</sup>/м;  $d$  — диаметр провода, мм;  $l$  — длина провода, м;  $s$  — сечение провода, мм<sup>2</sup>;  $j$  — плотность тока, А/мм<sup>2</sup>;  $I$  — ток, А;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления материала провода (см. табл. 3.1.2);  $\Delta t$  — перегрев провода, °С;  $U$  — напряжение, В.

Таблица 3.1.2

Удельное сопротивление и температурные коэффициенты сопротивления металлов проводов

Металл	Удельное сопротивление, Ом*мм <sup>2</sup> /м	Температурный коэффициент материала провода, °С <sup>-1</sup>
Бронза	0,008	0,004
Латунь	0,03...0,006	0,002...0,007
Медь	0,0175	0,004
Алюминий	0,028	0,004

В табл. 3.1.3 приведены наиболее широко используемые в ЭВМ марки монтажных проводов с указанием областей применения.

Таблица 3.1.3

## Марки монтажных проводов

Провод монтажный	Марка	Рабочая температура, °С	Область применения
С волокнистой и поливиниловой изоляцией	МШВ	-60...+70	Фиксированный внутри - и межприборный монтаж устройств, эксплуатируемых в полевых условиях
	МГШВ		
	МГШВЭ		
С полихлорвиниловой изоляцией	МГВ; МГВЭ;	-60...+70	Фиксированный монтаж слаботочной аппаратуры
	МГВЛ; ПМВ		
	ПМОВ		
	ПМВГ		
С лавсановой изоляцией, теплостойкий	МГТЛ	-60...+150	Фиксированный и гибкий внутриприборный монтаж
	МГТЛЭ		
Малых сечений	МГТФ	-60...+70	Монтаж слаботочной аппаратуры
	МГТСФ		
	МГТФЭ		
С полиэтиленовой	ПМП	-60...+220	Внутри- и межпри-

изоляция повышенной теплостойкости	ПМПЭ		борный монтаж
	ПМПЛ		

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. 3.1.4. 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  $\varepsilon$  по приближенной формуле

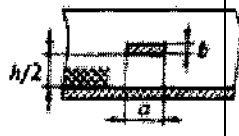

$$\varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2,$$

где  $\varepsilon_1$   $\varepsilon_2$  — относительная диэлектрическая проницаемость сред, на границе которых располагается проводник.

Таблица 3.1.4

Электрические параметры печатных проводников

Эскиз	Волновое сопротивление, Ом	Емкость, пФ/м	Индуктивность, мкГн/м
-------	----------------------------	---------------	-----------------------

 	$\frac{377}{\sqrt{\epsilon \left[ 1 + \frac{2h}{\pi a} \left( 1 + \ln \left( \frac{\pi a}{h} \right) \right) \right]}}$ $\frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \left( \frac{5,7h}{a+b} \right)$	$\frac{4,3\epsilon}{\lg \left( \frac{5,7h}{a+b} \right)}$ $\frac{10,4\epsilon}{\lg \left( \frac{8h}{a} \right)}$	$1,25 \frac{h}{a}$ $1,06 \lg \left( \frac{2,54h}{a} \right)$
--	--	---	---

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 обуславливается действием магнитного поля контуров связи соседних проводов, а также активных компонентов, создающих магнитные поля. На рис. 3.1.11, 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

$$U = -10^{-8} S dB / dt,$$

где  $B$  — магнитная индукция, Тл;  $S$  — площадь контура связи, см<sup>2</sup>.

Уменьшение паразитной связи возможно сокращением площади контура путем укладки провода непосредственно по поверхности земли (рис. 3.1.11, б), использованием симметричной двухпроводной ЛП (рис. 3.1.11, 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.

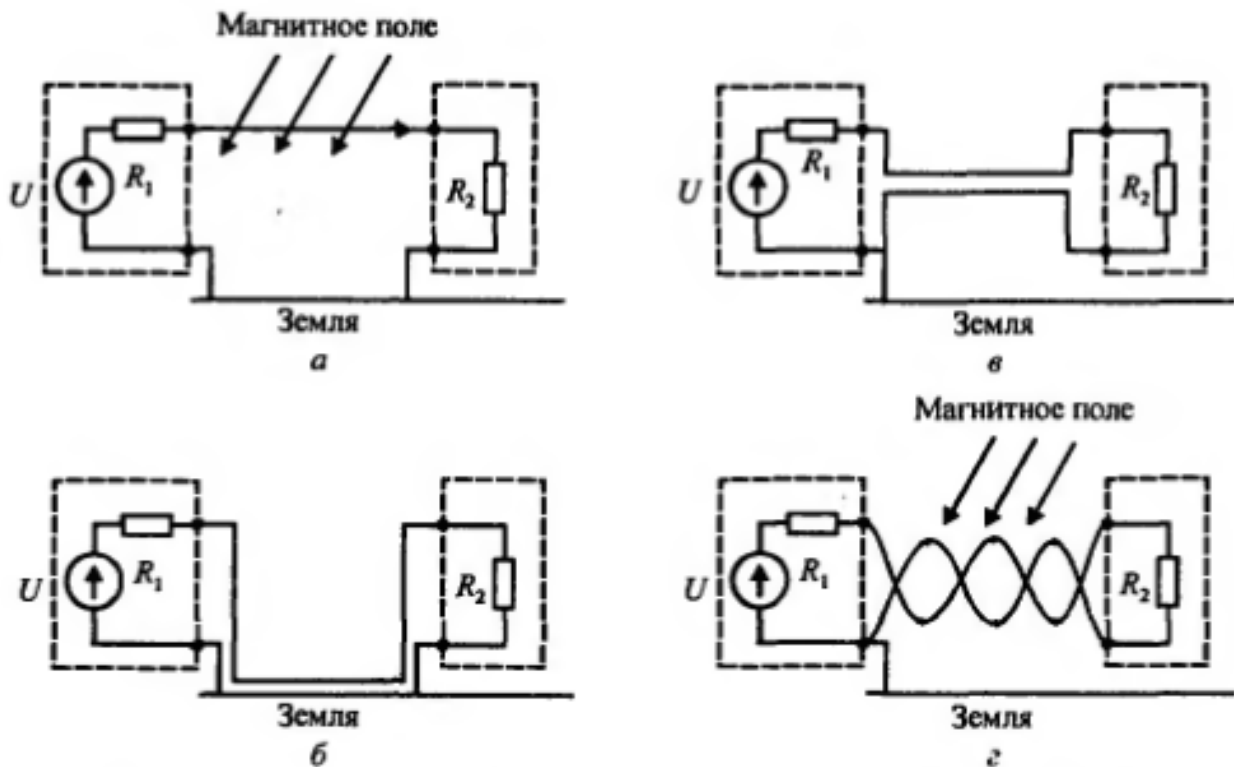


Рис. 3.1.11. Способы выполнения электрических соединений несимметричной (а, б) и симметричной (в, г) линиями передач

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. 3.1.11, 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

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{(\varepsilon_a + \varepsilon_e)/2}} \lg(d_e/d),$$

где  $\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_n$  — относительная диэлектрическая проницаемость воздуха и изоляции проводов;  $d_n$ ,  $d$  — 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 (рис. 3.1.8, 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 с порядковым номером разработки 11.

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 обуславливает 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  $0,25X$ , где  $X$  — 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. 3.1.5 приведены основные марки коаксиальных кабелей, применяемых в ЭВМ, с указанием основных областей их применения.

Таблица 3.1.5

## 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 термостойкие малогабаритные	РКТ-72 РКТ-73	-60...+125	Внутриблочный монтаж

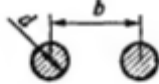
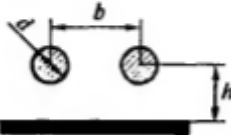
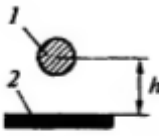
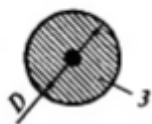
Наличие оплетки коаксиального кабеля приводит к резкому возрастанию емкости прямого проводника на экран, что обязательно должно учитываться на этапе проектирования схем. Коаксиальные кабели имеют значительные габариты, сложны в монтаже и рекомендуются к использованию для внутри и межмодульной коммутации. Коаксиальные кабели должны быть согласованы с входными или выходными сопротивлениями коммутируемых элементов.

Электрические параметры объемного монтажа. Аналитические зависимости для оценки электрических параметров некоторых вариантов объемного монтажа представлены в табл. 3.1.6. 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 3.1.6

## Электрические параметры вариантов объемного монтажа

Эскиз	Волновое сопротивление, Ом	Емкость, пФ/м	Индуктивность, мкГн/м

	$\frac{276}{\sqrt{\epsilon}} \lg(2b/d)$	$28\epsilon / \lg(2b/d)$	$0,92 \lg(2b/d)$
	$\frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg\left(\frac{4h}{d} \sqrt{1 + \frac{4h^2}{b^2}}\right)$	$24,3\epsilon \frac{\lg k}{\lg^2 \frac{4h}{d} \lg^2 k}$ ; $k = \sqrt{b^2 + 4h^2} / b$	$\frac{0,46k}{k = \sqrt{b^2 + 4h^2} / b}$
	$\frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg(4h/d)$	$24,1\epsilon / \lg(4h/d)$	$0,46 \lg(4h/d)$
	$\frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg(D/d)$	$24,1\epsilon / \lg(D/d)$	$0,46 \lg(D/d)$

Примечание. 1 — провод; 2 — земля; 5 — оплетка коаксиального кабеля;  $\epsilon$  — 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. 3.1.7). Сравнение типов разволок 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.

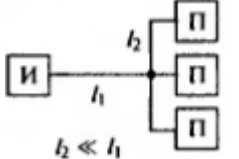
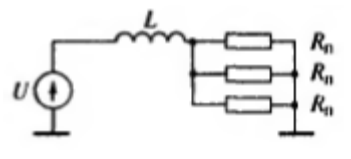
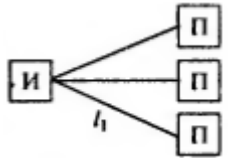
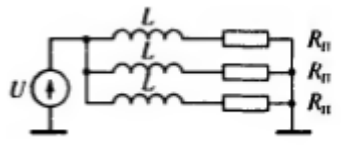
При параллельной разводке имеет место наилучшая развязка цепей. Отказ одного проводника или контакта скажется на работоспособности только одного приемника П. Однако суммарная длина проводников монтажа увеличится. Наличие параллельных цепей связи ведет к перекрестным помехам.

Таблица 3.1.7

## Виды разводки линий связи

Тип разводки	Функциональная схема	Эквивалентная схема	схе-	Время за-
				держки



Последовательная			Около $3L/R_n$
Параллельная			Около $L/R_n$

В табл. 3.1.7 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  $l_2 \ll l_1$ , 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  $R_n$ . Последовательная разводка увеличивает задержку сигнала в 3 раза по сравнению с параллельной разводкой (на данном примере).

### 3.2. Проектирование печатного монтажа

Задачи конструкторского проектирования печатных плат. Процесс конструирования печатных плат (ПП) основан на двух различных подходах; первый предусматривает разработку конструкторских требований высшего порядка к уровням низшего порядка; второй - разработку «снизу вверх». В первом случае исходные данные задаются частным ТЗ, вытекающим из общего ТЗ. Во втором случае исходные данные могут носить общий характер, а конкретные пункты ТЗ: показатели качества, ограничения и условия – определяет сам разработчик ПП.

Задача разработки состоит в создании конструкции ПП, наилучшим образом отвечающей поставленным требованиям при выбранных показателях качества и принятых ограничениях и условиях.

*Разработка конструкции любого радиоэлектронного устройства с применением ПП включает следующие этапы:*

- > изучение технического задания на изделие (печатный узел, блок), в состав которого входит конструируемая плата;
- > анализ и компоновка ПП;
- > компоновка навесных элементов и проводящего рисунка ПП;
- > конструктивно технологический расчет ПП;
- > разработка конструкторской документации (деталировка, сборочный чертеж, слои ПП и др.).

Только комплексное решение этих этапов обеспечивает оптимальный вариант конструкции ПП. Базовые конструкции позволяют получить существенный экономический эффект за счет упрощения процесса конструирования, уменьшения номенклатуры оснастки и инструмента, уменьшения объемов конструкторской документации, упрощения аппаратуры контроля и диагностики.

При создании базовых конструкций ПП в качестве объектов унификации используют: габаритные размеры, тип и размещение отверстий; размеры и форму элементов проводящего рисунка; конструктивные покрытия.

Методические указания по выполнению анализа ТЗ и ЭЗ даны в лабораторной работе «Конструкторский анализ технического задания и схемы электрической принципиальной».

Анализ и выбор типа печатной платы. При разбиении устройства на составные части основным критерием является принцип функциональной законченности. Это обеспечивает минимальное количество внешних соединений, уменьшает интенсивность отказов за счет уменьшения количества межъячеечных контактов, улучшает массогабаритные и технические показатели. На одной плате может располагаться одна или несколько функционально законченных схем. Чем больше интегральных микросхем на ПП, тем меньше внешних соединений.

По конструкции ПП с жестким или гибким основанием делится на типы: односторонние, двусторонние и многослойные. Разновидности типов представлены на рис.3.2.1.



Рис. 3.2.1. Разновидности типов ПП

При выборе типа ПП для разрабатываемой конструкции изделия следует учитывать технико-экономические показатели. Ориентировочное изменение трудоемкости изготовления ПП в крупносерийном производстве в зависимости от ее типа и класса точности приведено на рис.3.2.2 и рис.3.2.3.

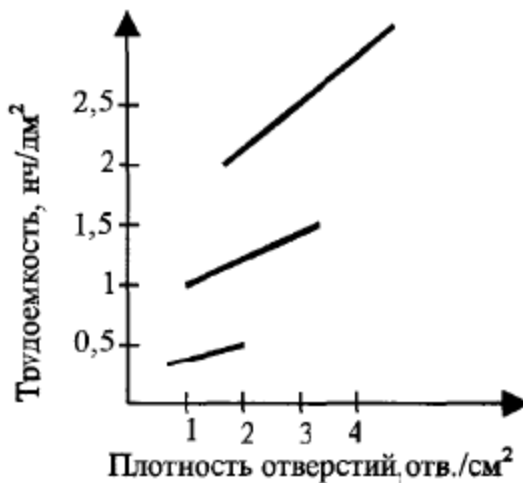


Рис. 3.2.2. Зависимости трудоемкости изготовления ПП от её типа

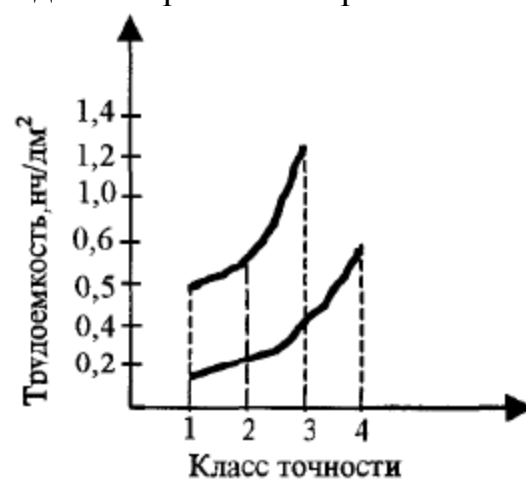


Рис. 3.2.3. Зависимости трудоемкости изготовления ПП от класса точности

*Односторонние печатные платы (ОПП) характеризуются:*

- возможностью обеспечить повышенные требования к точности выполнения проводящего рисунка; установкой навесных элементов на поверхность платы со стороны, противоположной стороне пайки, без дополнительной изоляции;
- возможностью использования перемычек из проводящего материала, низкой стоимости конструкции. Поперечный размер конструкции приведен на рис.3.2.4.

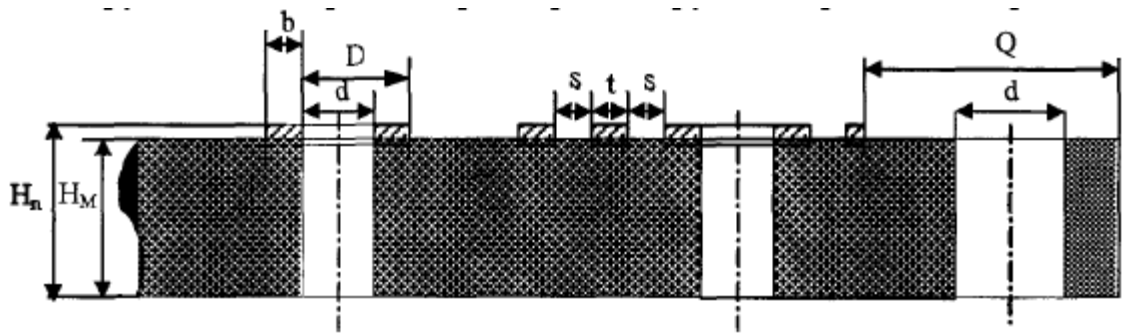


Рис.3.2.4. Поперечный размер конструкции

Двусторонние печатные платы (ДПП) без металлизированных контактных и переходных отверстий характеризуются: возможностью обеспечить высокие требования к точности выполнения рисунка; высокими коммутационными свойствами; использованием объемных металлических элементов проводящего рисунка расположенных на противоположных сторонах платы; низкой стоимостью конструкции. Поперечный разрез конструкции приведен на рис. 3.2.5.

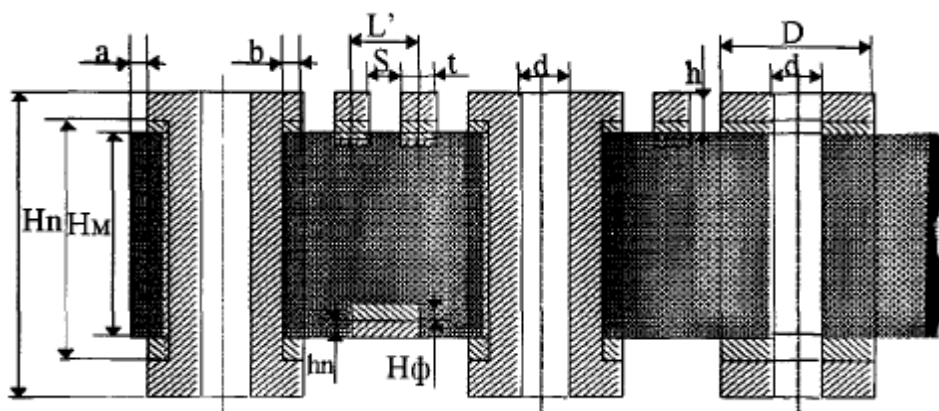


Рис.3.2.5. Поперечный разрез конструкции

*Многослойные печатные платы (МПП) с металлизацией сквозных отверстий характеризуются:*

- высокими коммутационными свойствами;
- наличием межслойных соединений, осуществляемых с помощью сквозных металлических отверстий, соединяющих только внутренние прово-

дящие слои попарно, обязательным наличием монтажной площадки на любом проводящем слое, имеющем электрическое соединение с переходными отверстиями;

- предпочтительным выполнением проводящего рисунка наружных слоев по первому или второму классу точности или наличием на наружном слое только контактных площадок сквозных металлизированных отверстий;

- предпочтительным применением элементной базы со штыревыми выводами; высокой стоимостью конструкции. МПП, изготовленные методом металлизации сквозных отверстий, являются предпочтительными для крупносерийного производства.

МПП по парного прессования характеризуются: наличием межслойных соединений, осуществляемых с помощью металлизированных отверстий, соединяющих проводящие слои попарно; оптимальной четырехслойной конструкцией; предпочтительным применением элементной базы с планарными выводами; относительно высокой стоимостью конструкции.

МПП послойного наращивания характеризуются: наличием межслойных соединений, осуществляемых с помощью гальванически выращенных медных столбиков диаметром не менее 0,8 мм; обязательным наличием контактных площадок на всех проводящих слоях в местах прохождения гальванических столбиков: высокой трудоемкостью изготовления; очень высокой стоимостью конструкции.

МПП с открытыми контактными площадками характеризуются: отсутствием межслойных соединений, использованием элементной базы как с планарными, так и со штыревыми выводами, расположением проводников, принадлежащих одной цепи, на одном проводящем слое; обязательным наличием контактных площадок на все выводы навесных элементов независимо от того, задействованы они или нет; наличием расстояния между краем проводника и окном или краем ПП величиной не менее 0,5 мм.

В курсовом и дипломном проекте рекомендуется использование ДПП с учетом следующего.

*Выбор типа плат зависит от требований к быстродействию конструируемой РЭА, серийности, сроков проектирования и изготовления. МПП, сохраняя свойства обычных ПП, имеют свои особенности, способствующие все более широкому их применению при миниатюризации электронных устройств:*

- > более высокая плотность монтажа;
- > размещение монтажа в однородной зоне диэлектрической среды, отсюда более высокая устойчивость внутренних слоев к климатическим и механическим воздействиям;
- > размещение внутри МПП экранирующих «земляных» слоев значительно улучшает электрические характеристики устройства, а также имеется возможность использования этих слоев в качестве теплоотвода;

> применение МПП позволяет значительно сократить длину соединений между навесными элементами, что имеет важное значение, особенно при работе на высоких частотах;

> однако, принимая решение использовать многослойный печатный монтаж, необходимо учитывать, что МПП обладают низкой ремонтпригодностью наряду с высокой стоимостью, сложностью разработки, а их производство влечет за собой ряд технологических сложностей;

> более жесткие допуски на параметры печатного монтажа по сравнению с обычными платами;

> необходимость применения специального прецизионного технологического оборудования;

> длительный и сложный технологический цикл изготовления;

> обязательность тщательного контроля всех операций.

Определение площади печатной платы. Ориентировочная площадь ПП определяется по формуле:

$$S = \frac{1}{K_s} \sum_{i=1}^n S_{iycm},$$

где  $K_s$  - коэффициент заполнения ПП ЭРЭ, определяемый в зависимости от класса РЭА в пределах 0,4...0,85;  $S_{iycm}$  - установочная площадь ЭРЭ (справочные данные).

Выбор габаритных размеров и конфигурации печатной платы. Габаритные размеры ПП должны соответствовать ГОСТ 10317 — 79\* при максимальном соотношении сторон 5:1. Рекомендуется разрабатывать ПП простой прямоугольной формы. Конфигурацию, отличную от прямоугольной, следует применять только в технически обоснованных случаях. Типоразмеры ПП могут быть ограничены типовыми несущими конструкциями высших структурных уровней (блок, аппарат, стойка). В практической деятельности нужно руководствоваться выбранным вариантом компоновки устройства в целом, а при выборе габаритных размеров следует руководствоваться линейными размерами, установленными ГОСТ 10317 — 79\*.

*Максимальный размер наибольшей стороны ПП равен 470 мм. Для РЭА специального назначения один размер платы фиксирован и равен 170 мм, а второй изменяется следующим образом:*

> для самолетной и морской — 75 мм, 120 мм;

> для стационарной и возимой — 75 мм, 120 мм, 240 мм;

> для ЭВМ серии ЕС и специализированных систем управления применяется единый размер ПП 150 X 140 мм.

Сопрягаемые размеры контура ПП должны иметь предельные отклонения по 12-му качеству ГОСТ 25347 — 82 (СТ СЭВ 144 — 75). Несопрягаемые разделы контура ПП должны иметь по 14-му качеству ГОСТ 25347 — 82.

Толщина определяется толщиной исходного материала и выбирается в зависимости от используемой элементной базы и действующих механических нагрузок. Предпочтительными значениями номинальных толщин одно- и двусторонних ПП являются 0,8; 1,0; 1,5; 2,0 мм. Допуск на толщину ПП устанавливают по соответствующим стандартам или ТУ на исходный материал (ГОСТ 23751 — 86).

Оценка размеров ПП по критерию вибропрочности. Оптимизация конструктивных параметров ПП по критерию вибропрочности - это обеспечение минимальных нагрузок для навесных элементов и материалов ПП при внешних механических воздействиях. Нагрузки на ПП от внешних механических воздействий определяются коэффициентом передачи вибраций, который есть отношение амплитуд колебаний на выходе и входе системы при фиксированной частоте. Для ПП входом системы являются края платы, закрепленные в рамки ячейки. Выходом колебательной системы является область, наиболее удаленная от краев платы, то есть центр платы. Коэффициент передачи обратно пропорционален жесткости пластины:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu)},$$

где  $D$  – жесткость ПП, Н/м;

$E$  – модуль упругости материала. Па;

$h$  – толщина ПП, м;

$M$  – коэффициент Пуассона. Некоторые значения  $E$  и  $M$  приведены в табл. 3.2.1.

Таблица 3.2.1

Материал	Значение модуля упругости, $E$ , ГПа	Коэффициент Пуассона, $M$
Стеклотекстолит	24...35	0,2
Гетинакс	10...18	0,47
Алюминиевые сплавы, АМГ	65...70	0,32...0,36
Сталь низкоуглеродистая	200	0,4

Резонансная частота пластины, закрепленной по контуру, определяется выражением (при распределенной нагрузке)

$$f_0 = \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{m} q},$$

где  $a, b$  - соответственно длина и ширина ПП, м;  $m$  - масса платы с навесными элементами, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, равное  $9,8 \text{ м/с}^2$ .

Рекомендуется, чтобы резонансная частота ПП  $f_0$  отличалась от частоты внешних колебаний  $f_a$ , по крайней мере, вдвое:  $f_0 \geq 2f_b$ .

При наличии высоких частот внешней вибрации, а также полигармонической вибрации избавиться от резонанса сложно — тут нужно искать компромиссное решение.

**Выбор или обоснования класса точности.** По точности выполнения элементов конструкции ПП делится на пять классов точности. Номинальные значения основных параметров элементов конструкции ПП для узкого места приведены в табл.3.2.2.

Под элементами конструкции ПП подразумеваются элементы проводящего рисунка.

Таблица 3.2.2

Условное обозначение	Класс точности				
	1	2	3	4	5
$T$	0,75	0,45	0,25	0,1 5	0,10
$S$	0,75	0,45	0,25	0,1 5	0,10
$B$	0,30	0,20	0,10	0,0 5	0,02 5
$J$	0,40	0,40	0,33	0,2 5	0,20

Примечание:  $j$  – отношение диаметра металлизированного отверстия к толщине платы.

Печатные платы первого и второго классов точности наиболее просты в исполнении, надежны в эксплуатации и имеют минимальную стоимость. ПП третьего, четвертого и пятого классов точности требуют использования высококачественных материалов, инструмента и оборудования, ограничения габаритных размеров, а в отдельных случаях и особых условий при изготовлении.

Выбранный класс точности необходимо проверить на электрические параметры. Предельные рабочие напряжения между проводниками, лежащими в одной плоскости, приведены в табл. 3.2.3.

Таблица 3.2.3

Расстояние меж-	Значение рабочего напряжения
-----------------	------------------------------



ду проводниками	фольгированный гетинакс (ГФ)	фольгированный Стеклотекстолит
0,1...0,2 0,2...0,3	75-150	25-50
0,3...0,4 0,4...0,5	250	100-200
0,5...0,75	350	350-500
0,75...1,5 1,5...2,5	500	650

Выбор материала печатной платы. Материал для ПП выбирают по ГОСТ 23751 — 86 или ТУ. Материалы, рекомендуемые для изготовления ПП, приведены в табл. 3.2.4. Основные параметры наиболее употребительных материалов сведены в табл. 3.2.5.

Таблица 3.2.4

Марка материала	Толщина фольги, мкм	Толщина материала с фольгой, мм	Область применения
ГФ1—35, ГФ2—35	35	1,5; 2,0; 2,5; 3,0 1; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0;	Одно-, двусторонние платы без гальванического соединения печатного слоя
СФ—1—35, СФ—2—35	35	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	Одно-, двусторонние платы с гальваническим соединением слоев
СФ—1—50, СФ—2—50	50	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0;	То же
СФ-1Н-50, СФ-2Н-50	50	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0,	То же
СФПН-1-50	50	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0;	Одно-, двусторонние
ФТС-1	20 35	0,8; 0,15; 0,18; 0,27;	платы с повышенной нагревостойкостью МПП и гибкие ПП
ФТС-2			
ФДМ-1, ФДМ-2	35	0,25; 0,35	Гибкие ПП
СТФ-1-2ЛК	—	1,0; 1,5	Одно-, двусторонние
СТП-3, СТП-0,25	—	0,025; 0,06	Прокладки для МПП

Таблица 3.2.5

Параметр	Материал основания ПП		
	ГФ	СФ	ФДМЭ
Предел прочности при растяжении, кг/см <sup>2</sup> не более	80	200	—
Предельно допустимое напряжение на изгиб, кгс/см <sup>2</sup>	800...1400	2300	—
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,3...1,4	1,6...1,85	—

Водопоглощаемость. %, не более	5	3	—
Удельное электрическое объемное сопротивление,	$10^9$	$10^{12}$	$10^9$
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 1 МГц	0,038...0,045	0,025	0,025
Относительная диэлек- трическая проницаемость	7	6	5
Прочность сцепления печат- ных проводников с основани- ем платы при отрыве, Н/мм <sup>2</sup> ,	1...2	2...3,5	2,5...4,0
Пробивное напряжение в направлении. перпендикулярном к поверхности платы, кВ/мм, не	20	25	25
Рабочие температуры. °С	-60...+85	- 60...+12	-60...+100

В бытовой РЭА обычно рекомендуется применять одно - или двусторонний ГФ. Для профессиональной РЭА рекомендуется использовать для жестких плат СФ различных марок, а для гибких ПП специальные фольгированные тонкие диэлектрики и полиамидные пленки.

*Выбор вида внешнего соединения печатных плат. На выбор вида внешнего соединения (разъемного или неразъемного) влияет ряд факторов:*

- > выбранный предварительный вариант компоновки (масса, габариты);
- > ремонтпригодность (принятая система ремонта и замены);
- > надежность внешних цепей.

Разъемные соединения обладают следующими особенностями:

- > масса и габариты соединения могут увеличиваться на 10...20% по сравнению с неразъемными;
- > несколько падает надежность меж соединений (отношение интенсивностей отказов разъемного и неразъемного контакта составляет около 1...4);
- > уменьшается на 15...25% трудоемкость изготовления меж ячейной коммутации.

В то же время использование гибких печатных плат на полиамиде позволяет изготавливать непрерывные ПП, сложенные в рулон, книжку без промежуточного переходного монтажа.

В разъемных конструкциях используются соединители различных типов.

**Проведение компоновочных работ.** Процесс компоновки РЭА с печатным монтажом искусственно расчленяется на две подзадачи — оптимального размещения элементов и оптимальной трассировки. Задачей компоновки является разработка такого варианта расположения ЭРЭ на плате и такого рисунка печатных соединений, при котором устройство обеспечивало бы своему функциональному назначению и имело бы заданные параметры и характеристики. При этом рекомендуются следующие ограничения:

- > обеспечение минимума теплового градиента: расположение теплонагруженных ЭРЭ по периметру;
- > повышение надежности ячеек: размещение более надежных элементов в местах наибольшей амплитуды виброускорений (в центре платы);
- > повышение жесткости ПП — установка более тяжелых элементов ближе к точкам крепления;
- > в ведение экранов и выделение для них места;
- > определение рабочей площади ПП для размещения. При оптимальной трассировке:
  - > длина отдельных проводников;
  - > обеспечение минимума паразитных связей;
  - > учет эффекта длинных линий (формирование полосковых линий и их согласование);
  - > определение рабочей площади ПП для трассировки.

*Размещение навесных элементов рекомендуется осуществлять следующим образом:*

- принципиальная электрическая схема разбивается на функционально связанные группы, составляется таблица соединений, производится размещение навесных элементов в каждой группе;
- группа элементов, имеющая наибольшее количество внешних связей, размещается вблизи соединителя;
- группа элементов, имеющая наибольшее число связей с уже размещенной группой навесных элементов, размещается рядом и т.д. По ГОСТ 25751 — 83 необходимо выполнить рациональное размещение навесных элементов с учетом электрических связей и теплового режима с обеспечением минимальных значений длин связей, количества переходов печатных проводников со слоя на слой, паразитных связей между навесными элементами;
- если возможно, то целесообразно выполнить равномерное распределение масс навесных элементов по поверхности платы с установкой элементов с большей массой вблизи мест механического крепления платы.

*При установке элементов на ПП рекомендуется учесть следующие правила установки элементов:*

- > для обеспечения возможности групповой пайки все ЭРЭ устанавливаются только с одной стороны платы, исключая тем самым воздействия при пая на элементы;
- > при установке элементов их выводы крепят в монтажных отверстиях платы, причем в каждом отверстии можно размещать лишь один вывод элемента;
- > центры монтажных и переходных отверстий должны располагаться в узлах координатной сетки (тоже рекомендуется и для крепежных отверстий);
- > навесные двухвыводные элементы следует размещать на ПП параллельно линиям координатной сетки. Для удобства автоматизации процесса установки ЭРЭ на плату целесообразно располагать их рядами;

> должно соблюдаться определенное расстояние от корпуса элемента до места пайки, регламентируемое ГОСТами или ТУ на данный элемент;

> расстояние между корпусами соседних ЭРЭ выбирают из условия лучшего теплоотвода и допустимой разности потенциалов (относительно выводов);

> конструктивные детали механического крепления (скобы, держатели, хомуты и др.) выбираются из числа рекомендованных или конструируются вновь с учетом механических перегрузок, действующих на изделие.

Рациональная компоновка ЭРЭ на ПП невозможна без творческого подхода, обдуманного выбора технического решения, построенного на разумных компромиссах между противоречивыми требованиями схемы, конструкции, условий эксплуатации, возможностями технологии и стоимостью.

Важно правильно оценить значимость (вес) каждого предъявляемого к конструкции требования. Очевидно, что для одной и той же схемы можно предложить несколько различных вариантов компоновки (рис.3.2.6). Учитывая специфику усилительных устройств, лучшим среди трех предложенных вариантов компоновки надо признать вариант III, т.к. здесь осуществлено максимальное разнесение входных и выходных цепей, проводники корпуса («Общ.») и питания («-6,5В») дополнительно экранируют вход и выход. Второй вариант хуже не только с электрических, но и с технологических позиций: об этом свидетельствуют узкие места на плате. Наличие узких мест влечет за собой необходимость занижения ширины печатных проводников и контактных площадок вокруг монтажных отверстий, что чревато опасностью отслаивания их от платы в процессе изготовления. Первый вариант (рис. 3.2.6) компоновки вообще неприемлем вследствие неправильной распайки выводов транзисторов. Из приведенного анализа различных вариантов компоновки простейшего функционального узла ясно, что нахождение оптимального компоновочного решения является весьма сложной задачей.

В целях упрощения процесса компоновки рекомендуется применять аппликационный метод. Он состоит в том, что расстановку ЭРЭ на ПП осуществляют за счет перемещения проекций элементов, вырезанных из плотной бумаги, картона на листе бумаги с расчерченной координатной сеткой. Результат компоновки удобнее всего представить в виде компоновочного эскиза (рис. 3.2.6), по нему нетрудно в дальнейшем оформить чертежи платы и сборки узла. ЭРЭ нужно распределить на плате относительно равномерно и по возможности более плотно, стремясь к уменьшению габарита платы. Получившиеся размеры платы необходимо скорректировать и привести в соответствие с ГОСТ10317 — 79\*.

Можно количественно оценить некоторые компоновочные параметры: плотность упаковки

$$K_s = \sum_{i=1}^N S_i / ab.$$

Коэффициент использования площади платы

$$\eta = N / abc .$$

Коэффициент заполнения объема блока

$$K_v = \sum_{i=1}^N V_i / abc ,$$

где  $N$  - количество ЭРЭ, установленных на плате;  $S_i$ ,  $V_i$  соответственно установочная площадь и установочный объем  $i$ -го элемента схемы;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — соответственно длина, ширина и высота на печатной плате.

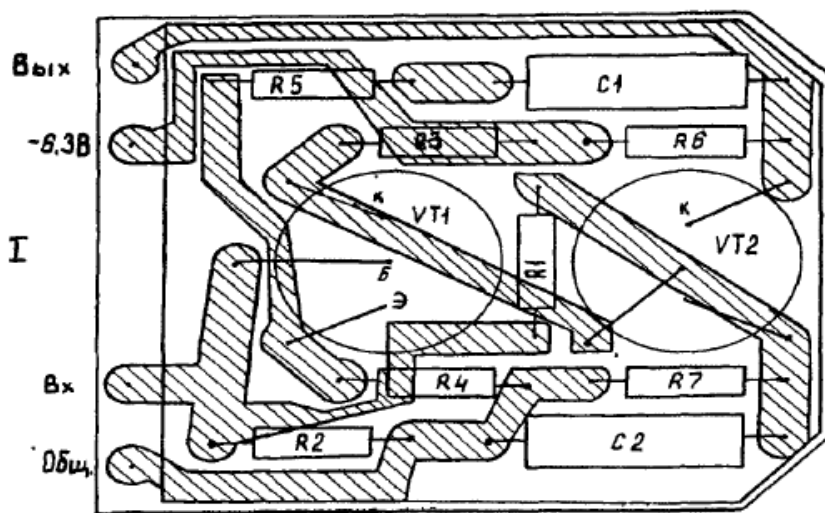
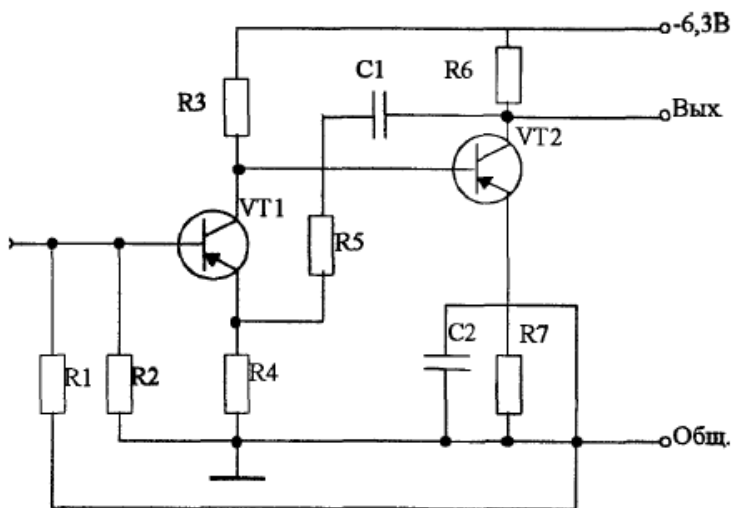


Рис.3.2.6. Пример компоновочного эскиза

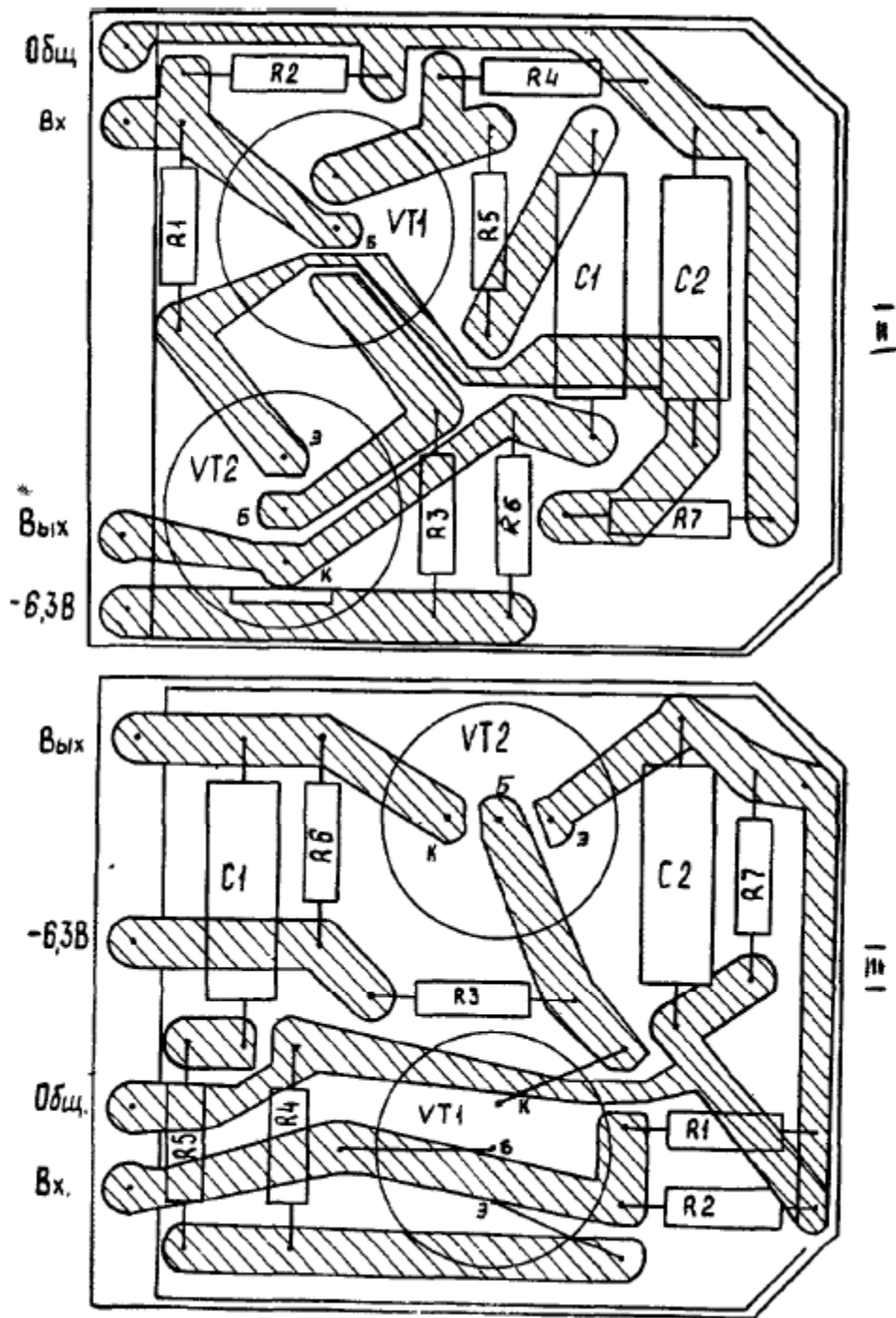


Рис.3.2.6. Пример компоновочного эскиза (продолжение)

При увеличении плотности упаковки РЭА не следует забывать, что полупроводниковые элементы и микросхемы необходимо размещать как можно дальше от мощных тепло выводящих элементов и от элементов, являющихся источниками переменных и постоянных магнитных полей (трансформаторы, дроссели и др.).

Окончательное выяснение качества и рациональности компоновки может быть проверено макетированием.

Компоновку (размещение) элементов проводящего рисунка целесообразно проводить, используя каналные алгоритмы трассировки. Для выполнения трассировки по этому методу необходимо вычертить эскиз ПП в масштабе 4:1 на прозрачной пленке или кальке, нанести на него с двух сторон координатную сетку и обозначить посадочные места. Качество трассировки значительно повышается, если перед трассировкой по результатам размещения было выполнено построение ортогональных минимальных деревьев и получена таблица соединений. Пользуясь этой таблицей, сначала выполняют трассировку цепей простой конфигурации, реализуемых без перехода из канала в канал, а затем проводятся отрезки трасс, подходящие к контактам модулей. Далее производится распределение фрагментов трасс по горизонтальным каналам. Сановным критерием служит такое назначение фрагмента магистрали, при котором возникает минимальное количество конфликтных ситуаций. Если трасса соединяет контакты микросхем, расположенные с одной стороны канала, то ей выделяется ближайшая с этой стороны магистраль. Основным ограничением при распределении фрагментов трасс по магистралям является пропускная способность канала. Если в канале имеются участки, где число фрагментов трасс больше числа магистралей, то необходимо скорректировать размещение. Если трасса соединяет контакты микросхем, к которым подходят различные горизонтальные каналы, то соединения проведенных ранее горизонтальных отрезков осуществляются в вертикальных каналах. Эти две операции повторяются до тех пор, пока все трассы не будут разведены.

На расположение элементов печатного монтажа действует ряд ограничений, связанных с технологическими особенностями производства и обеспечением необходимых электрических параметров схемы электрической принципиальной.

Форма печатных проводников и их взаимное расположение оказывают значительное влияние на электрические параметры схемы, поэтому при разработке высокочастотных схем, импульсных и частотно-зависимых схем необходимо тщательно исследовать взаимное расположение проводников.

Печатные проводники рекомендуется выполнять одинаковой ширины по нормам для свободного места на всем их протяжении. Сужать проводники до минимального значения следует только в узком месте на возможно меньшей длине. Проводники шириной более 5 мм, расположенные на ПП со стороны пайки и на внутренних слоях МПП, выполняют в соответствии с рекомендациями для конструирования экрана (ГОСТ 25751 — 83).

*При компоновке печатного монтажа проводники следует располагать равномерно по полной площади ПП с учетом следующих требований:*

- > параллельно линии координатной сетки ли под углом, кратным  $15^\circ$ ;
- > как можно более короткими;

> параллельно направлению движения волны припоя или под углом к нему не более  $30^\circ$  со стороны пайки, если проводящий рисунок не покрывают защитной маской;

> во взаимно перпендикулярных направлениях на соседних проводящих слоях ПП;

> перпендикулярно касательной к контуру контактной площадки.

В целях уменьшения сложности проводящего рисунка допускается применение перемычек в количестве не более 5% от общего числа печатных проводников. Экраны выполняют в одной плоскости с проводящим рисунком или как самостоятельно проводящие слои. Все экраны выполняют с вырезами. Площадь вырезов должна быть не менее 50% общей площади экрана. Форма вырезов произвольная, определяется конструктором.

Печатные контакты переключателей располагают произвольно на любом участке полезной площади ПП. Размеры и взаимное расположение площади печатных контактов определяет конструкция переключателя. Концевые печатные контакты располагают на краю ПП, размеры которых определяют из технических условий на гребенчатый соединитель.

Металлизированные отверстия должны иметь контактные площадки с двух сторон ПП. На внутренних слоях МПП контактные площадки должны быть у тех отверстий, которые связаны электрически с проводящим рисунком данного слоя.

Не металлизированные монтажные отверстия следует располагать в зоне контактной площадки. Контактные площадки могут иметь произвольную форму, предпочтительной является круглая. Контактная площадка, предназначенная под установку первого вывода многовыводного элемента, должна иметь форму, отличную от остальных. Контактные площадки на проводниках и экранах рекомендуется выполнять в соответствии с рис. 3.2.7. Контактные площадки для автоматического контроля и диагностики следует выполнить круглой формы диаметром не менее 2 мм и располагать в узлах координатной сетки с шагом 2,5 мм в свободных местах в шахматном порядке так, чтобы расстояние между центрами контактных площадок, лежащих на одной линии, и координатной сетки было кратно 5, а расстояние между центрами контактных площадок, лежащих на соседних линиях координатной сетки, равно 2,5.

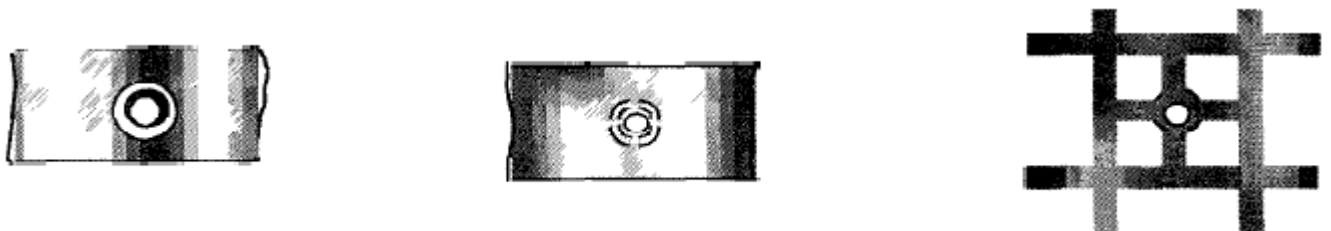


Рис.3.2.7. Виды контактных площадок



Центры монтажных отверстий под не формуемые выводы многовыводных элементов, межцентровые расстояния которых не кратны шагу координатной сетки, следует располагать таким образом, чтобы в узле координатной сетки находился центр по крайней мере одного из монтажных отверстий, центры монтажных отверстий под остальные выводы располагать в соответствии с требованиями конструкции устанавливаемого элемента. Взаимное расположение монтажных отверстий под выводы навесных элементов должно соответствовать ОСТ 4 ГО.010.030 — 81; ОСТ 4.091.121 — 79; ОСТ 5.070.010—78.

Размеры и конфигурацию крепежных и других конструктивных отверстий, например для корпуса навесных элементов, выбирают по ГОСТ 11284 — 75 в зависимости от требований конструкции устанавливаемого элемента. Не рекомендуется использовать более трех различных диаметров монтажных отверстий. Все отверстия на ПП выполняют без зенковок. Допускается у металлизированных отверстий ПП притупление острых кромок и частичное затягивание фольги в не металлизированные отверстия. При расчете диаметра контактной площадки наличие притупления кромок не учитывают. Все печатные контакты на плате должны иметь износостойчивое покрытие, которое указывают на чертеже.

Конструктивные покрытия. Стабильность электрических, механических и других параметров ПП может быть обеспечена применением металлических и неметаллических конструктивных покрытий.

Конструктивные покрытия выбирают по ОСТ 4.ГО.024.000. Вид и толщину покрытия указывают в чертеже. В качестве конструктивных покрытий рекомендуется использовать металлы и сплавы, приведенные в табл. 3.2.6.

Неметаллическое конструктивное покрытие используют в следующих случаях: для сохранения паяемости; для защиты проводников и поверхности основания ПП от воздействия припоя; для защиты элементов проводящего слоя.

Для сохранности паяемости используют спирто-ацетонканифольные лаки. Данное покрытие является технологическим, его в чертеже не указывают. Для защиты проводников и поверхности основания платы от воздействия припоя используют резистивные маски на основе эпоксидных смол, сухого пленочного резиста, холодных эмалей, оксидных пленок. Для защиты элементов проводящего рисунка от замыкания навесными элементами используют прокладочные стеклоткани, гетинаксы и другие изоляционные материалы.

Таблица 3.2.6

Покрытие	Толщина, мкм	Назначение покрытия
Сплав «Розе»	4 ... 10	Защита от коррозии, улучшение способности к пайке
Сплав олово-свинец	9 ... 12	Тоже
Сплав олово-кобальт	9 ... 12	Тоже
Серебрение	6 ... 12	Улучшение электропроводности и повышение износостойчивости переключателей и концевых контактов соединителей
Сплав серебро-сурьма	6 ... 12	Тоже
Золотое	0,5...2,5	Снижение переходного сопротивления и повышение помехоустойчи-
Палладиевое	1...5	Повышение износостойчивости концевых контактов и переключателей
Никелевое	3...6	Придание поверхности переключателей твердости; используется в качестве подслоя под палладиевое покрытие

Конструктивно-технологические расчеты. Конструктивно-технологический расчет ПП производится с учетом производственных погрешностей рисунка проводящих элементов, фотошаблонов, базирования, сверления и т.д.

Нормы на конструирование ПП устанавливаются ГОСТ 2.417 — 91, ГОСТ10317 — 79, ГОСТ 23751 — 86, ГОСТ 22318 — 77.

Координатная сетка в декартовой системе координат имеет шаг 2,5; 1,25; 0,5 мм. Большую сторону ПП ориентируют по оси X. Шаг координатной сетки ПП, применяемых в изделиях автоматизации промышленных процессов, измерительной и вычислительной технике, рекомендуется определять:

Наименьшее расстояние размещения элементов:	ОТ	–	0,1	0,500	0,625	1,25	2,50
	Д	0,1	0,5	0,625	1,250	2,50	–
Шаг сетки		0,1	0,1	0,5	0,625	1,25	2,5

Диаметры монтажных и переходных отверстий должны соответствовать ГОСТ 10317 — 79\*. Предпочтительные размеры монтажных отверстий выбирают из ряда 0,7; 0,9; 1,1; 1,5; 1,5 мм, а переходных отверстий из ряда 0,7; 0,9; 1,1 мм. Предельные отклонения диаметров монтажных и переходных отверстий (в миллиметрах) в соответствии с ГОСТ 25751 — 83 приведены в табл. 3.2.7.

Таблица 3.2.7

Диаметр отверстия	Наличие металлизации	Класс точности				
		1	2	3	4	5
До 1,0	Нет	±0,10	±0,10	±0,05	±0,05	±0,025
	Есть	±0,05	±0,05	+0	+0	+0
Свыше 1,0	Нет	±0,15	±0,15	±0,10	±0,10	±0,10
	Есть	±0,10	±0,10	±0,05	±0,05	±0,05

Предельные отклонения ширины печатных проводников, площадок, экранов и др. для узких мест указаны в табл. 3.2.8.

Таблица 3.2.8

Наличие металлического покрытия	Класс точности				
	1	2	3	4	5
Без покрытия	±0,15	±0,00	±0,03	±0,03	±0
С покрытием	±0,25	±0,15	±0,10	±0,05	±0,03
	±0,20	±0,10	±0,08		

Позиционные допуски по ГОСТ 23751 — 86 для осей отверстий применять по табл. 3.2.9.

Таблица 3.2.9

Размер большой стороны платы	Класс точности				
	1	2	3	4	5
$L \leq 180$	0,20	0,15	0,08	0,05	0,05
$180 < L < 560$	0,25	0,20	0,10	0,08	0,08
$L > 360$	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10

Предельные отклонения значения номинального расстояния между центрами двух отверстий ПП определяют как полу сумму позиционных допусков расположения центров этих отверстий.

Значение позиционного допуска расположения контактных площадок относительно его номинального положения выбирают по табл. 3.2.10

Таблица 3.2.10

Вид платы	Размер большой стороны платы	Класс точности				
		1	2	3	4	5
ОПП, ДПП ГПК, МПП (наружный слой)	$L < 180$	0,35	0,25	0,15	0,10	0,05
	$180 < L < 360$	0,40	0,50	0,20	0,15	0,08
	$L > 360$	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15
МПП	$L > 180$	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10
(внутренний слой)	$180 < L < 360$	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15
	$L > 360$	0,50	0,40	0,30	0,25	0,20

Для нормальной работы ПП сопротивление изоляции между разобращенными цепями в условиях наивысшей влажности должно подчиняться неравенству  $R_{и} > 0.103 R_{вх}$ , где  $R_{вх}$  — входное сопротивление коммутируемых схем.

При оценке теплового режима ЭРЭ на ПП необходимо исходить из того, что максимальная рабочая температура ЭРЭ обычно ограничивается пределами  $T_{э} = 75 \dots 85$  °С. С другой стороны, температура несущей базовой конструкции, которая принимается условно как бесконечно теплоемкий радиатор, может иметь следующие значения:

для естественной конвекции  $T = 25$  °С;

для принудительных видов охлаждения  $T_k = 15$  °С.

Перегрев элемента определяется следующим образом  $\Delta T_{\text{Э}} = T_{\text{Э}} - T_{\text{к}}$  и составит  $\Delta T_{\text{Э}} = 50 \dots 60$  °С. Перегрев имеет в основном две составляющие:

$$\Delta T_{\text{Э}} = \Delta T_{\text{н}} - \Delta T_{\text{в}},$$

где  $\Delta T_{\text{н}}$  — наружный перегрев (перегрев в результате теплового взаимодействия поверхности элемента с окружающей средой);

$\Delta T_{\text{в}}$  — внутренний перегрев (перегрев ЭРЭ вследствие прохождения тепловой энергии по внутренним конструктивным элементам). Перегрев связан с тепловым сопротивлением соотношением:

$$\Delta T = KmP,$$

где  $P$  — мощность, рассеиваемая элементом, Вт.

Величина внешнего перегрева может определяться также по формуле

$$\Delta T_{\text{н}} = \frac{10^{-4} P}{\alpha S},$$

где  $S$  — площадь поверхности элемента, см<sup>2</sup>;

$\alpha$  — коэффициент теплообмена между поверхностью и окружающей средой, Вт/(см<sup>2</sup>°С) (табл. 3.2.11).

Таблица 3.2.11

Условия охлаждения	$\alpha$ , Вт/(см <sup>2</sup> °С)
Естественная конвекция:	
воздух	$(6 \dots 25) 10^{-4}$
пар фреона	$(3 \dots 20) 10^{-3}$
жидкий фреон	$(3 \dots 4) 10^{-2}$
Принудительная конвекция:	
воздух	$(0,25 \dots 10) 10^{-2}$
пар фреона	$(2 \dots 2) 10^{-2}$
вода и жидкий фреон	$(4 \dots 80) 10^{-2}$
Кипение:	
жидкий фреон	$0,15 \dots 0,7$

Внутренний перегрев  $\Delta T_{\text{в}}$  в значительной мере зависит от теплопроводности материала, из которого изготовлены корпус или плата. В табл. 3.2.12 приведены данные по тепловому сопротивлению для различных модификаций печатных плат.

Можно произвести полный расчет теплового сопротивления от температуры воздуха, составив его тепловую схему. Суммарный перегрев должен быть не больше допустимого. Если это условие не выполняется надо искать пути уменьшения теплового сопротивления по «внутренним» и «внешним» каналам.

Таблица 3.2.12

Основание ПП	Температура, ЭРЭ,	Тепловое сопротивление, °С/Вт
Стеклоэпоксидное (гетистеклотекстолит и др.)	70...90	26
Стеклоэпоксидное с теплоотводящей медной фольгой	65...90	16
Гибкая ПП, приклеенная стальное основание	18...23	8

Проверочные расчеты. Подтверждением соответствия конструктивного решения ПП заданному ТЗ являются результаты проверочных расчетов, перечень и место которых определяется индивидуально в зависимости от применяемых методов, способов и принципов конструирования.

**Расчет по постоянному току.** Расчет по постоянному току практически выполняется для цепей «питания» и «земли». Необходимо оценить наиболее важные электрические свойства ПП по постоянному току: нагрузочную способность проводников по току, сопротивление изоляции и диэлектрическую прочность основания платы. Практически сечение проводника рассчитывают по допустимому падению напряжения  $U_{\Pi}$  на проводнике:

$$U_{\Pi} = \rho \frac{\ln Jn}{h\phi\phi}, \quad \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}};$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление проводника (табл. 3.2.13),

Таблица 3.2.13

Металл	Удельное электрическое сопротивление, $10^{-8}$ Ом/мм <sup>2</sup>	Металл	Удельное электрическое сопротивление, $10^{-8}$ Ом/мм <sup>2</sup>

Медная фольга	1,72	Палладий	10,80
Гальваническая	1,90	Никель	7,80
медь Химическая	1,80	Серебро	1,59
медь Золото	2,22		

$h_f, t, l_n$  — соответственно толщина фольги, ширина и длина проводника, мм;

$J_n$  — ток через проводник (определяется из условий работы схемы электрической принципиальной).

Для электронных логических схем допустимое падение напряжения в цепях «питание» и «земля» не должно превышать 1 — 2% от номинального значения подводимого напряжения  $E_k$ , поэтому требуемое сечение печатного проводника шины «питание» и «земля» вычисляется по формуле:

$$S_{n_3} \geq \rho \frac{l_n}{(0,01...0,02)E_k} J_n,$$

$$S_{n_3} = h_f t$$

— сечение печатного проводника шины «земля».

Разработка печатных плат автоматизированным методом. Алгоритмы размещения и трассировки подробно изучаются в курсах «Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР», «Автоматизация конструкторского проектирования с применением САПР».

Указанные алгоритмы широко используются в автоматизированных Системах проектирования ОПП, ДДП и МПП Так, в программных модулях размещения одностипных интегральных микросхем на предварительно выделенных установочных местах используются алгоритмы парных и групповых перестановок, алгоритм последовательного размещения, итеративные алгоритмы, алгоритм случайных назначений.

В программных модулях размещения разно габаритных элементов используются алгоритмы последовательно-группового размещения на основе применения принципа дихотомического деления множества размещаемых элементов, последовательно одиночного размещения на основе применения функции плотного размещения и некоторые другие.

В программных модулях трассировки наиболее широко применяются волновой и лучевой алгоритмы и их многочисленные модификации.

Разработка функциональных модулей (узлов) с печатным монтажом на основе применения САПР является экономически наиболее целесообразной,

рациональной и перспективной по сравнению с другими методами — полуавтоматизированными и ручными.

Оформление чертежей печатных плат. Печатная плата является специфической деталью и выполняется в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ 2 417 — 91 и ОСТ 4.0.10.019—81.

Чертеж односторонней и двусторонней печатных плат именуют «Плата печатная», ему присваивают класс в соответствии с классификатором. Чертеж многослойной печатной платы именуют «Плата печатная многослойная», сборочный чертеж. Чертеж слоя многослойной печатной платы с проводящим рисунком, расположенным с одной или с двух сторон, именуют «Слой многослойной печатной платы». Иногда делают дополнительную проекцию печатной платы без проводников, на которой проставляют размеры для механической обработки печатной платы, маркировки и т.д.

Чертежи печатной платы выполняют в масштабах 1:1, 2:1, 4:1; 5:1, 10:1. Однако, если шаг координатной сетки 1,25 мм, то используют масштаб не менее 4:1. На чертеже изображают основные проекции. С печатными проводниками и отверстиями допускается приводить дополнительные виды с частичным изображением рисунка. Чертеж слоя многослойной печатной платы следует изображать на отдельном листе. На чертеже слоя рекомендуется проставлять габаритные размеры.

На чертеже печатной платы наносят координатную сетку тонкими сплошными линиями толщиной 0,2...0,5 мм. Линии координатной сетки относительно нулевой нумеруют через один или несколько шагов (но не более пяти) цифрами. Допускается простановка номеров линий по четыре сторонам чертежа платы по ГОСТ 2.303 — 68.

*На чертеже печатной платы размеры должны указываться одним из следующих способов (в соответствии с требованиями ГОСТ 2.303-68):*

- > нанесением координатной сетки в прямоугольной системе координат (линии сетки нумеруются);
- > нанесением координатной сетки в полярной системе координат;
- > комбинированный способ с помощью размерных и выносных линий и координатной сетки в прямоугольной или полярной системе координат.

Шаг координатной сетки в прямоугольной системе координат по ГОСТ 10317-79 \*: основной шаг 2,50 мм, дополнительный — 1,25 или 0,5 мм.

*За ноль в прямоугольной системе координат на главном виде печатной платы следует принимать:*

- > центр крайнего левого нижнего отверстия, находящегося на поле платы (в том числе и технологического);
- > левый нижний угол печатной платы;
- > левую нижнюю точку, образованную линиями построения,

На чертеже круглых печатных плат за ноль в прямоугольной системе координат допускается принимать центр печатной платы. Если размеры и



конфигурация рисунка печатной платы оговорены в технических требованиях чертежа, то допускается элементы печатных плат изображать условно.

При автоматизированном и полу автоматизированном способе выполнения документации допускается отступление от масштаба по одной или обоим осям. Степень отклонения от масштаба определяется конструкцией воспроизводящих устройств.

При необходимости указать границы участков платы, которые не допускается занимать проводниками, на чертеже следует применять штрихпунктирную утолщенную линию.

Проводники на чертеже должны изображаться одной линией, являющейся осью симметрии проводника, при этом на чертеже следует указывать численное значение ширины проводника. Проводники шириной более 2,5 мм могут изображаться двумя линиями, при этом если они совпадают с линиями координатной сетки, численное значение ширины не указывают.

Размеры отверстий, их количество, размеры зенковок и другие сведения помещают в таблице на поле чертежа. Рекомендуемая форма таблиц приведена на рис.3.2.8.

30		30	30	35 <—	30	25
Условно е обозначение отверсти		Диаметры отверстий, мм	Диаметры зенковок с двух сторон, мм	Наличие металли- зации в отверстиях	Диаметры контактных площадей, мм	Количество отверстий

Рис.3.2.8. Пример таблицы

Данные для ее заполнения для плат толщиной 1,5...2,0 мм приведены в табл. 3.2.14.

Таблица 3.2.14

Диаметр выводов элемента	Диаметр отверстия в плате, мм	Диаметр зенковок с двух сторон, мм	Диаметр контактной площадки, мм	Диаметр выводов элемента, мм	Диаметр отверстия в плате, мм	Диаметр зенковок с двух сторон, мм	Диаметр контактной площадки
0,5— 0,6	0,8	1,1x70	2,2	1,3-1,5	1,8	2,2x70	4,0
0,7— 0,8	1,0	1,5x70	2,5	1,8-2,0	2,2	2,8x70	5,0

0,9— 1,0	1,3	1,8x70	3,0	2,0-2,2	2,5	3,0x70	5,5
1,2— 1,3	1,5	2,0x70	3,5	2,4-2,6	2,8	3,2x70	6,0

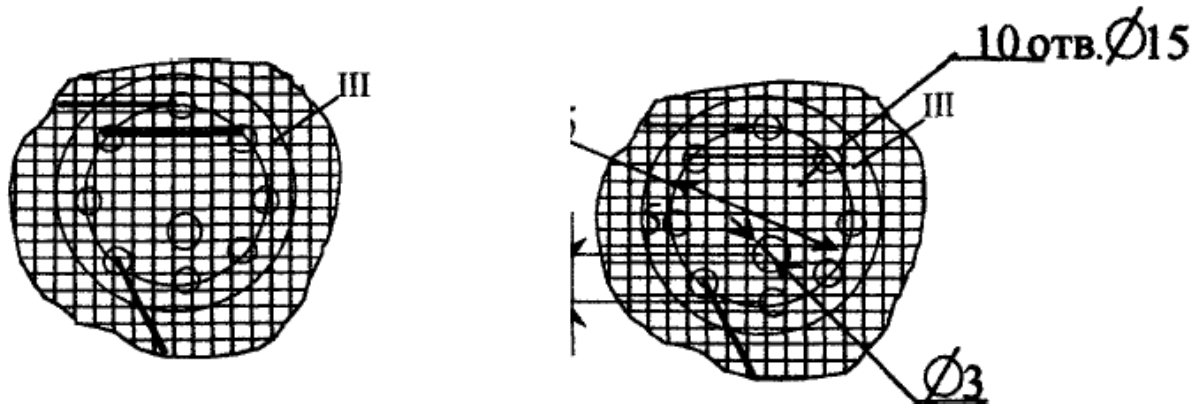


Рис. 3.2.9. Пример условных обозначений

Круглые отверстия, имеющие зенковку и круглые контактные площадки с круглыми отверстиями (в том числе и с зенковкой), показывают упрощенно — одной окружностью (без окружностей зенковки и контактной площадки). Чтобы их различать, используют условные обозначения (рис.3.2.9), в этом случае в технических требованиях чертежа оговаривают форму и размеры контактной площадки.

Для простановки размеров контактной площадки под многовыводные элементы контактную группу выделяют на плате или выносят на поле чертежа (рис.3.2.10 а, б). Отверстия, расстояния между которыми кратны шагу координатной сетки, располагают в ее узлах, остальные — согласно установочным размерам. Выносной элемент используют для облегчения чтения чертежа. Печатные элементы (проводники, экраны, контактные площадки и др.) положено штриховать (рис.3.2.10 а, б). При ширине

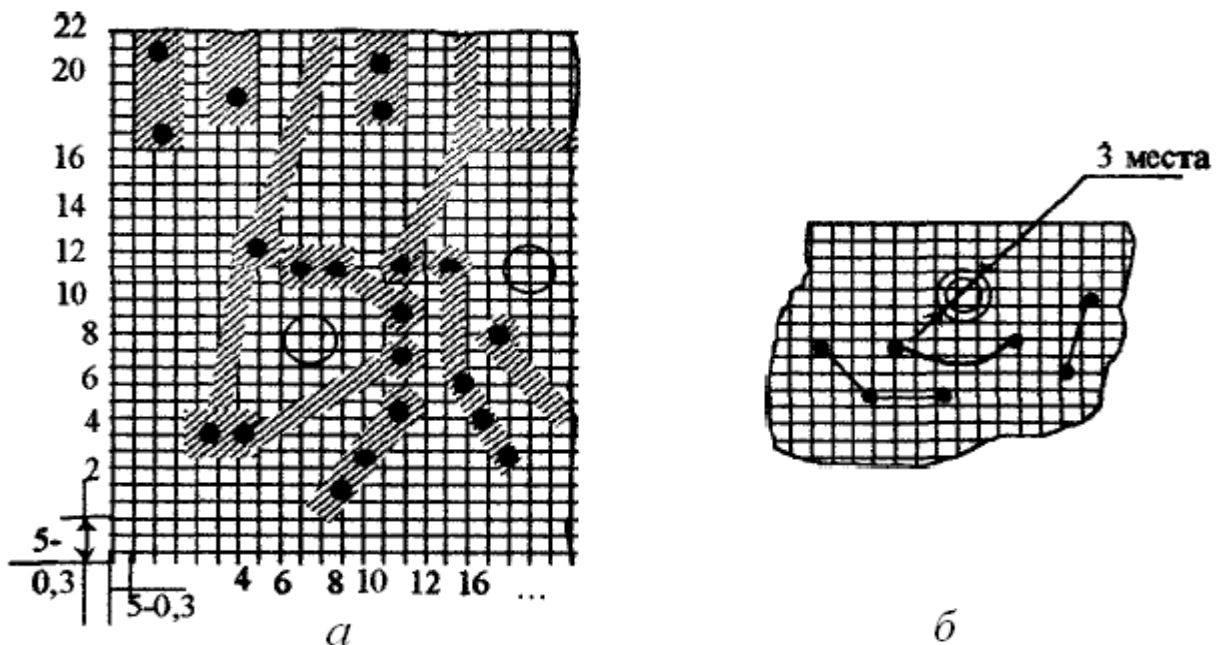


Рис.3.2.10. Пример простановки размеров контактной площадки проводника на чертеже менее 2 мм (а иногда и более, если действительная ширина указывается в технических требованиях) их изображают сплошной контурной линией. Если проводник имеет по длине переменную ширину, то ее указывают на каждом участке. Если проводник с переменной шириной переходит с одного слоя на другой, то размеры его указывают на изображении и этих слоев.

Таблица 3.2.15

Диаметр, мм	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5
Условные обозначения отверстий					

При наличии на чертеже печатной платы двух и более проводников, имеющих заданную ширину, допускается их изображение выполнять штриховкой, зачеркиванием и др. линиями. При необходимости форму и размеры вырезов на широких проводниках и экранах показывают на чертеже.

Маркировку располагают на чертеже печатной платы с одной или двух сторон. При необходимости способ маркировки указывают в технических требованиях чертежа.

При конструировании печатной платы под групповой метод пайки направление пайки рекомендуется указывать на поле чертежа печатной платы.

Над основной надписью помещают технические требования в соответствии с ГОСТ 2.417 — 91 в следующей последовательности:

- > способ изготовления платы;
- > шаг координатной сетки;

- > допускаемые отклонения очертаний проводников, контактных площадок и других печатных элементов от заданных чертежом;
- > ширина печатных проводников и зазоры между ними в свободных и узких местах;
- > наименьшее расстояние между проводниками;
- > требования к подрезке и смещению контактных площадок;
- > указания о маркировании и клеймении;
- > указания о контроле.

Пример записи технических требований приведен в приложении 2 в конце главы.

*На поле чертежа ПП необходимо указывать:*

- > габаритные размеры ПП; координаты монтажных, технологических и контактных отверстий;
- > размеры контактных площадок;
- > допуск на расстояние между базовым отверстием (началом координат) и любым монтажным отверстием (обычно  $\pm 0,2$  мм);
- > количество отверстий каждого размера и их размеры (если нужно, указанием зенковки);
- > шероховатость (чистоту обработки) поверхности;
- > класс точности выполнения размеров: размеры, указанные без допуска, обычно исполняются по 12 или 14 качеству.

*На чертежах печатных плат допускается:*

- > наносить позиционные обозначения электро- и радиоэлементов;
- > указывать сторону установки навесных элементов надписью, помещаемой над изображением;
- > помещать электрическую схему.

Технические требования на чертеж печатной платы

1. Технические требования по ГОСТ 25752 — 83.
2. Плату изготовить химический методом.
3. Шаг координатной сетки 1,25. Линии координатной сетки нанесены через одну.
4. Минимальное расстояние между двумя проводниками, проводниками и контактной площадкой 0,8 мм.
5. Конфигурацию проводников выдерживать по координатной сетке с отклонением от чертежа  $\pm 1,0$  мм с учетом обеспечения необходимых зазоров в узких местах.
6. Форма контактной площадки — произвольная; допускается занижение контактной площадки до 0,3.
7. Места, обведенные штрихпунктирной линией и контактными площадками, не занимать.
8. Покрытие проводящего рисунка. Гор. ПОС-61ГОСТ 21931 — 76.
9. Маркировать номер печатной платы и печатного узла травлением шрифт 2,5 по НО 010.007.

10. Маркировать условные обозначения элементов, номера контактных выводов краской МКЭЧ по ОСТ 4.Г0.014.002, шрифт 3 поНО.010.007.
11. Остальные технические требования по ОСТ 4.Г0.070.014.
12. Размеры для справок.

### 3.3. Волоконно-оптические линии передачи информации

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. 3.3.1) 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 преломления.

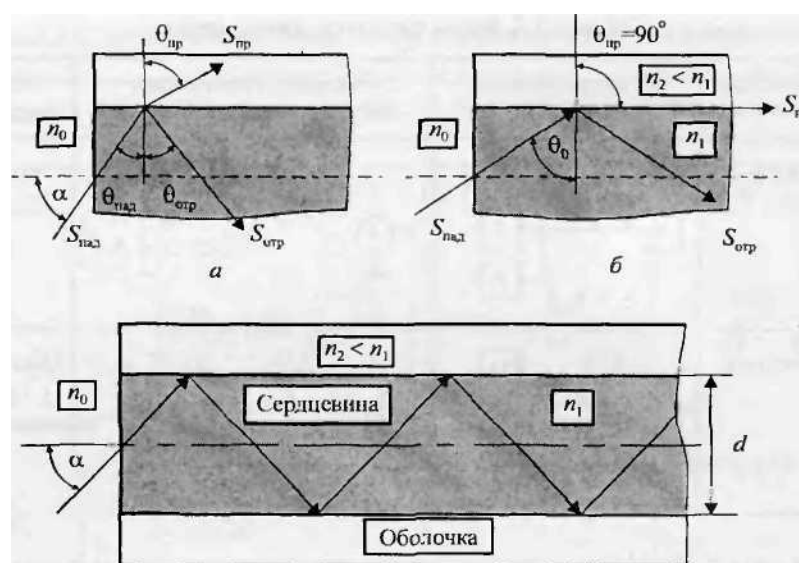


Рис. 3.3.1. Схема распределения и траектория распространения оптического сигнала в световоде

На рис. 3.3.1, *a* электромагнитная волна  $S_{\text{пад}}$ , падая на границу двух диэлектрических сред под углом  $\theta_{\text{пад}}$ , частично отражается ( $S_{\text{отр}}$ ) от границы раздела под углом  $\theta_{\text{отр}}$  и частично преломляется ( $S_{\text{пр}}$ ) под углом  $\theta_{\text{пр}}$ . При этом соблюдается соотношение  $n_1 \sin \theta_{\text{пад}} = n_2 \sin \theta_{\text{отр}}$ , где  $n_1$ ,  $n_2$  — коэффициенты преломления соответственно сердцевины и оболочки.

С увеличением угла  $\theta_{\text{пад}}$  возрастает угол  $\theta_{\text{пр}}$  и при  $\theta_{\text{пад}} = \theta_0$  становится равным  $90^\circ$ , а преломленный световой сигнал скользит вдоль границы раздела сред (см. рис. 3.3.1, *б*). При всех значениях  $\theta_{\text{пад}} > \theta_0$  преломленная волна будет отсутствовать. Угол  $\theta_0 = \arcsin(n_1/n_2)$ , при котором световая энергия зигзагообразно распространяется по сердцевине световода (рис. 3.3.1, *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  $\alpha$  с коэффициентом преломления  $n_1$  к оси сердцевины, то при определенном угле  $\alpha = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \cos \theta_{\max}\right)$  сигнал будет полностью отражаться от границы раздела сред сердцевина—среда. Для воздушной среды ( $n_0 = 1$ ) получим  $\sin \alpha_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ . Угол  $\alpha_{\max}$  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  $\alpha_{\max}$  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. 3.3.2). Кроме того, сигнал на выходе оказывается задержанным на величину  $t_3$  за счет конечного времени прохождения по световоду.

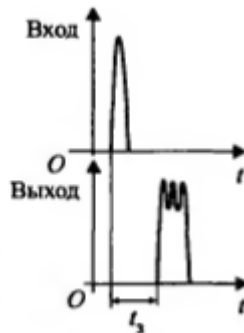


Рис. 3.3.2. Задержка и искажение сигнала на выходе световода

Между углом полного внутреннего отражения  $\theta_0$  и апертурным углом падения луча  $\alpha_{\max}$  существует взаимосвязь: чем больше  $\theta_0$ , тем меньше  $\alpha_{\max}$ . Поэтому необходимо стремиться, чтобы угол входа луча в световод укладывался в апертурный угол  $\alpha_{\max}$ , а угол падения луча на границу сердцевина—среда был больше угла полного внутреннего отражения  $\theta_0$ .

Длина волны передаваемого по световоду сигнала связана с диаметром сердцевины выражением  $\lambda = d \cos \theta_{\text{вв}}$ . Учитывая, что  $\cos \theta_{\text{вв}} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{\text{вв}}} \approx \sin \theta_{\text{вв}} = n_2 / n_1$ , получим:

$$\lambda_{\text{вв}} = d \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}, f_{\text{вв}} = c / \lambda_{\text{вв}},$$

где  $f_{\text{сд}}, \lambda_{\text{сд}}$  — критическая длина волны и частота передаваемого по световоду сигнала;  $c$  — скорость света.

При  $\lambda_{\text{кр}}$  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. 3.3.3) оптическая энергия от светодиода 1 за счет полного внутреннего отражения передается по сердцевине 2 воспринимается фотодиодом 4, ослабляясь на величину  $B = 20 \lg(P_{\text{вх}} / P_{\text{вых}}) / l$ , где  $P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}}$  — мощность оптического сигнала на входе и выходе световода;  $l$  — длина световода.

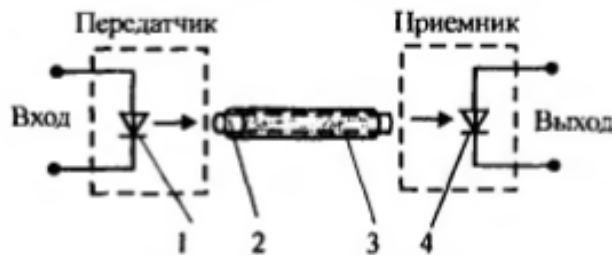


Рис. 3.3.3. Схема волоконно-оптической линии передачи:  
1 — светодиод; 2 — сердцевина; 3 — оболочка; 4 — фотодиод

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. 3.3.4, 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. 3.3.4) объединяет световоды в единую жесткую конструкцию, обеспечивая защиту от внешних воздействий. Центральная металлическая жила — провод 2 придает оптическому кабелю дополнительную жесткость.

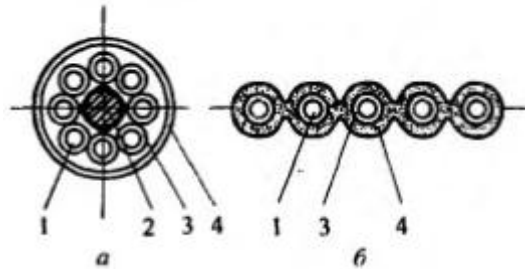


Рис. 3.3.4. Конструкция цилиндрического (а) и плоского (б) оптического кабеля:

1 — световод; 2 — провод; 3 — защитная оболочка световода; 4 — защитная оболочка кабеля

### Вопросы для самоконтроля

1. Чем характеризуются линии передачи?
2. Опишите электрически короткие линии передачи.
3. Опишите электрически длинные линии передачи.
4. Как обеспечить согласование линий передачи?
5. Какое влияние оказывает поверхностный эффект и перекрестные помехи в линиях передачи?
6. Какие монтажные провода используют при конструировании РЭА?
7. Как осуществляется разводка линий передач?
8. На каких принципах основан процесс конструирования печатных плат?
9. Как выбирается тип печатной платы?
10. Как выбирают габаритные размеры и конфигурацию печатной платы?
11. Что характеризует критерий вибропрочности?
12. Как производится компоновка печатного монтажа?
13. Как выбираются конструктивные покрытия?
14. Какие проверочные расчеты проводят при конструировании РЭА?
15. Как оформляются чертежи печатных плат?
16. Какие особенности имеют волоконно-оптические линии связи?

## 4. Обеспечение надежной работы РЭС

### 4.1. Основные понятия надежности РЭС

**Понятие надежности.** Один из основных параметров РЭА - надежность - зависит как от надежности используемой элементной базы, так и от принятых схмотехнических и конструкторских решений. Учитывая значимость современной аппаратуры в человеческой деятельности, требования к надежности аппаратуры постоянно повышаются. Это связано с тем, что от правильной работы РЭА зависят ход выполнения технологического процесса, достоверность получения результатов измерений и обработки данных, и т.п. Вопросам повышения надежности РЭА на всех этапах ее проектирования и производства уделяется самое большое внимание.

Под надежностью понимают свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки при соблюдении режимов эксплуатации, правил технического обслуживания, хранения и транспортировки. Продолжительность работы РЭА до предельного состояния, установленного в нормативно-технической документации, называют ресурсом изделия.

Надежность - это сложное комплексное понятие, с помощью которого оценивают такие важнейшие характеристики изделий, как работоспособность, долговечность, безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость и др.

В любой момент времени РЭА может находиться в исправном или неисправном состоянии. Если РЭА в данный момент времени удовлетворяет всем требованиям, установленным как в отношении основных параметров, характеризующих нормальное выполнение вычислительных процессов (точность, быстродействие и др.), так и в отношении второстепенных параметров, характеризующих внешний вид и удобство эксплуатации, то такое состояние называют исправным состоянием.

Неисправное состояние – это состояние РЭА, при котором она в данный момент времени не удовлетворяет хотя бы одному из этих требований, установленных в отношении как основных, так и второстепенных параметров.

Не каждая неисправность приводит к невыполнению РЭА заданных функций. Различают неисправности основные и второстепенные. Второстепенные неисправности называют дефектами. Например, образование вмятин или ржавчины на корпусе аппаратуры, выход из строя лампочек подсветки не могут препятствовать эксплуатации РЭА.

Основные эксплуатационные свойства. *Основные эксплуатационные свойства изделий с позиций обеспечения надежной работы:*

- безотказность;
- ремонтоспособность;

- долговечность ;
- сохраняемость.

**Наработка** - продолжительность (или объем) работы изделия, измеряемая временем, циклами, периодами и т. п. В процессе эксплуатации или испытания изделия в зависимости от его назначения различают суточную или месячную наработку, наработку на отказ, среднюю наработку до первого отказа, гарантийную наработку и т. п. Суточная и месячная наработки оцениваются временем (циклами, периодами), которое изделие проработало в течение суток или месяца.

**Наработка на отказ** - среднее значение наработки ремонтируемого изделия между отказами. Если наработка выражена в единицах времени, то используют термин среднее время безотказной работы. Под средней наработкой до первого отказа понимают среднее значение наработки изделий в партии до первого отказа. Для неремонтируемых изделий этот термин равнозначен понятию средней наработки до отказа.

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

**Безотказностью** называют свойство изделия сохранять свою работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов. Безотказность измеряется в единицах наработки.

**Ремонтоспособность** - свойство РЭА, заключающееся в приспособлении к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

**Долговечность** - свойство РЭА сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов. Предельное состояние определяется технической непригодностью РЭА из-за снижения эффективности эксплуатации или требований техники безопасности и оговаривается в технической документации.

**Сохраняемость** - свойство изделия сохранять эксплуатационные показатели в течение заданного срока хранения и после него.

**Интенсивность отказов** - число отказов в единицу времени, отнесенное к среднему числу изделий, безотказно функционирующих в определенный промежуток времени.

*Различают три вида отказов:*

- обусловленные скрытыми ошибками в конструкторско-технологической документации и производственными дефектами при изготовлении изделий;
- обусловленные старением и износом радио- конструкционных элементов;

- обусловленные случайными факторами различной природы.

Для оценки надежности систем введены понятия «работоспособность» и «отказ».

**Работоспособность и отказы.** Работоспособность - это состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации. *Отказ* – событие, приводящее к полной или частичной утрате работоспособности изделия. По характеру изменения параметров аппаратуры *отказы* подразделяют на внезапные и постепенные.

**Внезапные** (катастрофические) отказы характеризуются скачкообразным изменением одного или нескольких параметров аппаратуры и возникают в результате внезапного изменения одного или нескольких параметров элементов, из которых построена РЭА (обрыв или короткое замыкание). Устранение внезапного отказа производят заменой отказавшего элемента исправным или его ремонтом.

**Постепенные** (параметрические) отказы характеризуются изменением одного или нескольких параметров аппаратуры с течением времени. Они возникают в результате постепенного изменения параметров элементов до тех пор, пока значение одного из параметров не выйдет за некоторые пределы, определяющие нормальную работу элементов. Это может быть последствием старения элементов, воздействия колебаний температуры, влажности, давления, механических воздействий, и т.п. Устранение постепенного отказа связано либо с заменой, ремонтом, регулировкой параметров отказавшего элемента, либо с компенсацией за счет изменения параметров других элементов.

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 - имеющие внешние признаки появления, и неявные (скрытые), для обнаружения которых требуется провести определенные действия.

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

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. Отказ типа сбоя особенно характерен для РЭА. Появление сбоев обуславливается внешними и внутренними факторами.

К внешним факторам относятся колебания напряжения питания, вибрации, температурные колебания. Специальными мерами (стабилизации питания, амортизация, термостатирование и др.) влияние этих факторов может быть значительно ослаблено. К внутренним факторам относятся флуктуационные колебания параметров элементов, несинхронность работы отдельных устройств, внутренние шумы и наводки.

**Количественные характеристики надежности.** Надежность, как сочетание свойств безотказности, ремонтоспособности, долговечности и сохраняемости, и сами эти качества количественно характеризуются различными функциями и числовыми параметрами. Правильный выбор количественных показателей надежности РЭА позволяет объективно сравнивать технические характеристики различных изделий как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации (правильный выбор системы элементов, технические обоснования работы по эксплуатации и ремонту РЭА, объем необходимого запасного имущества и др.).

Возникновение отказов носит случайный характер. Процесс возникновения отказов в РЭА описывается сложными вероятностными законами. В инженерной практике для оценки надежности РЭА вводят количественные характеристики, основанные на обработке экспериментальных данных.

Безотказность изделий характеризуется вероятностью безотказной работы  $P(t)$  (характеризует скорость снижения надежности во времени), частотой отказов  $F(t)$ , интенсивностью отказов  $\lambda(t)$ , средней наработкой на отказ  $T_{\text{ср}}$ . Можно также надежность РЭА оценивать вероятностью отказа  $q(t) = 1 - P(t)$ .

Рассмотрим оценку надежности неремонтируемых систем. Приведенные характеристики верны и для ремонтируемых систем, если их рассматривать для случая до первого отказа.

Пусть на испытания поставлена партия, содержащая  $N$  изделий. В процессе испытаний к моменту времени  $t$  вышли из строя  $n$  изделий. Осталось исправными:

$$N(t) = N - n.$$

Отношение  $Q(t) = n/N$  является оценкой вероятности выхода из строя изделия за время  $t$ . Чем больше число изделий, тем точнее оценка надежности результатов, строгое выражение для которой выглядит следующим образом:

$$Q(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N}.$$

Величина  $P(t)$ , равная:

$$P(t) = 1 - Q(t)$$

называется теоретической вероятностью безотказной работы и характе-

ризует вероятность того, что к моменту  $t$  не произойдет отказа.

Вероятность безотказной работы изделия может быть определена и для произвольного интервала времени  $(t_1; t_2)$  с момента начала эксплуатации. В этом случае говорят об условной вероятности  $P(t_1; t_2)$  в период  $(t_1; t_2)$  при рабочем состоянии в момент времени  $t_1$ . Условная вероятность  $P(t_1; t_2)$  определяется отношением:

$$P(t_1; t_2) = P(t_2) / P(t_1),$$

где  $P(t_1)$  и  $P(t_2)$  - соответственно значения вероятностей в начале  $(t_1)$  и конце  $(t_2)$  наработки.

Значение частоты отказов за время  $t$  в данном опыте определяется отношением  $F(t) = n/Nt = Q(t)/t$ . В качестве показателя надежности неремонтируемых систем чаще используют производную по времени от функции отказа  $Q(t)$ , которая характеризует плотность распределения наработки изделия до отказа  $f(t)$ :

$$F(t) = dQ(t)/dt = - dP(t)/dt.$$

Величина  $f(t)dt$  характеризует вероятность того, что система откажет в интервале времени  $(t; t+dt)$  при условии, что в момент времени  $t$  она находилась в рабочем состоянии.

Интенсивность отказов. Критерием, более полно определяющим надежность неремонтируемой РЭА и ее модулей, является интенсивность отказов  $\lambda(t)$ . Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  представляет условную вероятность возникновения отказа в системе в некоторый момент времени наработки при условии, что до этого момента отказов в системе не было. Величина  $\lambda(t)$  определяется отношением:

$$\lambda(t) = f(t)/P(t) = f(t) / P(t) dQ/dt.$$

Отсюда следует, что величина  $\lambda(t)dt$  характеризует условную вероятность того, что система откажет в интервале времени  $(t; t+dt)$  при условии, что в момент времени  $t$  она находилась в работоспособном состоянии. Этот показатель характеризует надежность РЭА в любой момент времени и для интервала  $\Delta t_i$  может быть вычислен по формуле:

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

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

Вероятность безотказной работы связана с величинами  $\lambda(t)$  и  $f(t)$  следующими выражениями:

$$P(t) = \exp(-\int_0^t \lambda(\Delta t) dt), P(t) = \exp(-\int_t^\infty f(t) dt).$$

Зная одну из характеристик надежности  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$  или  $f(t)$ , можно найти две другие.

Если необходимо оценить условную вероятность, можно воспользоваться следующим выражением:

$$P(t_1; t_2) = \exp(-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt) \cdot \lambda$$

Если РЭА содержит  $N$  последовательно соединенных однотипных элементов, то  $\lambda = \lambda_i N_i$ .

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

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

По статистическим данным

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

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

Правильно понимать физическую природу и сущность отказов очень важно для обоснованной оценки надежности технических устройств. В практике эксплуатации различают три характерных типа отказов: приработочные, внезапные и отказы из-за износа. Они различаются физической природой, способами предупреждения и устранения и проявляются в различные периоды эксплуатации технических устройств.

Отказы удобно характеризовать «кривой жизни» изделия, которая иллюстрирует зависимость интенсивности происходящих в нем отказов  $\lambda(t)$  от времени  $t$ . Такая идеализированная кривая для РЭА приведена на рис. 4.1.1.

Если в рассматриваемый момент времени  $t = t_x$  имеется  $N_x$  работающих изделий, а  $m_x = N_0 - N_x$  вышли из строя, то опытная статистическая вероятность безотказной работы  $P^* = N_x / N_0$ , а опытная статистическая вероятность отказов  $Q^* = (N_0 - N_x) / N_0 = m_x / N_0$ , где  $P^*$  и  $Q^*$  характеризуют частоту отказов в данном опыте и являются оценками соответствующих «математических» вероятностей, которые определяются как пределы:

$$\lim_{N_0 \rightarrow \infty} \frac{N_x}{N_0} = P; \quad \lim_{N_0 \rightarrow \infty} \frac{N_0 - N_x}{N_0} = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} \frac{m_x}{N_0} = Q, \quad P = 1 - Q.$$

«Математические» вероятности характеризуют не отдельную выборку, а всю генеральную совокупность изделий.

Определим зависимость  $P^*$  от времени, для чего рассмотрим приращение  $\Delta m_x$  на ограниченном отрезке времени  $\Delta t$ . Число элементов  $\Delta m_x$ , которое выйдет из строя за ограниченный промежуток времени  $\Delta t$ , будет пропорционально отрезку времени  $\Delta t$  и числу имеющихся в работе изделий  $N_x$ , т. е.  $\Delta m_x = \lambda_t N_x \Delta t$ , где  $\lambda_t$  — коэффициент пропорциональности, принимаемый постоянным на ограниченном отрезке времени.

Переходя к бесконечно малым приращениям  $dm_x$  и учитывая  $dm_x = -dN_x$ , получим  $dm_x = -dN_x = \lambda_t N_x dt$ ;  $dN_x/N_x = -\lambda_t dt$ . Интегрируя

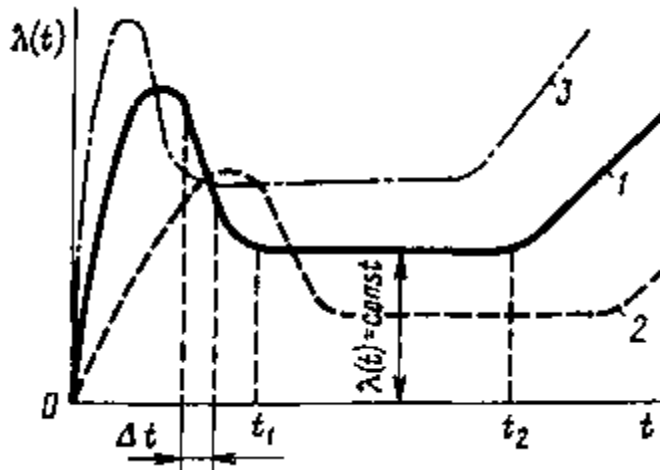


Рис. 4.1.1. Зависимость интенсивности отказов от времени последнее выражение и имея в виду, что при  $t=0$   $N_x=N_0$  найдем,

$$\ln N = -\int_0^{t_x} \lambda_t dt \text{ или, если освободиться от логарифмов, } P^* = N_x / N_0 = e^{-\int_0^t \lambda_t dt}$$

Значение  $\lambda_t$ , равное

$$\lambda_t = -\frac{dN_x}{N_x dt} = \frac{d(m_x/m_0)}{dt} \frac{1}{N_x/N_0} = \frac{dQ^*}{dt} \frac{1}{P^*} = -\frac{dP^*}{dt} \frac{1}{P^*},$$

называют *интенсивностью (опасностью) отказов*. Таким образом, интенсивность отказов в момент времени  $t$  представляет собой вероятность отказов в единицу времени при условии, что до момента времени  $t$  отказов не было.

Зависимость интенсивности отказов от времени может быть определена экспериментально (рис. 4.1.1.). Анализируя полученную кривую 1, снятую, допустим, при испытаниях в нормальных условиях, можно отметить три вре-



менных интервала: 1) от 0 до  $t_1$ —время приработки (1—1,5%) всего времени испытаний, 2) от  $t_1$  до  $t_2$  — время нормальной работы, 3) от  $t_2$  до  $\infty$  — время старения. Время приработки характеризуется повышенным числом отказов и определяется проявлением технологических и производственных дефектов, время нормальной работы — высокой надежностью испытуемых изделий (интенсивность отказов на этом интервале практически постоянна). При изготовлении изделий предприятиям рекомендуется проводить прогон изделий в течение нескольких десятков часов работы (до 2-5 суток) по специально разработанным методикам, в которых предусматривается работа при влиянии различных дестабилизирующих факторов (циклы непрерывной работы, циклы включений-выключений, изменения температуры, напряжения питания и пр.).

При ослаблении (кривая 2) или ужесточении (кривая 3) условий испытаний зависимость  $k(t)$  изменится, но три характерных временных интервала сохранятся.

Полученные ранее зависимости вероятности безотказной работы  $P(t)$  от интенсивности отказов  $\lambda(t)$  называют **экспоненциальным законом** изменения  $P(t)$ , т. е. если  $\lambda = \text{const}$ .

$$1) P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad P(t) = e^{-\lambda t}$$

Этот закон имеет место в случае учета внезапных отказов.

Известны и другие законы изменения  $P(t)$ :

2) **нормальный закон**, или **распределение Гаусса** (для постепенных отказов),

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^t e^{-(t-T_{\text{нб}})^2 / (2\sigma^2)} dt,$$

где  $\sigma$  — дисперсия среднего времени безотказной работы;  $T_{\text{ср}}$  — среднее время безотказной работы;

3) **закон Вейбулла** (при определении надежности электромеханических элементов)

$$P(t) = e^{-tk/T_{\text{ср}}} ;$$

4) **закон Эрланга** (при определении надежности восстанавливаемых изделий)

$$P(t) = (1 + 2t/T_{cp})e^{-tk/T_{cp}}$$

**Период нормальной эксплуатации.** Внезапные отказы наблюдаются во второй период ( $t_1-t_2$ ) эксплуатации РЭА. Они возникают неожиданно вследствие действия ряда случайных факторов, и предупредить их приближение практически не представляется возможным, тем более что к этому времени в РЭА остаются только полноценные компоненты. Однако и такие отказы все же подчиняются определенным закономерностям. В частности, частота их появления в течение достаточно большого промежутка времени одинакова в однотипных классах РЭА.

Физический смысл внезапных отказов может быть объяснен тем, что при быстром количественном изменении (обычно - резком увеличении) какого-либо параметра в компонентах РЭА происходят качественные изменения, в результате которых они утрачивают полностью или частично свои свойства, необходимые для нормального функционирования. К внезапным отказам РЭА относят, например, пробой диэлектриков, короткие замыкания проводников, неожиданные механические разрушения элементов конструкции и т. п.

Период нормальной эксплуатации РЭА характеризуется тем, что интенсивность ее отказов в интервале времени ( $t_1-t_2$ ) минимальна и имеет почти постоянное значение  $\lambda_{\min} \approx \text{const}$ . Величина  $\lambda_{\min}$  тем меньше, а интервал ( $t_1 - t_2$ ) тем больше, чем совершеннее конструкция РЭА, выше качество ее изготовления и более тщательно соблюдены режимы эксплуатации. Период нормальной эксплуатации РЭА общетехнического назначения может продолжаться десятки тысяч часов. Он может даже превышать время морального старения аппаратуры.

**Период износа.** В конце строка службы аппаратуры количество отказов снова начинает нарастать. Они в большинстве случаев являются закономерным следствием постепенного износа и естественного старения используемых в аппаратуре материалов и элементов. Зависят они главным образом от продолжительности эксплуатации и «возраста» РЭА.

Средний срок службы компонента до износа - величина более определенная, чем время возникновения приработочных и внезапных отказов. Их появление можно предвидеть на основании опытных данных, полученных в результате испытаний конкретной аппаратуры.

Физический смысл отказов из-за износов может быть объяснен тем, что в результате постепенного и сравнительно медленного количественного изменения некоторого параметра компонента РЭА этот параметр выходит за пределы установленного допуска, полностью или частично утрачивает свои свойства, необходимые для нормального функционирования. При износе происходит частичное разрушение материалов, при старении - изменение их внутренних физико-химических свойств.

К отказам в результате износа относят потерю чувствительности, точ-

ности, механический износ деталей и др. Участок  $(t_2—t_3)$  «кривой жизни» РЭА, соответствующий периоду износа, представляет собой монотонно возрастающую функцию, крутизна которой тем меньше (а протяженность во времени тем больше), чем более качественные материалы и комплектующие изделия использованы в аппаратуре. Эксплуатация аппаратуры прекращается, когда интенсивность отказов РЭА приблизится к максимально допустимой для данной конструкции.

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

Отказы в РЭА, содержащей большое число однотипных неремонтируемых элементов, достаточно хорошо подчиняются распределению Вейбулла. Экспоненциальное распределение основано на предположении постоянной во времени интенсивности отказов и успешно может быть использовано при расчетах надежности аппаратуры одноразового применения, содержащей большое число неремонтируемых компонентов. При длительной работе РЭА для планирования 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. Распределение Пуассона применимо для оценки надежности ремонтируемой РЭА с простейшим потоком отказов.

Один из важнейших числовых параметров надежности - среднее время безотказной работы, который определяется как математическое ожидание случайной величины, т.е.  $T_{\bar{n}0} = M_{\tau} = \int_0^{\infty} tq(t)dt$ , где  $q(t)$  — плотность вероятности отказа. Преобразуем этот интеграл к следующему виду, решив его по частям:

$$T_{\bar{n}0} = \int_0^{\infty} tq(t)dt = -tP(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t)dt$$

или

$$T_{\bar{n}0} = \int_0^{\infty} P(t)dt = 1/\lambda$$

**Структурная надежность аппаратуры.** Структурная надежность любого радиоэлектронного аппарата, в том числе и РЭА, это его результирующая надежность при известной структурной схеме и известных значениях надежности всех элементов, составляющих структурную схему.

При этом под элементами понимаются как интегральные микросхемы,

резисторы, конденсаторы и т. п., выполняющие определенные функции и включенные в общую электрическую схему РЭА, так и элементы вспомогательные, не входящие в структурную схему РЭА: соединения паяные, разъемные, элементы крепления и т. д.

Надежность указанных элементов достаточно подробно изложена в специальной литературе. При дальнейшем рассмотрении вопросов надежности РЭА будем исходить из того, что надежность элементов, составляющих структурную (электрическую) схему РЭА, задана однозначно.

Количественные характеристики структурной надежности РЭА. Для их нахождения составляют структурную схему РЭА и указывают элементы устройства (блоки, узлы) и связи между ними. Затем производят анализ схемы и выделяют элементы и связи, которые определяют выполнение основной функции данного устройства. Из выделенных основных элементов и связей составляют функциональную (надежностную) схему, причем в ней выделяют элементы не по конструктивному, а по функциональному признаку с таким расчетом, чтобы каждому функциональному элементу обеспечивалась независимость, т. е. чтобы отказ одного функционального элемента не вызывал изменения вероятности появления отказа у другого соседнего функционального элемента. При составлении отдельных надежностных схем (устройств узлов, блоков) иногда следует объединять те конструктивные элементы, отказы которых взаимосвязаны, но не влияют на отказы других элементов.

Определение количественных показателей надежности РЭА с помощью структурных схем дает возможность решать вопросы выбора наиболее надежных функциональных элементов, узлов, блоков, из которых состоит РЭА, наиболее надежных конструкций, панелей, стоек, пультов, рационального порядка эксплуатации, профилактики и ремонта РЭА, состава и количества ЗИП.

При построении надежностных структурных схем используют последовательное, параллельное и последовательно-параллельное включение элементов.

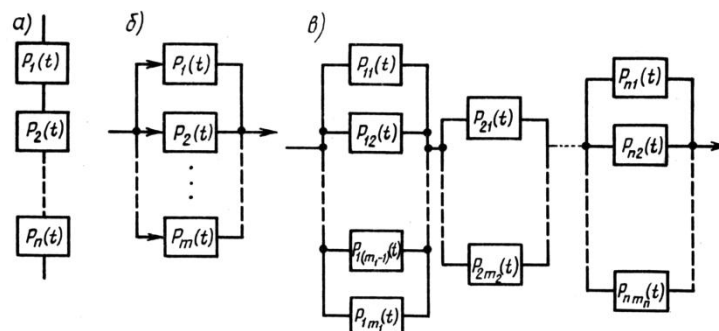


Рис.4.1.2. Схемы последовательного (а), параллельного (б) и параллельно-последовательного (в) включения элементов в надежностной структурной схеме.

При последовательном включении элементов (рис. 4.1.2, а) для надежной работы схемы необходима работа всех функциональных элементов.

Тогда вероятность безотказной работы схемы будет равна произведению вероятностей безотказной работы всех функциональных элементов:

$$P(t) = P_1(t) P_2(t) \dots P_n(t),$$

где  $n$  – число элементов схемы.

Для случая экспоненциального распределения наработки до отказа  $P_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$  среднее время наработки на отказ составит:

$$T = 1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Для другого простейшего случая построения структурной схемы параллельного соединения элементов (рис. 4.1.2, б) при вероятности отказов  $Q_i(t)$  для каждого из элементов, входящих в схему, отказ всей схемы будет иметь место тогда, когда откажут все элементы, т.е.

$$Q(t) = Q_1(t) Q_2(t) \dots Q_m(t),$$

где  $m$  - число параллельно соединенных элементов. При этом вероятность безотказной работы всей схемы:

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

Для экспоненциального распределения наработки до отказа среднее время наработки на отказ составит

$$T = (1/\lambda) + (1/2\lambda) + \dots + (1/m\lambda).$$

В общем случае, при смешанном параллельно-последовательном соединении элементов (рис. 4.1.2, в) следует найти вероятность безотказной работы для каждой из цепочек параллельно включенных элементов, а затем для всей схемы.

**Методы повышения надежности.** Методы повышения надежности можно разделить на:

- структурные ;
- информационные.

**Структурные методы повышения надежности.** Абсолютной надежности технических устройств добиться принципиально невозможно, а максимально повысить показатели их надежности реально, и это является важней-

шей научной и технической задачей. Повышение уровня надежности РЭА достигается, прежде всего, устранением причин, вызывающих в ней отказы, т. е. сведением к минимуму конструкторских, технологических и эксплуатационных ошибок.

Значительного повышения надежности РЭА достигают созданием новых элементов. Так, применение интегральных схем для построения РЭА привело к значительному повышению надежности аппаратуры третьего и четвертого поколений.

Однако повышением надежности элементов не удастся полностью решить проблему построения надежных РЭА. Поэтому один из путей повышения надежности РЭА - введение схемной избыточности.

**Повышение надежности РЭА резервированием.** Резервирование - способ повышения надежности аппаратуры, заключающийся в дублировании РЭА в целом или отдельных ее модулей или элементов. Резервирование предполагает включение в схему устройства дополнительных элементов, которые позволяют скомпенсировать отказы отдельных частей устройств и обеспечить его надежную работу. Но резервирование эффективно только в том случае, когда неисправности являются статистически независимыми. 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, то установка и включение параллельно нескольких таких же систем приводит к увеличению результирующей вероятности безотказной работы резервированной системы  $P(t)$ , которую можно определить из выражения:

$$P(t) = 1 - [1 - P_c(t)]^{m+1},$$

где  $m$  - число резервных систем, включенных параллельно основной. Так, например, при вероятности безотказной работы модуля 0,7 включение одного резервного модуля повысит вероятность безотказной работы до 0,91, а двух - до 0,973.

В РЭА применяется общее (резервируются отдельные модули), и поэлементное резервирование на уровне микросхем или отдельных элементов. При одинаковом количестве резервных элементов поэлементное резервирование эффективнее общего, но требует большого числа дополнительных электрических связей.

Постоянное резервирование в РЭА производят по следующей схеме: входные сигналы поступают на  $n$  логических схем, причем  $n > k$ , где  $k$  — число логических схем в нерезервированной схеме. Выходные сигналы всех  $n$  логических схем далее подают на решающий элемент, который согласно

функции решения по этим сигналам определяет значения выходных сигналов всей схемы. Функция решения - правило отображения входных состояний решающего элемента на множество его выходных состояний.

Простейший и наиболее распространенный вид функции решения - «закон большинства», или мажоритарный закон. Решающий элемент обычно называют мажоритарным элементом. Работа мажоритарного элемента состоит в следующем: на входы элемента поступают двоичные сигналы от нечетного количества идентичных элементов; выходной сигнал элемента принимает значение, равное значению, которое принимает большинство входных сигналов. Наиболее широко используют мажоритарные элементы, работающие по закону «2 из 3». В этих элементах значение выходного сигнала равно значению двух одинаковых входных сигналов.

Кроме того, известны мажоритарные элементы, работающие по закону «3 из 5», «4 из 7» и т. д. Схема мажоритарного элемента, работающего по закону «2 из 3» и построенного из логических элементов И и ИЛИ, основана на выражении  $z = x_1 x_2 + x_2 x_3 + x_1 x_3$  и имеет вид, изображенный на рис. 4.1.3.

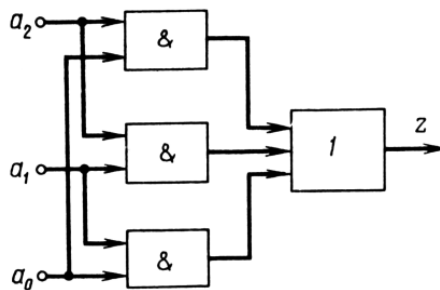


Рис. 4.1.3. Схема мажоритарного элемента «2 из 3»

По способу включения резервных элементов функциональных устройств различают три вида резервирования: постоянное, замещением и скользящее.

При постоянном резервировании предполагают, что любой отказавший элемент или узел не влияет на выходные сигналы и поэтому его прямого обнаружения не производится. Постоянное резервирование наиболее распространено в невозстанавливаемых устройствах. Кроме того, оно является единственно возможным в устройствах, где недопустим даже кратковременный перерыв в работе.

Постоянное резервирование вводится или с помощью решающего блока, или в виде однотипных элементов или блоков, включенных последовательно, параллельно или, например, согласно законам  $k$ -кратной логики.

В качестве решающего блока можно использовать мажоритарные элементы с постоянными или переменными весами, кодирующие - декодирующие устройства и схемы из логических элементов И, ИЛИ, НЕ.

Резервирование замещением предполагает обнаружение отказавшего элемента или узла и подключение исправного. Замещение может происходить

либо автоматически, либо вручную.

#### **4.2. Основы защиты РЭС от воздействий окружающей среды**

Защита от климатических воздействий среды. Выше рассматривались основные климатические факторы, оказывающие влияние на работоспособность РЭА в процессе ее эксплуатации. При этом отмечалось, что вид воздействующего фактора, а также его интенсивность и степень влияния зависят от типа климатической зоны и высоты над уровнем моря.

Рассмотрим основные направления воздействия климатических факторов и меры борьбы с ними.

**Влияние климатических факторов на конструкцию.** Влияние климатических факторов на конструкционные материалы выражается главным образом в возникновении процессов коррозии, потере механических и диэлектрических свойств, изменении электропроводности. Реакция на воздействующий фактор, степень и скорость изменения свойств конструкционного материала в зависимости от его состава различны. Процесс коррозии у металлов имеет химическую или электрохимическую природу, но причина в этих случаях одинакова: переход металла в более стабильное природное состояние. Процесс коррозии связан с отдачей энергии, что указывает на самопроизвольный ход реакции, без затраты энергии извне. Процесс химической коррозии протекает без участия влаги. При электрохимической коррозии растворение металла и возникновение новых соединений происходит с участием электролита, т. е. воды.

*Различают три вида коррозии: равномерную, неравномерную и межкристаллическую.* При равномерной коррозии процесс распространяется постепенно от отдельных корродирующих мест по всей поверхности металла. Неравномерная коррозия ограничивается отдельными местами и возникает, например, вследствие нарушения защитного покрытия. Коррозия межкристаллическая характеризуется проникновением в глубь металла путем разрыва структуры и распространением вдоль границ кристаллов. Наличие в атмосфере кислот, щелочей, солей ускоряет процессы коррозии.

Воздействие агрессивной атмосферы на изоляционные материалы выражается в поглощении ими влаги, ухудшении диэлектрических свойств и постепенном разрушении. Изоляционных пластмасс, не поглощающих влаги, не существует. Количество проникшей влаги и время ее проникновения неодинаковы для различных материалов. Проникновение влаги в изоляционные материалы может быть капиллярное и диффузионное.

Капиллярное проникновение имеет место в случае наличия в материале грубых микроскопических пор, трещин и других дефектов. Так как в микроэлектронике применяют только высококачественные изоляционные материалы, то они практически свободны от таких дефектов.



Существенно большее значение имеет процесс диффузионного проникновения, который заключается в заполнении промежутков между молекулами материала молекулами воды. При этом перемещение молекул воды происходит в сторону меньшей их концентрации. При повышенной влажности молекулы воды проникают внутрь материала (поглощение влаги), а в сухой теплой атмосфере - из материала (высыхание). Поглощение влаги диэлектриком ведет к уменьшению его сопротивления, увеличению диэлектрических потерь, набуханию, механическим повреждениям.

Плесневые грибки, как один из сильнейших биологических факторов, также могут отрицательно воздействовать на работоспособность аппаратуры. Для развития плесени необходимы большая относительная влажность воздуха (80 - 100%) и температура 25 - 37°C. Такие условия естественны для стран с тропическим влажным климатом, однако они могут возникнуть искусственно в помещениях, где эксплуатируется аппаратура.

Среди материалов, применяемых в радиоэлектронной аппаратуре, наибольшее воздействие плесень оказывает на те, которые имеют органическую основу, и, в частности, на изоляционные материалы проводных соединений.

**Защитные покрытия.** Для защиты поверхности металлических и неметаллических материалов от агрессивной внешней среды применяют различные покрытия, которые по назначению делят на три группы: защитные, защитно-декоративные и специальные.

Защитные покрытия предназначены для защиты деталей от коррозии, старения, высыхания, гниения и других процессов, вызывающих выход аппаратуры из строя.

Защитно-декоративные покрытия наряду с обеспечением защиты деталей придают им красивый внешний вид.

Специальные покрытия придают поверхности деталей особые свойства или защищают их от влияния особых сред.

*По способу получения все покрытия разделяют на металлические и неметаллические.*

**Металлические покрытия** – покрытия, нанесенные горячим способом, гальванические, диффузионные и металлические на диэлектриках.

**Неметаллические покрытия** – покрытия лаками, эмалями, грунтовками, а также противокоррозионное покрытие пластмассами.

Выбор того или иного вида покрытия в каждом конкретном случае зависит от материала детали, ее функционального назначения и условий эксплуатации.

*Для борьбы с плесневыми грибками применяют три способа:*

**Способ 1** - использование материалов, не склонных к образованию на

них плесени (применение этого метода ограничивается возможностями выбора материалов).

**Способ 2** - изменение внутреннего климата в аппаратуре, имеющее цель лишить плесневые грибки благоприятной базы для развития (здесь главным образом требуется принимать меры к снижению влажности воздуха, так как саморазогрев как отдельных микросхем, так и полностью всей аппаратуры лишает грибки благоприятной температуры).

**Способ 3** - добавление в состав лака или эмали, которыми покрывают поверхность деталей, специальных химических веществ - фунгицидов.

**Защита аппаратуры от воздействия влажности.** От прямого воздействия влаги стационарная и транспортируемая РЭА, как правило, не защищена и не должна эксплуатироваться в этих условиях. Однако на работающую аппаратуру воздействуют пары влаги окружающего воздуха. Нормальной влажностью считается относительная влажность 60...75 % при температуре 20...25 °С.

Выпадение росы (конденсация на холодных поверхностях конструкции) вызывается понижением температуры, которое практически всегда имеет место при отключении и последующем хранении аппаратуры. Например, если в течение дня влажность внутри РЭА составляла 70 %, то точка росы оказывается всего на 5 °С ниже температур, которые имели место внутри РЭА.

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

Длительное воздействие высокой влажности вызывает коррозию металлических конструкций, набухание и гидролиз органических материалов. 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.

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. С течением времени рыхлая окисная пленка может оказаться в гнездовых контактах соединителей, что приводит к трудно устранимым отказам.

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 вследствие набухания-высыхания материала. Из-за поглощения влаги значительно уменьшается электрическая прочность, что особенно сказывается на работоспособности высоковольтных узлов. 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, поддержанием внутри изделий более высокой температуры, чем температура окружающей среды, использованием поглотителей влаги, разработкой герметичной аппаратуры.

Коррозия протекает более интенсивно при контактировании материалов с существенно различными электрохимическими потенциалами. Металл с отрицательным потенциалом гальванической пары будет разрушаться тем быстрее, чем больше разница электрохимических потенциалов. Электрохимические потенциалы металлов в пресной и морской воде представлены в таб. 4.2.1.

Таблица 4.2.1

## Электрохимические потенциалы металлов

Пресная вода		Морская вода	
Металл	Потенциал, мВ	Металл	Потенциал, мВ
Серебро	+194	Серебро	+149
Медь	+140	Никель	+46
Никель	+118	Мель	+10
Алюминий	-169	Свинеп	-259
Олово	-175	Цинк	-284
Свинеп	-283	Сталь	-335
Сталь	-350	Калмий	-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, при катодном – основной металл.

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. Толщина покрытия обычно равна 1-15 мкм.

**Оксидирование** - получение окисной пленки на стали, алюминии и его сплавах. Покрытие имеет хороший внешний вид, антикоррозионные свойства, но оно микропористое и непрочное. 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. *Различают следующие виды лаковых покрытий для защиты от соответствующих видов внешнего воздействия:*

- 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.

Недостатком лаковых покрытий является то, что они требуют высокой чистоты производственных процессов и усложняют замену компонентов. При эксплуатации покрытия скалываются, шелушатся и загрязняют контакты электрических соединителей. Пары воды, попадая под покрытия, конденса-

руются и уменьшают электрическое сопротивление между разобращенными цепями. При высыхании покрытия образующиеся мосты из лака между рядом расположенными выводами компонентов передают механические напряжения на выводы и паяные соединения, увеличивая вероятность отказа паяных контактов.

**Защита от воздействия пыли.** Пыль - смесь твердых частиц малой массы, находящаяся в воздухе во взвешенном состоянии. Различают пыль естественную или природную, всегда присутствующую в воздухе, 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, неметаллические - положительно, металлические - отрицательно. Заряд частиц чаще всего возникает из-за трения.

Загрязненность воздуха пылью снижает надежность работы РЭА. Пыль, попадая в смазочные материалы и приликая к скользящим поверхностям деталей электромеханических узлов, приводит к ускоренному их износу. 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.

Оседающая на поверхности некоторых металлов пыль опасна из-за своей гигроскопичности, поскольку уже при относительно небольшой влажности пыль существенно повышает скорость коррозии. 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. Диэлектрическая проницаемость пыли выше диэлектрической проницаемости воздуха, что определяет завышение емкости между выводами компонентов и, как следствие, увеличение емкостных помех. Оседающая пыль снижает эффективность охлаждения изделия, образует на поверхностях печатных плат, не защищенных лаковым покрытием, токопроводящие перемычки между проводниками.

Пыленепроницаемость РЭА или отдельных ее устройств может быть достигнута установкой их в герметичные корпуса. Однако при этом возрастает стоимость РЭА и ухудшается температурный режим работы. Если корпус РЭА выполнен с перфорациями, пыль вместе с воздухом проникнет внутрь РЭА естественным путем либо вместе с воздушными потоками от вентиляторов. Уменьшить попадание пыли внутрь РЭА возможно установкой на венти-

ляционные отверстия мелкоячеичных сеток и противопыльных фильтров.

**Герметизация РЭА.** Герметизация узлов, блоков и шкафов РЭА 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 точечных изделий, опрессовкой герметизирующими компаундами. Компаундом называется композиция на основе органических (смола, 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.

Пропитка изделий состоит в заполнении имеющихся в них каналов электроизоляционным материалом. Одновременно с заполнением каналов при пропитке на всех элементах конструкции образуется тонкий изоляционный слой, защищающий от воздействия агрессивной среды. Одновременно с защитными функциями пропиточный материал повышает электрическую прочность изделия, скрепляет механически его отдельные элементы, во многих случаях улучшает теплопроводность. Пропитку осуществляют погружением изделий в жидкий изоляционный материал. После извлечения изделия материал отвердевает. Процесс отверждения может происходить при нормальной температуре или с внешним подогревом. При использовании полимеризующихся пропиточных материалов необходимо применять специальные ускорители.

При герметизации заливкой все свободные полости в изделии, в том числе и пространство между элементами и корпусом, заливают электроизоляционным материалом, который после отверждения образует достаточно толстый защитный слой. Заливку изделия можно производить в его постоянном корпусе или использовать для этого специальные разъемные формы, которые после отверждения материала удаляются.

Герметизация обволакиванием по технике исполнения аналогична операции пропитки, однако здесь используют вязкие изоляционные материалы, обладающие хорошей адгезией к элементам изделия. Слой материала, образующегося на поверхности деталей, сравнительно толст (от долей до нескольких миллиметров) и надежно защищает их от воздействия агрессивной среды.

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 кор-

пусов, прокладок, способов герметизации внешних электрических соединений, 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. 4.2.1). 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 мельчайшие углубления и неровности. Большие крышки требуют высокой жесткости и большого числа стяжных винтов с мелкой резьбой и для надежной герметизации изготавливаются на токарных станках.

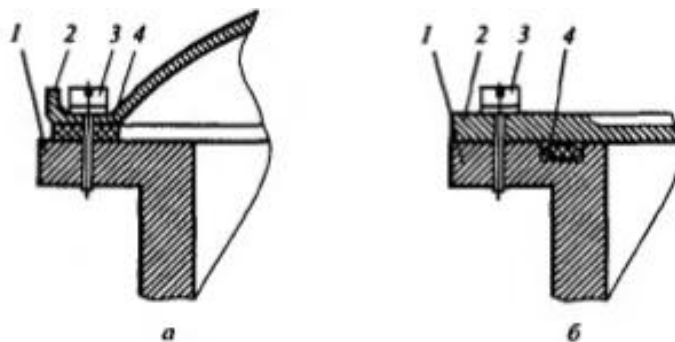


Рис. 4.2.1. Герметизация упругой (резиновой) прокладкой:

1 — корпус; 2 — крышка; 3 — винт; 4 — прокладка

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

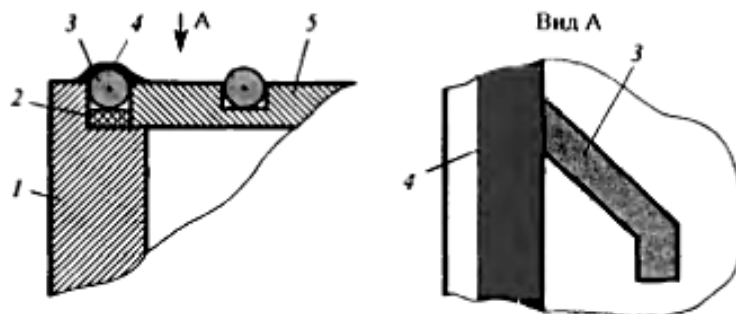


Рис. 4.2.2. Герметизация паяным швом и проволокой:  
1 - корпус, 2 - прокладка; 3 – проволока, 4 - припой, 5 – крышка

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 1 см 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. 4.2.2) по всему периметру корпуса. Конструкция



корпуса изделия должна допускать неоднократное выполнение операций разгерметизации/герметизации. В углубление корпуса 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.

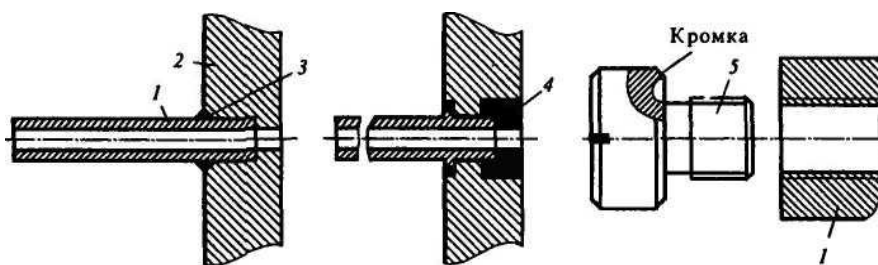


Рис. 4.2.3. Трубки-клапаны откачки воздуха:

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. 4.2.3, 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. 4.2.3, в).

Элементы управления и индикации герметизируются резиновыми чехлами, мембранами, электрические соединители — установкой на прокладки (рис. 4.2.4, а), заливкой компаундами (рис. 4.2.4, б), выходы жгутов — резиновыми зажимными шайбами (рис. 4.2.4, 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.

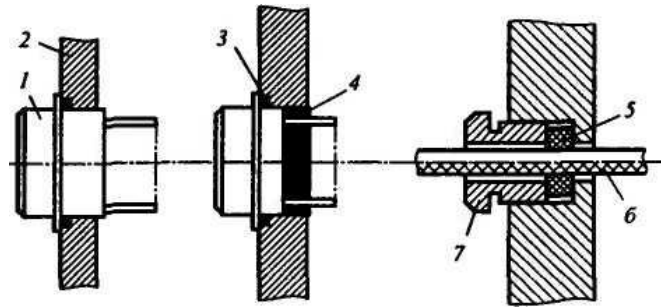


Рис. 4.2.4. Герметизация соединителя (*а, б*) и выхода жгута (*в*):  
 1 — соединитель; 2 — корпус; 3 — прокладка; 4 — компаунд; 5 — зажимная шайба; 6 — жгут; 7 — втулка

### 4.3. Основы защиты РЭС от тепловых воздействий

Тепловой режим работы аппаратуры характеризуется совокупностью температур отдельных его точек — температурным полем. Температурный режим создается как внешним температурным воздействием окружающей среды, так и тепловой энергией, выделяемой радиоэлементами самой аппаратуры. В зависимости от стабильности во времени тепловой режим может быть стационарным или нестационарным.

Неизменность температурного поля во времени характеризует стационарный режим. Зависимость температурного поля от времени характерна для нестационарного режима. Этот режим имеет место в тех случаях, когда собственная теплоемкость аппарата соизмерима с количеством теплоты, выделяемой при работе. Обычно нестационарный режим имеет место при одиночных и кратковременно повторяющихся тепловых нагрузках.

По характеру направленности теплового потока разделяют термоактивные и термопассивные элементы. Термоактивные элементы служат источниками тепловой энергии, а термопассивные — ее приемниками.

Микросхемы и радиоэлементы функционируют в ограниченных температурных диапазонах. Отклонение температуры от указанных диапазонов может привести к необратимым 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.

Настоящее и будущее аппаратуры связано с использованием достаточно больших мощностей в сравнительно малых объемах. Это приводит к резкому увеличению плотности мощности рассеяния, а, следовательно, и плотности рассеиваемой теплоты. Поэтому при конструировании аппаратуры особое значение приобретает разработка методов отвода теплоты, регулирования и контроля температуры.

Если температура в любой из точек блока не выходит за допускаемые пределы, то такой тепловой режим называется нормальным.

**Нормальный тепловой режим** - это 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 РЭА является нормальной и равной 20-25 °С. Изменение температуры относительно нормальной 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.

Работоспособность при низких температурах обеспечивается саморазогревом аппаратуры перед работой или, при необходимости, нагревом электрическими нагревательными элементами, устанавливаемыми для стационарной аппаратуры в помещении (что должно быть оговорено в инструкции по эксплуатации), для транспортируемой - встроенными в конструкцию. При применении нагрева должно обеспечиваться автоматическое выключение нагревателей после прогрева аппаратуры. Следует избегать интенсивного прогрева, так как при этом пары воды внутри прибора конденсируются на поверхностях конструкции до тех пор, пока не осядет избыточная влага в воздухе.

**Охлаждение аппаратуры.** Чаще 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.

**Кондукция** - процесс переноса тепловой энергией между находящимися в соприкосновении телами или частями тел за счет теплопроводности тел.

**Конвекция** — перенос энергии макрочастицами газа или жидкости.

**Перенос теплоты излучением** происходит за счет превращения тепловой энергии в энергию излучения (лучистая энергия).

В реальных условиях теплообмен осуществляется одновременно двумя или тремя видами, что делает проблематичным точный расчет температурного поля. Поэтому на практике расчет проводится, как правило, для наиболее эффективного вида теплообмена, который принимается для данного блока, прибора, системы за основной. Для стационарной аппаратуры используются в основном способы охлаждения теплопроводностью, воздушное естественное и принудительное, а также принудительное воздушное с дополнительным охлаждением жидкостью в трубопроводах. При высоких требованиях к стабильности параметров схем применяют термостатирование узлов и блоков. Способы охлаждения могут быть охарактеризованы коэффициентом теплоотдачи  $[Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)]$ , значения которого для различных систем охлаждения приведены ниже.

Система охлаждения	Коэффициент теплоотдачи К, Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)
Естественная, воздушная, излучением	2-10
Принудительная воздушная	10-150
Естественная жидкостная	200-600

Принудительная жидкостная	300-3000
Испарительная	500-120000

**Теплоотвод кондукцией.** С увеличением плотности компоновки РЭА большая доля теплоты удаляется кондукцией, т.е. передачей тепловой энергии от нагретого элемента к элементу с меньшей температурой.

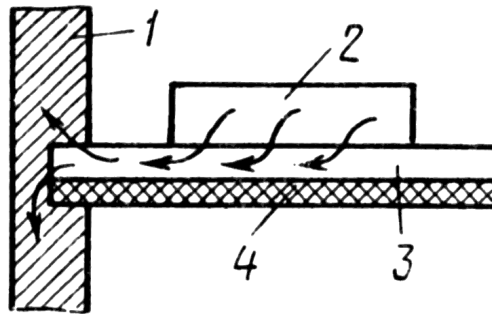


Рис. 4.3.1. Охлаждение кондукцией  
1- стенка прибора, 2- интегральная схема, 3- теплоотвод, 4-печатная плата.

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  $Q_k$  (кал/с), передаваемое в статическом режиме кондукцией, определяется по выражению

$$Q_k = c_m \Delta t S/l,$$

где  $c_m$  — коэффициент теплопроводности, кал/(с·см·°С),  $S$  - площадь, через которую проходит тепловой поток, см<sup>2</sup>,  $l$  - длина пути передачи теплоты, см,  $\Delta t$  - разность температур между охлаждаемой конструкцией и окружающей средой, °С.

Для увеличения эффективности теплообмена путем теплопроводности необходимо увеличивать площадь теплопроводящей поверхности, уменьшать путь передачи теплоты, использовать материалы с высокой теплопроводностью.

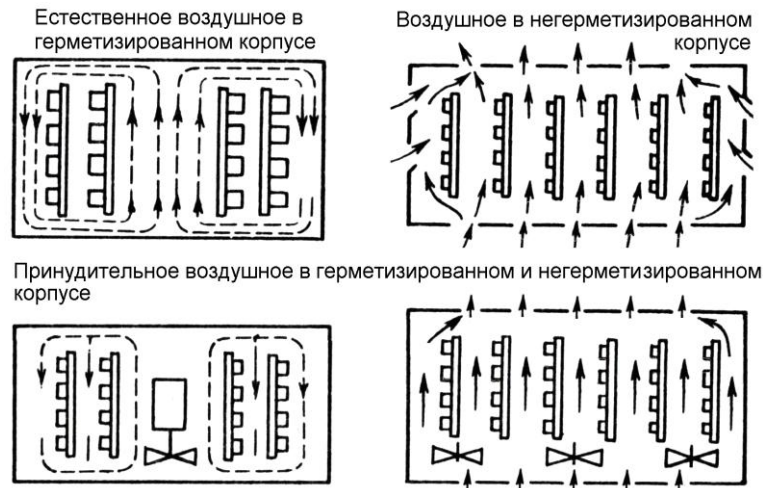


Рис. 4.3.2. Виды охладений

**Теплоотвод конвекцией.** Естественное и принудительное воздушное охлаждение наиболее просты и доступны. Теплота от нагретых корпусов радиоэлементов передается окружающей атмосфере за счет естественной конвекции. Эффективность естественного воздушного охлаждения тем больше, чем больше разность температур между корпусом и окружающей средой и чем больше площадь поверхности корпуса. Имеет также значение плотность окружающей среды, при уменьшении которой отвод теплоты от поверхности элементов уменьшается.

Принцип охлаждения естественной конвекцией основан на том, что слои воздуха, нагреваясь от выделяющих теплоту элементов и обладая вследствие этого меньшей плотностью, перемещаются вверх и замещаются более холодными слоями. Чем больше объем замещаемого воздуха, тем лучше теплообмен. Эффективность теплообмена зависит от места расположения элементов в объеме аппаратуры. Так, при вертикальном расположении модулей (плат) воздушному потоку ничего не препятствует и теплые слои воздуха быстро заменяются холодными. При горизонтальном расположении плат смена слоев воздуха затруднена, вследствие чего нагрев элементов происходит в большей степени. В худшем положении находятся элементы в верхней части корпуса, так как здесь замещения теплых слоев холодными практически не происходит.

Качество естественного воздушного охлаждения зависит от мощности, выделяемой аппаратурой во время работы в виде теплоты, формы и габаритных размеров корпуса и площади его поверхности. Улучшение охлаждения можно получить искусственным увеличением площади поверхности корпуса, например введением специальных ребер — радиаторов.

Существенное улучшение теплового режима достигается введением специальных вентиляционных отверстий в дне и крышке корпусов (рис. 4.3.3) аппаратуры. В этом случае в приборы поступают извне холодные слои воздуха, которые вытесняют теплые слои через отверстия в крышке. При необхо-

димости такие отверстия следует предусматривать и в боковых стенках корпусов в виде жалюзи. Суммарная площадь вентиляционных отверстий в дне (крышке) прибора должна составлять 20...30 % сечения конвективных потоков воздуха. Входные вентиляционные отверстия должны располагаться как можно ниже. Чтобы не препятствовать поступлению свободных конвективных потоков воздуха внутрь прибора, между установочной поверхностью и дном должен быть зазор 20-30 мм. С внутренней стороны кожуха вентиляционные отверстия часто закрывают защитными металлическими сетками.

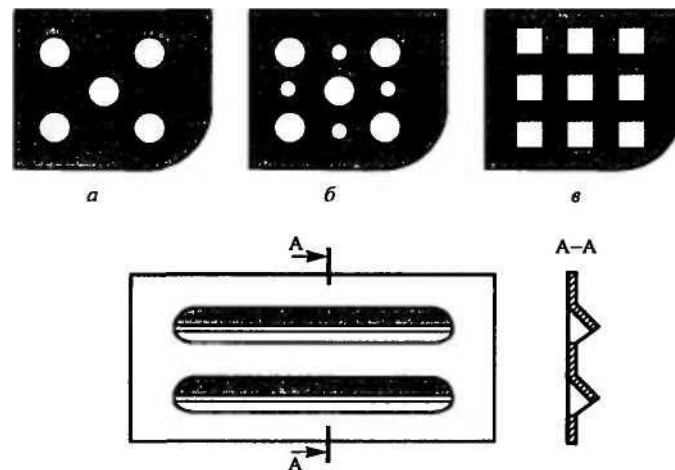


Рис. 4.3.3. Вентиляционные отверстия (а, б, в) и жалюзи (z) кожухов

Естественное охлаждение используется с плотностью тепловых потоков от охлаждаемых поверхностей не более  $0,05 \text{ Вт/см}^2$ . При этом 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 и защищать тепловыми экранами. Блестящий экран сокращает лучистый тепловой поток приблизительно вдвое. В целях выравнивания температуры внутри аппаратуры теплонагруженные модули должны иметь высокую степень черноты, внутренние поверхности кожухов и каркасов окрашиваются черными красками или лаками. При компоновке аппаратуры необходимо избегать образования «ловушек тепла», в которых отсутствуют конвективные потоки воздуха.

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:

$$Q = 4,18 \cdot 10^{-4} h_c S \Delta t ,$$

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

стоянная, 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:

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

Необходимо защищать аппаратуру от прямого попадания солнечных лучей. При отвесном падении солнечных лучей на прибор имеет место превышение температуры металлических поверхностей (в градусах Цельсия): без покрытия - 24; окрашенных в белый цвет - 13; серый - 21; черный - 27.

**Принудительное воздушное охлаждение.** При принудительном воздушном охлаждении теплоотвод от внутренних полостей корпуса РЭА осуществляется движущимися потоками воздуха, объем и скорость движения которых определяются вентиляторами. Оно широко используется в аппаратуре с тепловыделением не более  $0,5 \text{ Вт/см}^2$  и выполняется по схемам подачи воздуха снизу вверх и сверху вниз. Забор воздуха снизу, где имеет место наибольшее количество пыли, приводит к повышенной запыленности аппаратуры, охлаждение сверху вниз - к меньшей запыленности, но требует большего расхода воздуха.

Чем ниже температура охлаждающего воздуха и выше скорость его движения, тем эффективнее принудительное воздушное охлаждение. Применяются приточная, вытяжная и приточно-вытяжная схемы вентиляции. 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, что обеспечивает большую производительность. Вытяжную схему вентиляции можно рекомендовать в аппаратуре с большими аэродинамическими сопротивлениями.

Вентиляторы устанавливаются либо непосредственно в прибор, либо в специальные блоки с креплением на корпусе прибора или каркасе стойки. В блоках обычно размещают вентиляторы, противопыльный фильтр, элементы сигнализации и аварийного отключения.

Появление шума и вибраций в результате работы вентиляторов являются недостатками принудительного охлаждения, однако 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  $\Delta t$ , равно:

$$Q = c m \Delta t,$$

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

Расход воздуха для охлаждения, м<sup>3</sup>/час:

$$V_p = 860 kP/cp \Delta t ,$$

где  $k$  - коэффициент (обычно  $1,25$ ), учитывающий утечку охлаждающего воздуха через неплотности в конструкции;  $P$  - потребляемая мощность, кВт;  $p$  — плотность воздуха (при  $0^\circ\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении  $H = 1,293$  кг/м<sup>3</sup>).

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

Системы охлаждения с жидкими хладагентами применяют только для достаточно больших измерительно-вычислительных систем.

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

Режим работы аппаратуры характеризуется длительностями включенного и выключенного состояний и бывает длительным, кратковременным, кратковременно-повторным. Длительный режим свойствен стационарной аппаратуре, которая находится во включенном состоянии в продолжение многих часов и дней, кратковременный - бортовой, время непрерывной работы которой исчисляется несколькими часами. При проектировании сложной аппаратуры с длительным временем включенного состояния, как правило, возникнет необходимость в разработке принудительной системы охлаждения (СО). Решение о разработке СО для аппаратуры кратковременно-повторного режима работы принимается лишь после анализа режима работы аппаратуры. Переносная РЭА в силу малых рассеиваемых мощностей принудительной СО не снабжается.

Необходимость разработки СО выявляет тепловой анализ РЭА. 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 и объемные тепловые потоки модулей высших уровней. По значениям плотности теплового потока  $q_s$  и  $q_v$  в первом приближении выбирают систему охлаждения по

допустимому перегреву в 40°C.

Плотность тепловых потоков аппаратуры

Способ охлаждения	Плотность тепловых потоков аппаратуры	
	Негерметичная $q_s$ , Вт/см <sup>2</sup> , не более	Герметичная $q_v$ , Вт/см <sup>3</sup> , не более
Естественная кон- векция	0,05 0,50	0,02 0,45
Принудительная	0,65	0,60

В сложной аппаратуре необходимо использовать принудительную воздушную или водо-воздушную СО. Воду – воздушной СО снабжаются, например, ЭВМ в герметичном исполнении. 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.

Водо-воздушную систему охлаждения можно рекомендовать для изделий с высокими плотностями компоновки элементов. Отвод теплоты от блоков 2 (рис. 4.3.3) 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 (рис. 4.3.3, а) конструктивно проста, но требует большого расхода жидкого хладагента. Введение в систему теплообменника 3 (рис. 4.3.3, 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.

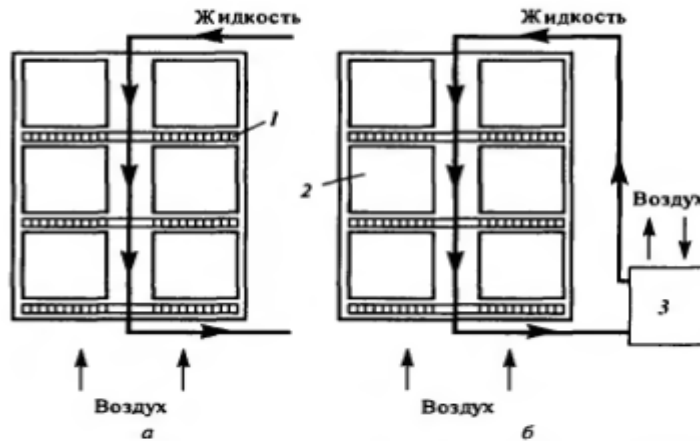


Рис. 4.3.3. Проточная (а) и одноконтурная замкнутая (б) водо-воздушные системы охлаждения: 1 — охладитель; 2 — охлаждаемый блок; 3 — теплообменник

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.

Принудительное воздушное охлаждение автономными вентиляторами широко используется в аппаратуре с тепловыделением не более  $0,5 \text{ Вт/см}^2$  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 большего 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 большую 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.

## ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ КОНСТРУКЦИЙ РЭС

### § 3.1. Влияние теплового режима на эффективность и качество конструкций РЭС

*Тепловой режим* характеризуется совокупностью температур всех элементов, из которых состоит РЭС, т. е. его температурным полем (рис. 3.1). Основными тенденциями эволюции современных РЭС в микроэлектронном исполнении являются увеличение их сложности и снижение габаритов, с одной стороны, и увеличение требований к стабильности параметров—с другой. Эти тенденции противоречивы, так как увеличение сложности и уменьшение габаритов приводят к увеличению напряженности теплового режима, а требование обеспечения стабильности параметров системы связано с необходимостью его облегчения.

Увеличение напряженности теплового режима характеризуется плотностью теплового потока, который в конце 60-х годов составлял 0,1...0,3 Вт/см<sup>2</sup>, в 70-е годы — 0,5... 1,0 Вт/см<sup>2</sup>, а в перспективе к 2000 г. ожидается, что он составит 8... 10 Вт/см<sup>2</sup>. Эффективность и качество конструкций РЭС в значительной степени зависят от их способности отводить теплоту. Так, удельная мощность на единицу объема и массы составляет для источников вторичного электропитания на дискретных элементах и печатных платах 20...30 Вт/дм<sup>3</sup> и 25...30 Вт/кг соответственно, на микросборках в металлическом корпусе—100... 150 Вт/дм<sup>3</sup> и 60...80 Вт/кг и на основе металлических подложек, охлаждаемых жидкостью,—200...300 Вт/дм<sup>3</sup> и 180...300 Вт/кг. Эти данные приведены без учета параметров системы охлаждения, масса, габариты, потребляемая мощность, стоимость, надежность которых могут быть соизмеримы с параметрами охлаждаемого источника питания.

В процессе производства, хранения и эксплуатации РЭС может подвергаться воздействию положительных и отрицательных температур, обусловленных влиянием окружающей среды, объекта установки и тепловыделения самого РЭС. В наземных условиях температура окружающей среды может меняться от — 88 °С (станция Мирный в Антарктиде) до + 90 °С (нагрев темных поверхностей в странах с жарким и сухим клима-

том). Диапазон изменения температуры в атмосфере на высотах до 80 км (рис. 3.2) может достигать +100 °С. Для космоса этот диапазон еще шире: от —150 до + 300 °С, что является результатом прямого и отраженного от Земли излучения Солнца, собственного излучения Земли, космического излучения, экранирования от излучения планет и частей объекта установки РЭС.

Диапазоны изменения температуры внутри объектов, где установлены РЭС, достигают в отапливаемых помещениях + 5... +50 °С; на наземных подвижных объектах — 60... +60 °С; на самолетах — 70... +150 °С и т.д. Кроме того, на объекте установки аппаратуры могут быть локальные источники тепла (двигатели) и холода (баки с охлажденным горючим, резервуары с охладителем для повышения чувствительности фотоприемников). Само РЭС является, как правило, источником теплоты вследствие того, что его КПД менее 100%. КПД приемника на электровакуумных лампах составляет менее 1%, модулей активной фазированной антенной решетки — около 1... 1,5%, транзисторного усилителя — 50...60%, т.е. значительное количество подведенной к аппаратуре энергии выделяется в виде теплоты. Если эта энергия не рассеивается в элементах конструкции или окружающем пространстве, то повышаются температура устройства и интенсивность отказов (например, для блоков РЭС с воздушным охлаждением при изменении температуры от 40 до 70° С интенсивность отказов увеличивается в 2...6 раз; рис. 3.3). Если температура в любой точке температурного поля РЭС не выходит за допустимые (с точки зрения надежности элементов) пределы, то тепловой режим называется *нормальным*.

Тепловой режим характеризуется напряженностью и стационарностью. Если плотность теплового потока не превышает 5 мВт/см<sup>2</sup> (перегрев поверхности аппаратуры относительно окружающей среды не более 0,5 °С), то режим считается *нетеплонапряженным*. В теплонапряженном режиме требуется обеспечение нормального теплового режима, например за счет естественной конвекции.

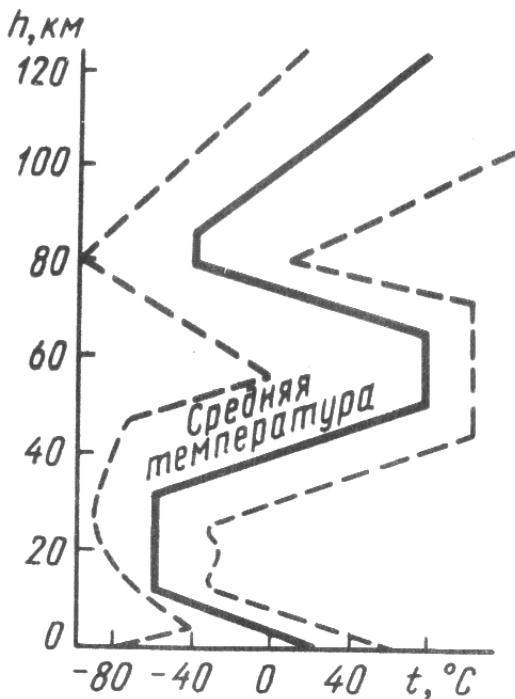
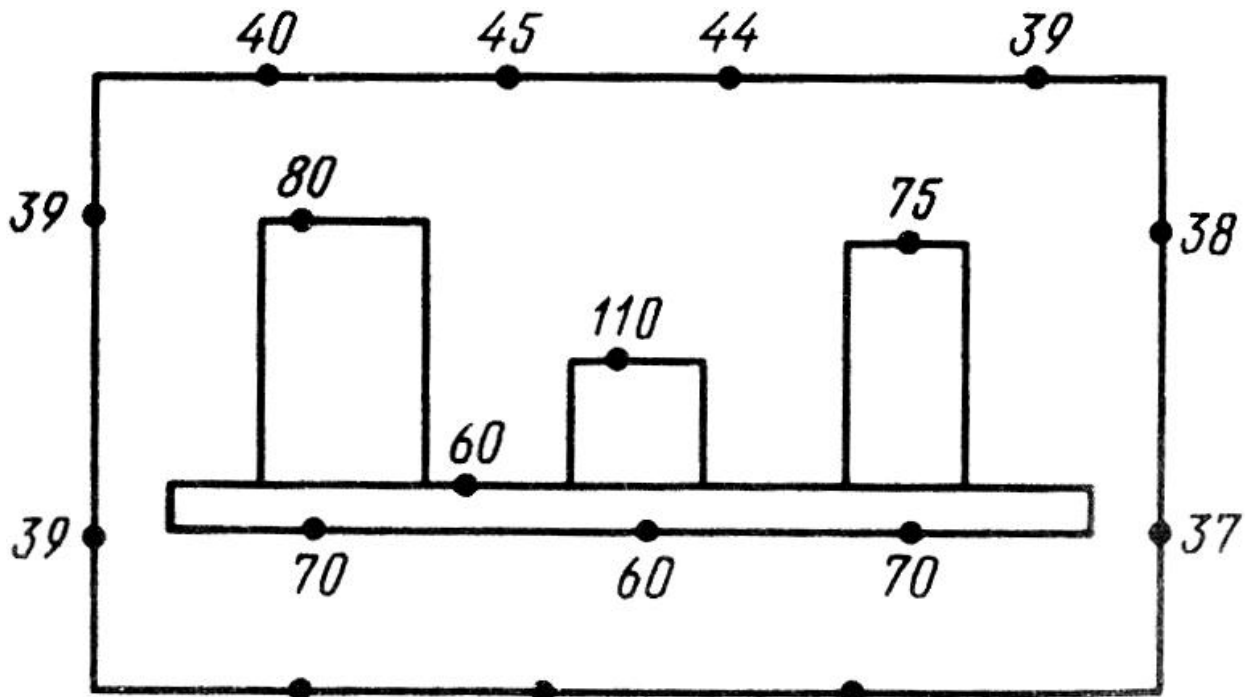


Рис. 3.2. Изменение температуры атмосферного воздуха в зависимости от высоты

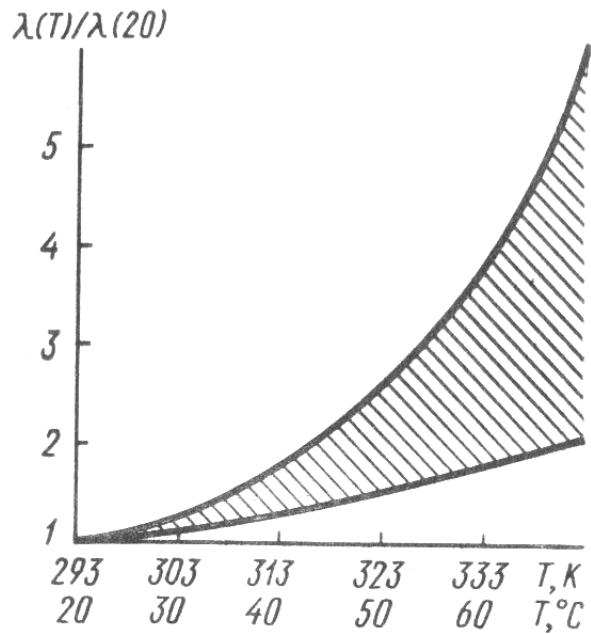


Рис. 3.3. Изменение интенсивности от-казов  $\lambda$  с температурой для РЭСс воздушным охлаждением

*Стационарный тепловой режим* характеризуется неизменностью температурного поля во времени вследствие наступления термодинамического баланса между источниками и поглотителями тепловой энергии. *Нестационарный тепловой режим* характеризуется зависимостью температурного поля от времени. Этот режим имеет место при быстром изменении подведенной к РЭС мощности  $P$  (включении и выключении, разовых и

повторно-кратковременных режимах работы), когда часть ее идет на нагрев конструкции ( $P_n$ ), часть рассеивается в окружающем пространстве ( $P_p$ ) и часть идет на обеспечение полезных функций РЭС ( $P_{\Pi}$ ). Баланс энергии в этом случае описывается соотношением  $P = P_{\Pi} + P_p + P_n$ . Тепловой режим становится стационарным, когда в результате установившегося термодинамического равновесия между окружающей средой и изделием нагрев изделия прекращается ( $P_n = 0$ ) и соотношение для баланса энергии имеет вид  $P = P_{\Pi} + P_p$ .

Воздействие отрицательных и положительных температур может снизить надежность устройства. Различают параметрическую надежность, характеризующую постепенным отклонением выходных параметров от номинальных значений, и надежность, характеризующую интенсивностью внезапных (катастрофических) отказов. *Причинами постепенных отказов*, вызванных тепловыми воздействиями, являются: снижение изоляционных свойств материалов; увеличение токов утечки; снижение пробивного напряжения; изменение коэффициента усиления и нулевого тока коллектора транзистора; изменение параметров магнитных сердечников (снижение индуктивности насыщения при повышении температуры или пропадание магнитных свойств при достижении точки Кюри); изменение емкости конденсаторов, электрической прочности, потерь; изменение сопротивлений резисторов; увеличение тепловых шумов в резисторах и транзисторах и т. д. Все эти явления могут привести к искажению сигналов до уровня, при котором нормальное функционирование РЭС становится невозможным.

*Внезапные отказы РЭС*, вызванные изменением температуры, обусловлены: нарушением целостности элементов конструкции вследствие различия ТКЛР ее материалов (обрыв проводников; растрескивание металло-стеклянных спаев; отслаивание и растрескивание подложек; появление внутренних напряжений, приводящих к нарушению паяных, сварных и клеевых соединений, растрескиванию компаундов; заклинивание кинематических пар и т. д.); замерзанием влаги, приводящим к расширению микротрещин в подложках; отслаиванием печатных проводников, расслаиванием МПП; конденсацией влаги, создающей закорачивающие перемычки и условия для возникновения электрохимической коррозии; затвердеванием или размягчением резины, что снижает качество герметизирующих прокладок и элементов амортизации; изменением вязкости смазок; выделением

газообразных составляющих из диэлектрических конструкционных материалов, что ведет к снижению электрической прочности и образованию агрессивных сред; старением припоев (перекристаллизация, образование пор) и т. д.

Электрорадиоэлементы и механические части РЭС характеризуются *термостойкостью*, под которой понимается способность материалов и компонентов кратковременно выдерживать воздействие высоких и низких температур, а также резких изменений температуры (термоударов). Термостойкость определяют по температуре, соответствующей началу существенных изменений свойств или параметров компонентов, обусловленных различными физико-химическими процессами. Например, термостойкость /7-и-переходов транзистора ограничена при высоких температурах собственной проводимостью кристалла полупроводника, а также явлением кумулятивного разогрева, приводящего к недопустимому возрастанию нулевого тока коллектора и пробую  $\wedge$ -«-перехода. Считается, что допустимая температура для германиевого перехода составляет 85... 110°C, для кремниевого 125... 150 °С, для непропитанных волокнистых материалов (бумага, картон, натуральный шелк) +90 °С; для материалов из стекловолокна, пропитанного эпоксидными лаками, +133 °С. В тех случаях, когда конструкция не обеспечивает нормального теплового режима обычных элементов, могут быть использованы элементы, работающие в широком температурном диапазоне благодаря введению устройств термокомпенсации. Это усложняет электрическую схему и конструкцию, ухудшает энергетические и массогабаритные параметры, стоимость РЭС и не всегда обеспечивает требуемую надежность.

### § 3.2. Системы обеспечения теплового режима РЭС

Для обеспечения теплового режима РЭС используются системы обеспечения нормального теплового режима (СОТР), каждая из которых характеризуется особенностями структуры, интенсивностью теплоотвода, техническими показателями (массой, габаритами, потребляемой мощностью, стоимостью, надежностью и т. д.).

*Особенности структуры СОТР* определяются:

- режимом работы системы, зависящим от соотношения температуры внешней среды и температуры РЭС (нагревание, охлаждение, термостабирование);



- характером связи хладагента с внешней средой (хладагент — внешняя среда, хладо-агент изолирован от внешней среды, комбинированная система);
- режимом работы РЭС (непрерывный, периодический);
- способом передачи теплоты (конвекция, теплопроводность, излучение, за счет термоэлектрического эффекта; комбинированный способ);
- способом поглощения теплоты (за счет термоаккумулирующих свойств окружающей среды и материалов конструкции, за счет термоэлектрического эффекта).



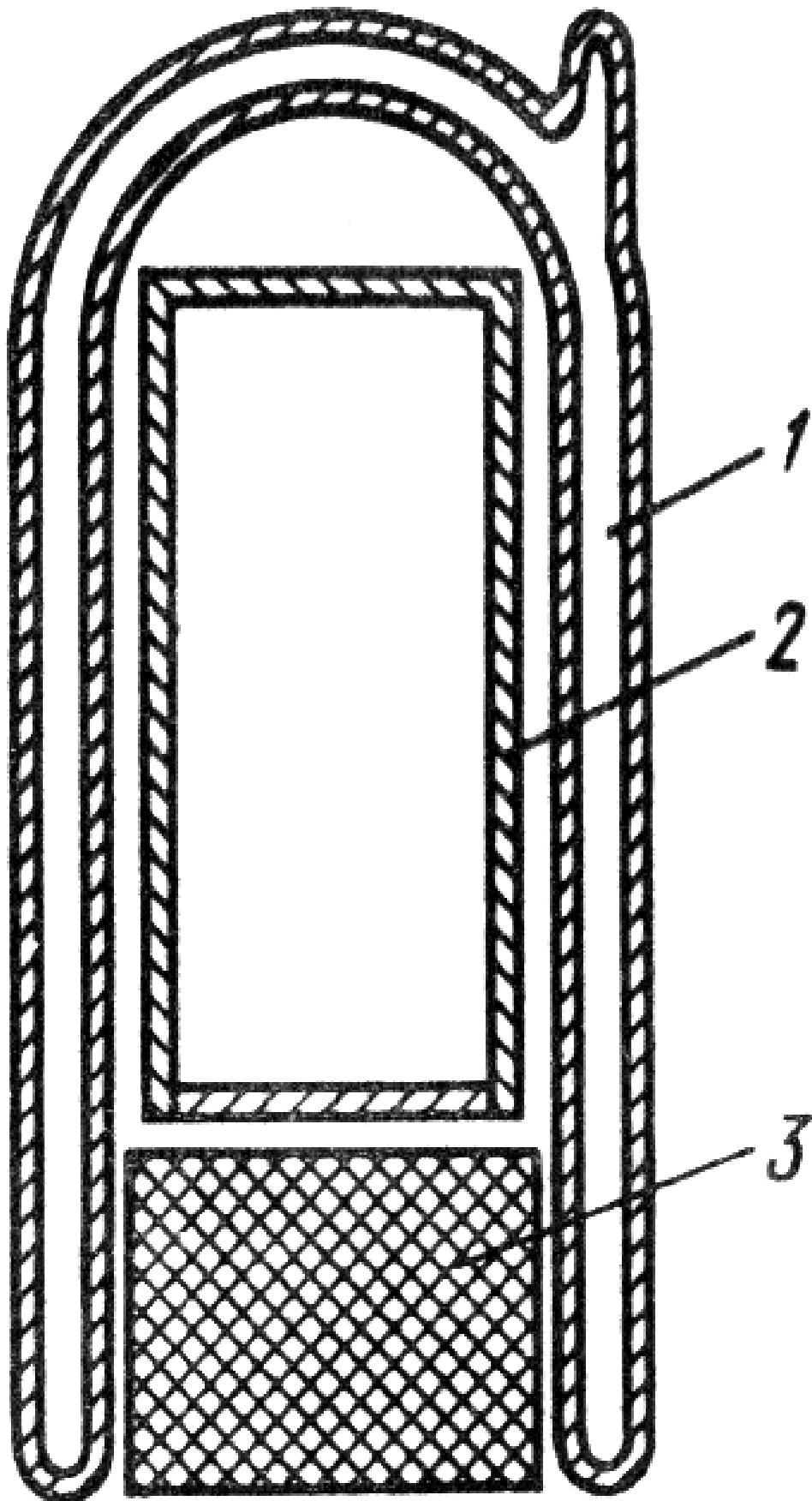


Рис. 3.4. Пассивный термостат:



Кроме того, структура СОТР определяется областью использования с учетом условий, в которых работает система (на Земле, в атмосфере, в космосе, стационарно, на подвижном объекте и т. д.), уровнем разукрупнения РЭС (ИС, ячейка, блок, стойка и т. д.), видом аппаратуры (лазер, мощный прибор СВЧ, быстродействующая ЭВМ и т. д.).

Если средняя температура окружающей среды близка нормальной для РЭС, то система должна обеспечить изоляцию от влияния быстрых изменений температуры внешней среды. Это достигается применением пассивных (теплоизоляция, отражающие покрытия) или активных (нагрев, охлаждение, реверс) *систем термостатирования*. Если средняя температура окружающей среды значительно отличается от нормальной для РЭС, то используются системы для уменьшения этой разности путем дополнительного нагревания или охлаждения РЭС до средней температуры окружающей среды. Охлаждение используется в тех случаях, когда необходимо уменьшить влияние выделяющейся в аппаратуре теплоты, отвести тепловой поток от аппаратуры и затем рассеять его. Это осуществляется с помощью различных систем охлаждения, для которых имеют значение такие факторы, как способ передачи теплоты, тип хладагента и его связь с окружающей средой, режим работы аппаратуры и способ поглощения теплоты.

В тех случаях, когда объект не содержит нестабильных источников теплоты и мала теплопроводность внешних электрических связей, защиту объекта от быстрых внешних тепловых воздействий можно осуществить с помощью теплоизоляции: вакуумной (сосуд Дьюара); экранно-вакуумной (табл. 3.2); специальными материалами (табл. 3.1). Простейшим пассивным термостатом является сосуд Дьюара (рис. 3.4), который применяют для термостатирования малогабаритных узлов. Сосуды с диаметром внутренней полости 25 мм и внешним диаметром 40 мм при длине 90 мм устойчивы к воздействиям вибрации в диапазоне частот от 10 до 200 Гц при ускорении до 15 g и к ударным перегрузкам с ускорением до 150 g. Сосуд Дьюара имеет теплопроводность, значительно меньшую теплопроводности пористой изоляции, при равной толщине. Если волокнистую, порошковую или ячеистую изоляцию расположить в вакууме (например, между стенками сосуда Дьюара), то коэффициент теплопроводности  $X$  снижается на два порядка, например для аэрогеля до 0,02 мВт/(м-

К). Достоинствами изоляции теплоизоляционными материалами являются сравнительно низкая стоимость (перлит), низкий коэффициент теплопроводности (аэрогель), высокая эффективность (вакуумно-стекловолоконная теплоизоляция диаметром волокна около 1 мкм, удельной плотностью 150...200 кг/м<sup>3</sup>, с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,5...0,6$  мВт/(м·К) в диапазоне температур 300... 79 К).

Таблица 3.1

### Характеристики теплоизоляционных материалов при нормальном давлении и температуре

Материалы	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, сДж/(кг·°С)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Гигроскопичность массы, %
Волокнистые:				
минеральная вата	0,03 - 0,04	0,75	100 - 150	1
стекловата	0,027 - 0,047	0,8	50 - 120	1
стекловолокно	0,041 - 0,048	0,8	100 - 120	
Пористые:				
аэрогель	0,015 - 0,018	0,7	50 - 100	50
перлит	0,025 - 0,034		80 - 100	1 - 6
Специальные:				
пеностекло	0,028	1,24	80 - 100	1,5 - 5
минераловатное	0,03 - 0,032	1,1	40 - 50	40
пеностекло	0,06..0,1	0,72	100 ..400	1

Таблица 3.2

**Параметры композиций экранно-вакуумной многослойной изоляции при оптимальной плотности (граничные температуры 293 ... 300 и 77 ... 90 К, давление  $10^{-3}$  Па)**

Материал	Характеристики прокладок		Число слоев толщины многослойной структуры	Плотность $\rho$ , г/м <sup>3</sup>	Коэффициент $\lambda$ , мВт/(м·К)
	материал	Толщина, мм, (поверхностная плотность $\sigma$ , г/м <sup>2</sup> )			
Отожженная алюминиевая фольга толщиной 6-3	Стеклобумага	(22)	20	98	0,05
Полиэтилентерефталатная пленка толщиной 5-12 микрометрированная с двух сторон алюминированная с одной стороны полиэфиртерефталатная пленка 5-12 мкм	Стекло-сетка ЭР	0,2(10)	20	125	0,005
	Стекло-сетка ЭРТИ	(7)	20	80	0,015
	Лимпдан (прокладка из бланковой алюминированной пленки)	0,012	8	16	0,2

Дальнейшего уменьшения  $\lambda$ , можно достичь, используя для космических объектов или для сосудов Дьюара экранно-вакуумную изоляцию, представляющую собой чередующиеся слои тонкой (5... 15 мкм), обычно алюминиевой, фольги и изолирующих прослоек из стеклобумаги, капроновой сетки, рифленой полиэтилентерефталатной пленки (майлара) и других материалов. Высокая эффективность теплоизоляции достигается благодаря как высокой экранирующей способности (коэффициенты экранирования слоев перемножаются), так и низкой теплопроводности между слоями. Конструктивно такая теплоизоляция представляет многослойные (8 ... 60 слоев на 1 см толщины) маты шириной 0,5...1,5 м, длиной до 10 м, толщиной 10...30 мм. Из этих матов можно сшивать многослойные защитные экраны, повторяющие форму защищаемых устройств. Подобная изоляция может также располагаться и между стенками сосуда Дьюара. Для уменьшения потерь на теплопроводность расстояние между экранирующими слоями должно быть в 10 раз больше толщины диэлектрических прокладок (рис. 3.5). Иногда металлическая пленка толщиной 0,02...0,04 мкм напыляется на основание из полиимидной или майларовой пленки. Для уменьшения эффективного коэффициента теплопроводности  $X_{\text{эф}}$  пленка может золотиться. Для лучших 60-слойных структур  $\lambda_{\text{эф}} = 0,014...0,017$  мВт/(м·К), а масса их в несколько раз меньше массы порошковых материалов. Алюминиевая фольга имеет высокую отражающую

способность, малую массу, низкую стоимость. Для изготовления экранов используют мягкую фольгу, отожженную при температуре 400...450 °С и имеющую шероховатость поверхности  $R_z = 0,025 \dots 0,05$ . Для снижения степени черноты содержание примесей в алюминии не должно превышать 0,5%. Фольга тоньше 5 мкм имеет малую прочность, а толще 15 мкм— способствует увеличению теплового потока по твердому телу.

В качестве межслойных прокладок используют пленку толщиной 0,005 ...0,012 мм и иногда в качестве основы экранов — рифленую полиэтилентерефталатную пленку (ПЭТФ-ОА), позволяющую обходиться без прокладок.

При конструировании пассивных термостатов необходимо учитывать, что увеличение теплового сопротивления теплоизоляции целесообразно лишь до величины, равной тепловому сопротивлению электрических выводов из термостатируемого объема. Если колебания температуры внутри камеры превышают допустимое значение, то между камерой и объектом термостатирования должен быть размещен тепловой демпфер, в противном случае — материал с хорошей теплопроводностью.

Активное термостатирование позволяет поддерживать температуру с необходимой точностью, что особенно важно для таких объектов, как задающие генераторы частоты. В большинстве случаев термостатируется не сам объект, а изотермическая камера с объектом (рис. 3.6). По точности поддержания температуры различают грубые ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ), средней точности ( $\pm 0,1 \dots 0,5^\circ\text{C}$ ) и прецизионные ( $\pm 0,05^\circ\text{C}$ ) системы активного термостатирования



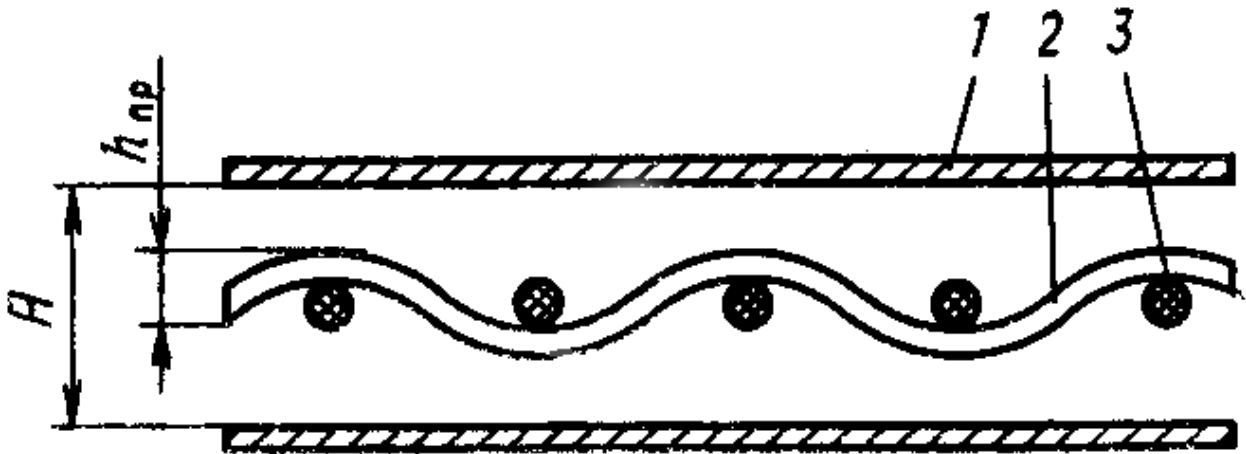


Рис. 3.5. Структура экранно-вакуумной теплоизоляции: 1—металлическая фольга; 2, 3—теплоизоляционные нити;  $H$ —расстояние между слоями фольги;  $h_{пр}$ —толщина прокладки

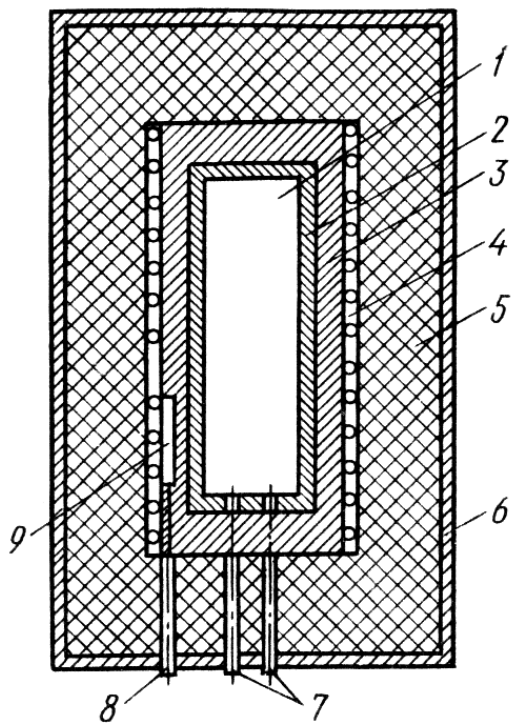


Рис. 3.6. Активный термостат с подогревателем:

1 — объект термостатирования; 2—теплоизоляция теплового демпфера; 3—изотермическая камера; 4—

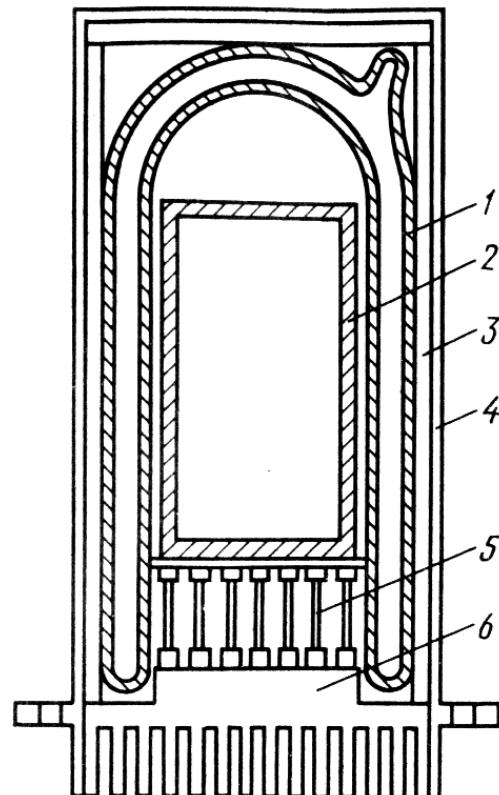


Рис. 3.7. Активный термостат с термобатареями:

1—сосуд Дьюара; 2—камера термостата; 3—прокладка; 4—кожух; 5—термоэлементы; 6—радиатор

РЭС. В состав активных термостатов входят измерители температуры (датчики), подогреватели (охладители), изотермические камеры, системы регулирования. Толщина стенок изотермической камеры должна выравнять температурный градиент, вызванный распределением теплового потока нагревателя (охладителя). В термостатах высокой точности поддержания температуры стационарных устройств внутреннюю камеру изготавливают из красной меди, в термостатах меньшей точности и бортовых устройствах — из алюминия и его сплавов. При проволочном нагревателе толщина стенок термостатов составляет 1... 3 мм; при пленочном нагревателе толщину стенок камеры можно уменьшить до 0,5...1мм; в термостатах высокой точности толщину стенок камеры желательно увеличивать до 3... 10 мм. Тепловое сопротивление между датчиком температуры и камерой термостата должно быть минимальным, воздушные зазоры недопустимы. Постоянная времени датчика должна быть меньше, чем время изменения возмущающего воздействия. Для уменьшения тепловых потерь внешняя теплоизоляция камеры должна иметь максимально возможное тепловое сопротивление. Для малогабаритных термостатов высокой точности рекомендуется применять вакуумную, вакуумно-порошковую и особенно вакуумно-слоистую изоляцию. При использовании пористой изоляции вместо вакуумной энергопотребление термостата из-за потерь возрастает в 3,8 ...4,2 раза. Одна из конструкций малогабаритных термостатов представлена на рис. 3.7, где в качестве активного элемента применена термобатарей.

Если разница между средними температурами среды и аппаратуры велика, то используют СОТР, работающие *в режиме нагрева или охлаждения*. Нагрев используют для РЭС, работающих в северных, высокогорных районах или в открытом космосе (в тени). В остальных случаях используют СОТР, служащие для охлаждения.

Система обеспечения теплового режима может охватывать отдельные узлы, блоки или систему в целом. Так, жидкостная СОТР часто используется только для охлаждения мощных приборов СВЧ в передатчиках, а блоки обработки информации ею не охватываются. Стационарные РЭС имеют, как правило, общую СОТР.

Вещество, отводящее теплоту, называется *хладоагентом*. Это может быть газ, жидкость, твердое тело. В качестве хладоагента может быть использована окружающая среда (воздух для аппаратуры наземных и низколетящих объектов; вода (для аппаратуры, устанавливаемой на плав-

средствах); материалы конструкции РЭС (при отводе тепла за счет теплопроводности). Для высоколетящих объектов или РЭС с большой теплонапряженностью, установленных на летательных аппаратах, использование в качестве хладагента окружающей среды нецелесообразно. В комбинированных СОТР в качестве хладагента выступают как окружающая среда, так и другие вещества. Изоляция хладагента позволяет создавать высокоэффективные автономные (например, самолетные) жидкостные системы.

Режим работы аппаратуры влияет на тепловой режим и конструкцию СОТР. Аппаратура может работать непрерывно или периодически. Непрерывный режим работы бывает иногда кратковременным (РЭС головки наведения противотанковой ракеты).

Возможности того или иного вида СОТР и их конструкция в значительной степени определяются способом передачи теплоты (теплообмена): конвекция, теплопроводность, излучение.

### § 3.3. Теплоотвод конвекцией

**Перенос теплоты конвекцией** связан с движением жидкой или газообразной среды, соприкасающейся с твердым телом (элементом конструкции). Тепловая энергия передается при конвекции как между твердым телом и средой, так и в самой среде. Конвекция называется естественной, если она осуществляется при свободном движении среды за счет разности плотностей холодной и горячей ее областей, и принудительной, если движение среды происходит за счет внешних сил (вентилятора, насоса). В невесомости естественная конвекция отсутствует. Конвекционный теплообмен может быть усилен поглощением теплоты при испарении (парообразовании). Передача теплоты с помощью конвекции подчиняется закону Ньютона — Рихмана:  $P_{\text{кв}} = aS\Delta T$ , где  $P_{\text{кв}}$  — мощность теплового потока, Вт, переносимого при конвективном теплообмене газом или жидкостью в окружающую среду или из окружающей среды;  $a$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией от компонента к окружающей среде, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $S$  — площадь поверхности теплоотдачи, м<sup>2</sup>;  $\Delta T$  — перегрев поверхности относительно окружающей среды или среды относительно поверхности, К.

Значения  $a$  для различных конвективных способов охлаждения приведены в табл. 3.3. Конкретное значение  $a$  определяется физико-механическими и ки-

нематическими свойствами жидкостей или газов, скоростью их перемещения; формой, шероховатостью и размерами поверхностей, соприкасающихся с хладагентом, и т. д. Например, на интенсивность теплообмена при свободной конвекции влияет около десяти физических и геометрических величин. На основе теории подобия можно объединить физические и геометрические параметры; в этом случае тот же процесс можно описать с помощью небольшого числа безразмерных комплексов. К наиболее используемым безразмерным комплексам относятся следующие критерии подобия: Нуссельта ( $Nu$ ), Грасгофа ( $Gr$ ), Прандтля ( $Pr$ ), Рейнольдса ( $Re$ ) и др. Они определяются соотношениями

$$Nu = \alpha L / \lambda; \quad Gr = g \beta \Delta t L^3 / \nu; \quad Pr = \nu / a; \quad Re = VL / \nu,$$

где  $\lambda$ , — коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К);  $\beta$  — коэффициент объемного расширения жидкости или газа, 1/К;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости среды, м<sup>2</sup>/с;  $a$  — коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $g$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $V$  — скорость потока жидкости или газа, м/с;  $L$  — определяющий размер конструкции, м (это может быть длина обтекания элемента или узла конструкции, длина пластины или цилиндра). Коэффициент  $\alpha$  можно вычислить через коэффициент Нуссельта:  $\alpha = Nu \lambda / L$ .

Таблица 3.3

### Значения коэффициентов теплопередачи $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Охлаждающая сред, процесс	Движение среды	
	свободное	вынужденное
Газ	2...10	10...100
Вязкая жидкость (масла)	200...300	300... 1000
Вода	200...600	1000... 3000
Кипящая вода	500...40 000	500...40 000

На основании значения критериев подобия можно определить характер течения хладагента (ламинарное, турбулентное), от которого зависят эффективность теплоотвода (величина  $\alpha$ ) и уровень шума, вызванного движением хладагента. Так, при теплообмене естественной воздушной

конвекцией в неограниченном пространстве (проводной монтаж одиночными проводниками) условие ламинарного течения:  $GrPr = 1000 \dots 500$ , для вынужденной конвекции — это условие  $Re < 4 \cdot 10^4$ . Для теплообмена при вынужденном движении в трубах  $Re < 2200$  и значение критерия Нуссельта может быть найдено из зависимости  $Nu_{л.мп.} = 0,15 \sqrt[3]{ReGr}^{0.1} Pr_c^{0.43} (Pr_c / Pr_{мп.})^{0.25} \varepsilon_L$ , где  $Nu_{л.мп.}$  — значение критерия Нуссельта для случая, ламинарного течения жидкости в трубе;  $Pr_c$  — коэффициент Прандтля для охлаждающей среды (жидкости) в центре потока;  $Pr_{мп.}$  — коэффициент Прандтля для жидкости в пристенном участке;  $\varepsilon_L$  — поправочный коэффициент, зависящий от соотношения диаметра и длины трубы и определяемый по таблице. Аналогичные экспериментально найденные формулы существуют и для других вариантов конвективного теплообмена; они могут быть взяты из справочных материалов.

Системы воздушного конвективного теплообмена (естественного или принудительного) используются в 90...95% наземных РЭС. Применение этих систем для бортовых РЭС ограничено из-за больших габаритов системы воздушного охлаждения и низкой плотности воздуха на высоте более 12 км.

Для интенсификации воздушного охлаждения широко используют теплообменники с развитой поверхностью (рис. 3.8), называемые радиаторами. При выборе конструкции радиатора следует учитывать тип производства. В единичном производстве применимы радиаторы, изготовляемые фрезерованием (рис. 3.8, б, г), а в серийном производстве может быть использовано литье под давлением (рис. 3.8, б, в) или штамповка (рис. 3.8, г, д). Спиральный радиатор имеет высокую эффективность, но низкую технологичность из-за трудности равномерной припайки спиралей к пластинам. Радиаторы, показанные на рис. 3.9 а — в, используют за рубежом (Япония) благодаря меньшим габаритам и стоимости воздушной системы охлаждения по сравнению с жидкостной.

Для принудительного воздушного охлаждения стоек, шкафов, пультов и блоков часто используют малогабаритные осевые вентиляторы (табл. 3.4, рис. 3.10). К недостаткам этих вентиляторов относится высокий уровень шума и сравнительно небольшой напор воздуха (это затрудняет их использование для РЭС, имеющих значительное аэродинамическое сопротивление воздушных каналов). Для принудительной вентиляции сложных

стационарных РЭС используют центробежные вентиляторы (табл. 3.5, рис. 3.11) значительной мощности и габаритов, работающие на приток (рис. 3.11, а), приток или вытяжку (рис. 3.11, в) или приток/вытяжку (рис. 3.11, б, г). Перегородка 3 на рис. 3.11, в позволяет разделить верхнюю и нижнюю части стойки с целью уменьшения перепада температуры. На рис. 3.11, д показан характер изменения температуры по высоте стойки (рис. 3.11, г). Для снижения температуры использованы трубы водяного охлаждения.

Таблица 3.4

### Характеристики малогабаритных осевых вентиляторов

Тип вентилятора	Параметр				Размеры вентиляторов для компоновки РЭС, мм			Масса, КГ
	производительность, м <sup>3</sup> /мин	скорость вращения, мин <sup>-1</sup>	потребляемая мощность, Вт	звуковое давление, дБ	диаметр крыльчатки	сторона фланца	высота корпуса	
ВМ-2	2,5	2200	20	65		129	39	0,6
ВВФ-36	0,25					40	32	0,5
ВВФ-45	0,35	2800	16	60		50	40	0,6
ВВФ-56	0,45					62	42	0,7
ВВФ-71	0,75	2850	22	55		80	42	0,8
ВВФ-90	1,50	2820	20	55		100	42	0,9
ВВФ-112М	2,30	2720	20	48		120	42	1,0
ВВО-140М	1,5				140	80	60	1,2
ВВО-180М	3,50				180	80	70	1,3
ВВО-224М	6,50	2310	20	55	224	100	75	1,5
ВВО-280М	10,0				280	100	80	2,0

Таблица 3.5

### Характеристики вентиляторов для подвижных РЭС

Тип вентилятора	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Напор, Па	Тип двигателя	Потребляемая мощность, Вт	Скорость вращения, мин. <sup>-1</sup>	Габариты, мм	Масса, кг
Осевой	700	120	УАД-74	30	1280	300 x 300 x 165	4,2
Осевой	300	60	УАД-32	7	2700	235 x 235 x 128	1,2
ВН-8	—	—	—	25	2750	140 x 140 x 190	0,8
Центробежный	1500	600	АОЛ-2-22-4	1500	1450	605x612x610	78
Ц13-69							1,6
Центробежный						9x165x75120	0,5
Осевой	2200	240	АОЛП-12-10	270	4600	270 x 270 x 278	6,7

В тех случаях, когда необходимо интенсифицировать тепло-отвод при одновременном снижении уровня шума, используют жидкостные конвективные системы охлаждения. Ввиду того, что жидкий хладагент имеет более высокий коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  (из-за большой удельной теплоемкости и плотности), его скорость (а следовательно, и шум) может быть снижена. Однако поглощение выделяемой теплоты окружающей средой требует, как правило, применения (рис. 3.12) жидкостно-воздушных теплообменников, создающих шум, но расположенных вне охлаждаемого объекта. Уровень шума можно уменьшить используя теплообменники типа жидкость-жидкость (например, поглощать энергию за счет нагрева забортной или водопроводной воды).

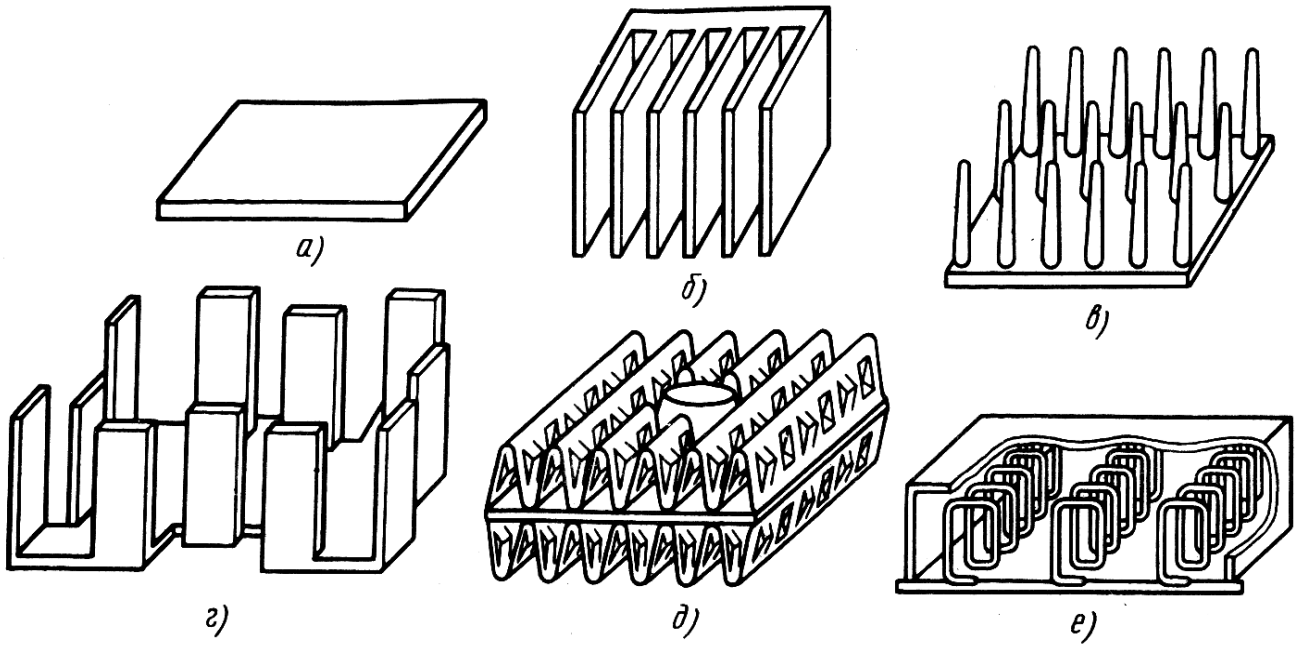


Рис. 3.8. Радиаторы воздушного охлаждения:

а) в виде пластины б) в виде параллельных пластинок в) в виде трубок г) в виде пластинок, расположенных в шахматном порядке д) в виде гофрированных пластинок



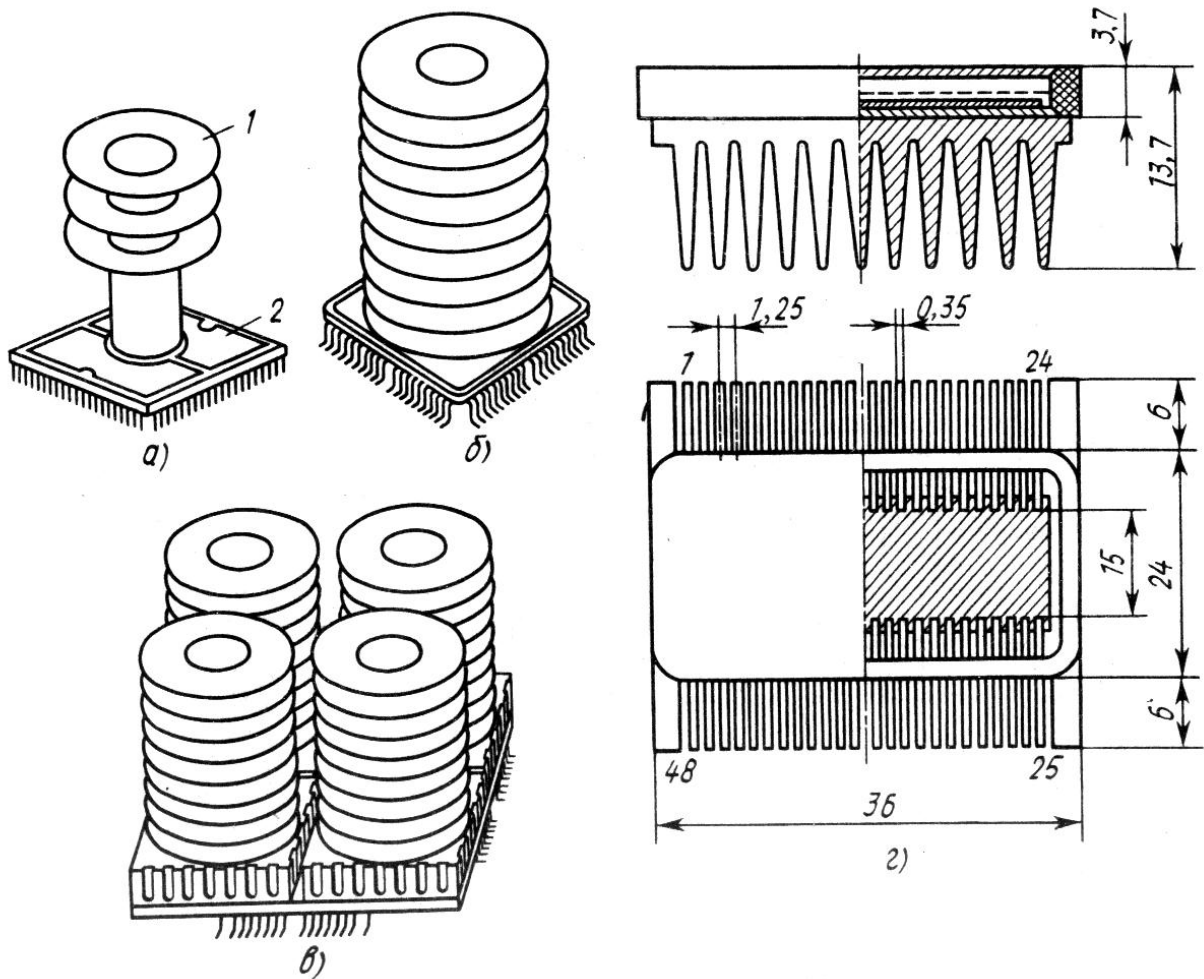


Рис 3 9 Радиаторы воздушного охлаждения для БИС:

*a* - 3-реберный радиатор; 1 - дисковые ребра, 2 - БИС;  $P=3 \text{ Вт}$ ; *б* - 10-реберный радиатор;  $P=10 \text{ Вт}$ ; *в* - микросборка

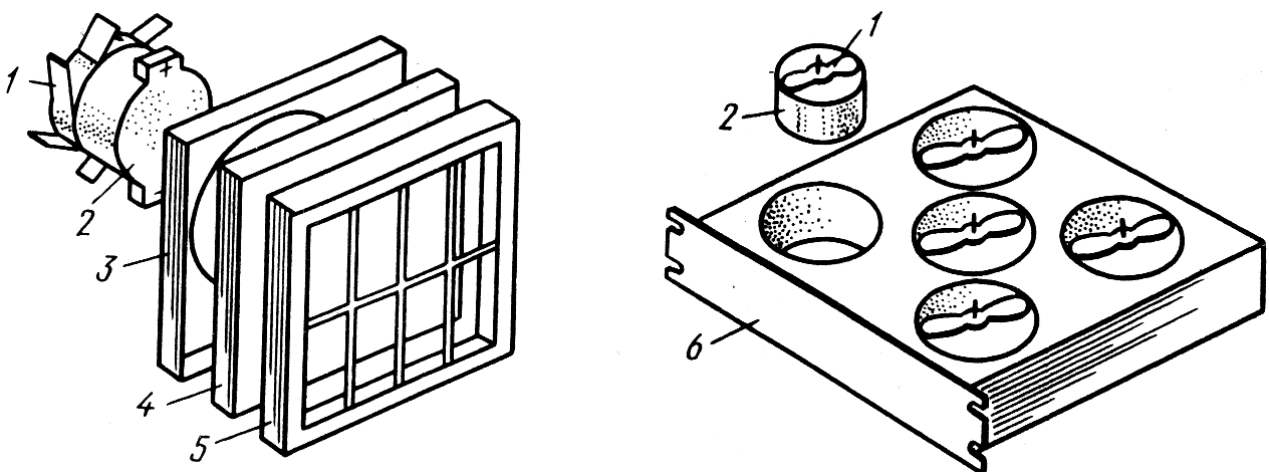


Рис. 3.10. Конструкция блоков охлаждения:

1 — крыльчатка; 2—электродвигатель; 3 — несущая панель; 4—фильтр от пыли; 5—защитная ре-

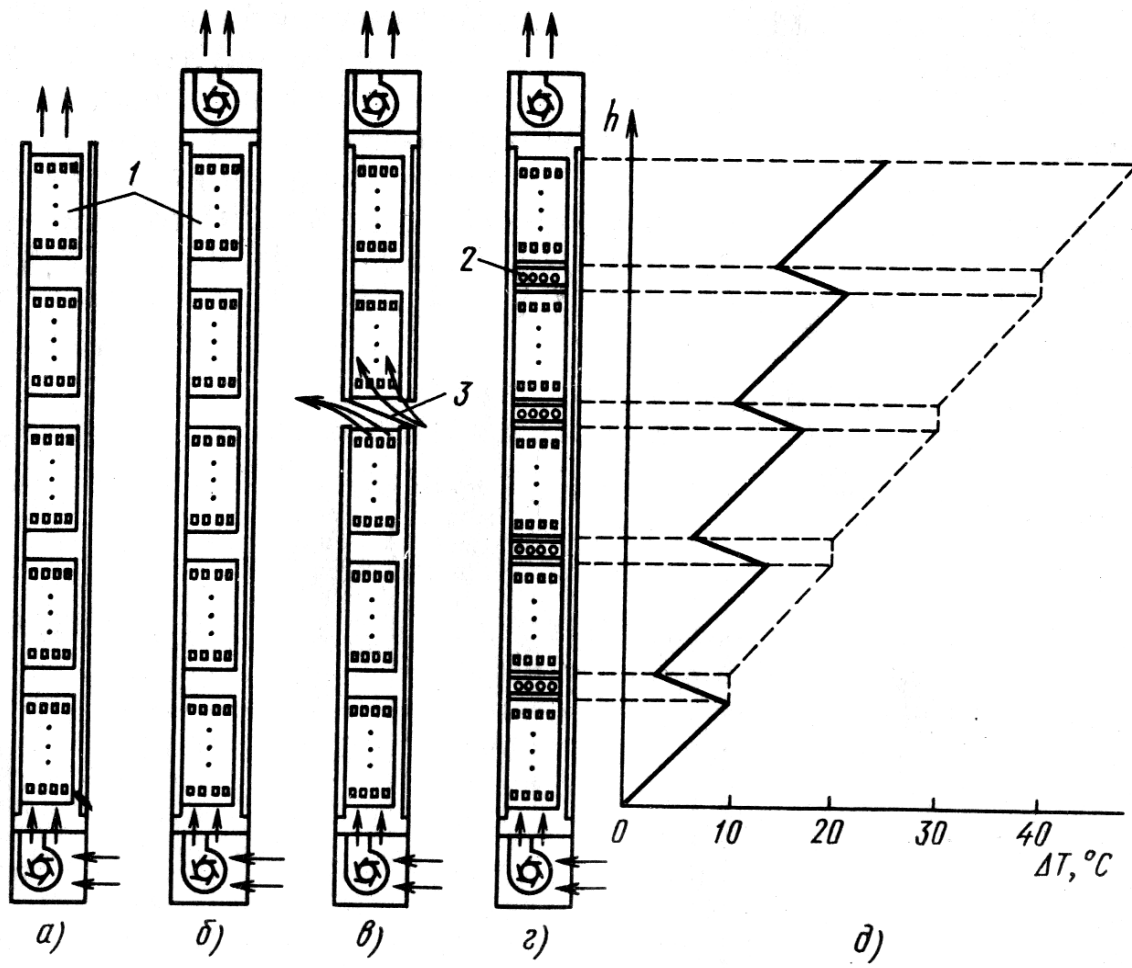


Рис. 3.11. Варианты различных принудительных систем воздушного охлаждения

Жидкостные СОТР являются сложными системами, что обуславливает их высокую стоимость при изготовлении и эксплуатации. Тем не менее эти системы широко используют в бортовых РЭС, так как удельная масса лучших самолетных жидкостных СОТР составляет 9... 11 кг на киловатт отводимой мощности. Обычно жидкостные СОТР разрабатывают и поставляют специализированные субподрядные организации. Хладагент в жидкостных системах может быть изолированным от охлаждаемых элементов и транспортироваться с помощью трубопроводов (рис. 3.12) либо непосредственно омывать охлаждаемые элементы (рис. 3.13). Охлаждающая жидкость, в которую погружаются элементы (например, генераторные лампы), должна обладать рядом свойств: химической инертностью по отношению к металлам и диэлектрикам (примерно такой же, как сжиженные инертные газы); небольшой и сравнительно стабильной во всем температурном диапазоне диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon = 1,6 \dots 1,9$ ); небольшими потерями ( $\text{tg}\delta < 2 \cdot 10^{-3}$ ) в диапазоне частот до 500 МГц; высокой электрической прочностью (до 200 кВ/см) при температурах кипения, не ухудшающейся после многократных электрических пробоев; теплофизическими свойствами, лучшими, чем у трансформаторного масла и кремнийорганических жидкостей. Этим требованиям в наибольшей степени сегодня удовлетворяют (табл. 3.6) фторорганические жидкости (фреоны). Кроме того, фреоны позволяют осуществить теплоотвод при сравнительно низких температурах (из-за низкой температуры кипения). Однако в будущем производство и применение фреона будет ограничено по экологическим соображениям. В системах с изолированным жидким теплоносителем используют воду, аммиак и др., иногда в качестве хладагента применяют этиленгликоль. Эти жидкости могут быть использованы и для испарительно-конденсационных систем.

Таблица 3.6

**Основные параметры жидкостей, используемых в испарительных СОТР (при нормальном давлении)**

Жидкость	Температура, С		Теплота парообразования, кДж/кг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
	кипения	плавления		
Вода	+ 100	0	2259	1000
Этиловый спирт	+ 78	-115	860	790
Аммиак	-33	-78	1370	683
Углекислота	-79	-57	575	1155

При разработке жидкостных систем следует учитывать, что причинами коррозии компонентов СОТР могут быть электрохимическая активность, высокая температура, органические и механические примеси, рентгеновское излучение. Поэтому для исключения коррозии следует избегать использования материалов, далеко отстоящих друг от друга в ряду активности. Нежелательно применять резины, особенно в системах, использующих в качестве теплоносителя смеси этиленгликоля с дистиллированной водой. Шланги, в том числе и гибкие, следует выполнять из полиэтилена, а трубопроводы — из нержавеющей стали. Для уменьшения передачи вибрации применяют металлические сильфонные шланги. Использование шлангов, имеющих разъемы с автоматическими клапанами, исключающие вытекание жидкости при разборке, позволяет улучшить ремонтпригодность жидкостной СОТР (возможен ремонт без слива жидкости). Общим достоинством жидкостных и испарительных систем является постоянство температуры охлаждающей среды. Однако если температура превышает некоторое критическое значение, то у стенки образуется сплошная пленка пара и эффективность теплоотвода падает. Теплоотвод ухудшается и при наличии ламинарной пленки при течении теплоносителя. Применение различных систем конвекционного теплоотвода иллюстрирует диаграмма, представленная на рис. 3.14, где по оси ординат отложен перегрев  $\Delta T$  поверхности элемента относительно окружающей среды, по оси абсцисс — плотность теплового потока  $g$ . Верхнюю часть диаграммы используют для выбора системы охлаждения крупных элементов — мощных ламп, магнитов, дросселей и т. д., нижнюю — для выбора системы охлаждения блоков и стоек микроэлектронной аппаратуры.

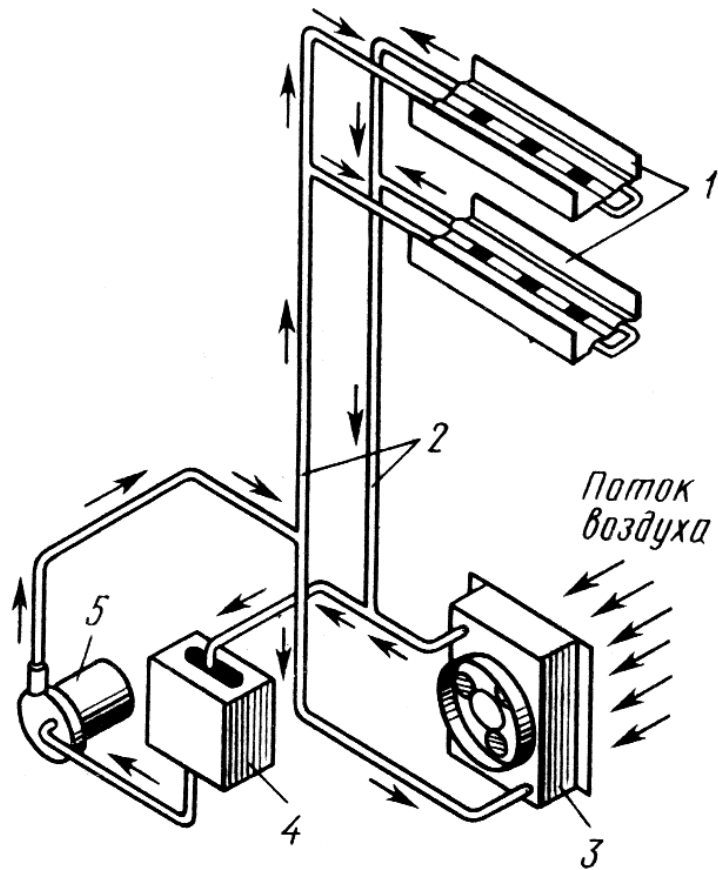


Рис. 3.12. Система жидкостного охлаждения оснований двух блоков:

1 – охлаждаемые основания; 2 – система трубопроводов; 3 – воздушно-жидкостный радиатор с вентилятором; 4 – бак-накопитель

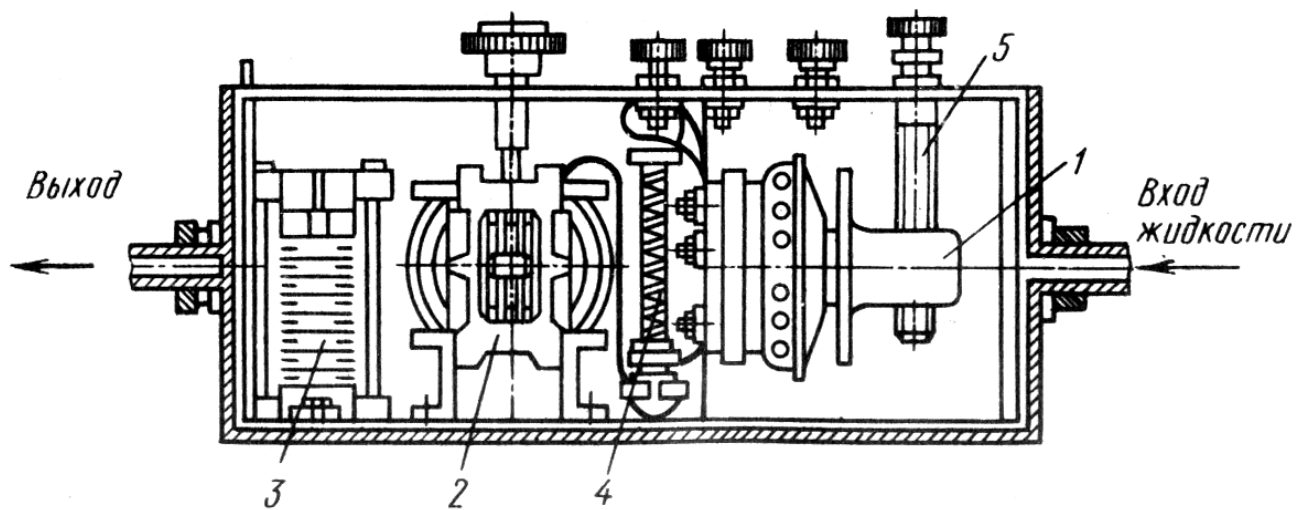


Рис. 3.13. Конструкция экспериментального высокочастотного блока собранного на лампе ГУ-27А:

1-лампа; 2- шаровой вариометр; 3-конденсатор постоянной емкости для связи с антенной; 4-анодный



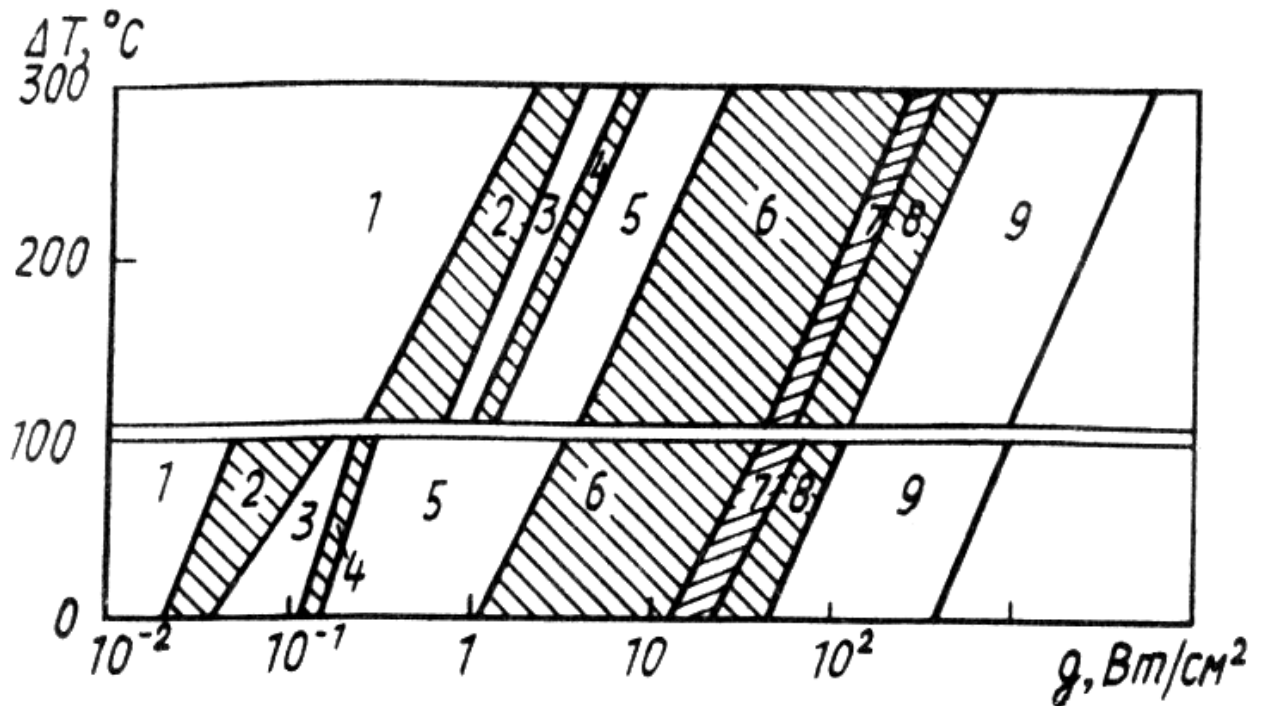


Рис. 3.14. Применение способов конвективного охлаждения в зависимости от плотности теплового потока и перегрева: 1—свободное воздушное; 2—свободное и принудительное воздушное; 3— принудительное воздушное; 4—принудительное воздушное и жидкостное; 5—принудительное испарительное; 6—принудительное жидкостное и свободное испарительное; 7— принудительное жидкостное, принудительное и свободное испарительное; 8—принудительное жидкостное и свободное испарительное; 9—свободное и принудительное испарительное

### § 3.4. Теплоотвод тепловыми трубами

Одной из наиболее эффективных испарительно-конденсационных систем являются теплоотводящие устройства, называемые тепловыми трубами и работающие по принципу замкнутого испарительно-конденсационного цикла, основанного на испарении жидкости в зоне подвода теплоты, передаче теплоты с потоком пара, конденсации пара в зоне отвода теплоты и возвращении жидкости в зону подвода теплоты за счет капиллярных или гравитационных сил. Тепловая труба (рис. 3.15) представляет замкнутую вакуумированную камеру, внутренняя поверхность которой облицована капиллярной структурой («фитилем»), заполненной конденсатом рабочей жидкости.

Тепловые трубы могут использоваться при температурах от — 273 до +2700 °С, что обуславливает разнообразие их конструкции. Кроме того, тепловые трубы могут являться частью конструкции узлов РЭС. Они обладают высокой изо-термичностью, работоспособностью в

невесомости, большим сроком службы (16000 ч для труб на воде), малой массой, высоким КПД (около 90%). Недостатком тепловых труб является сложность воспроизведения их параметров.

Примеры конструкции тепловых труб представлены на рис. 3.16— 3.18. Гибкая тепловая труба (рис. 3.17) служит для охлаждения датчиков инфракрасного излучения до температуры  $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$  на искусственном спутнике Земли; допускается ее изгиб с радиусом 0,23 м; мощность 20 Вт, масса 1,15 кг. Конструкция в виде корпуса со встроенной плоской тепловой трубой (рис. 3.18) обеспечивает его хорошую изотермичность.

Важнейшим элементом тепловых труб является фитиль (рис. 3.19, 3.20), изготавливаемый различными способами. Для тепловых труб РЭС наибольшее применение нашли фитили из металлической сетки (однослойной, многослойной). Размер пор фитиля зависит от типа теплоносителя, например для воды он составляет 30...70 мкм. Некоторые характеристики тепловых труб приведены в табл. 3.7.



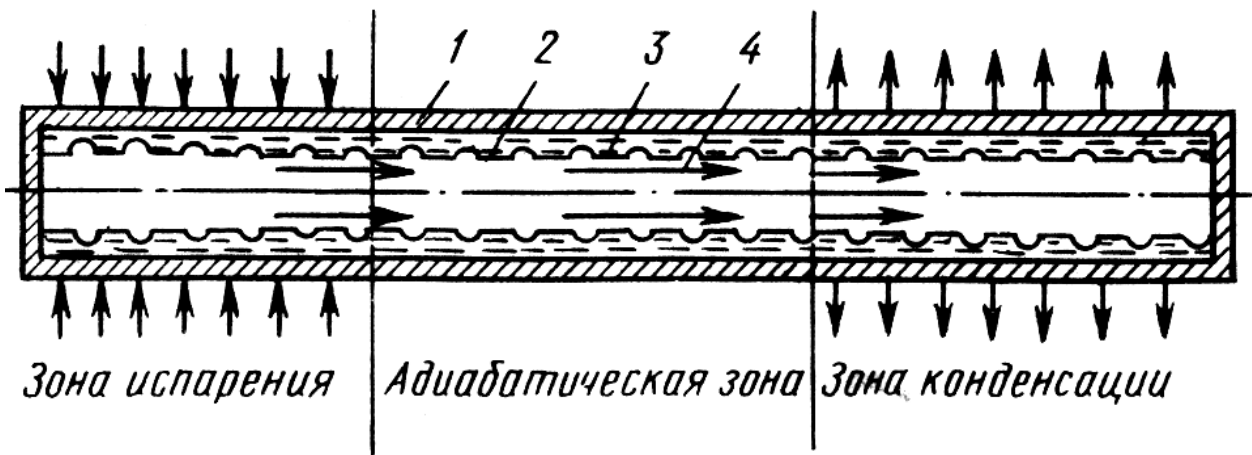


Рис. 3.15. Схема цилиндрической тепловой трубы: 1 — корпус; 2—фитиль; 3—жидкость в фитилях; 4 — поток пара

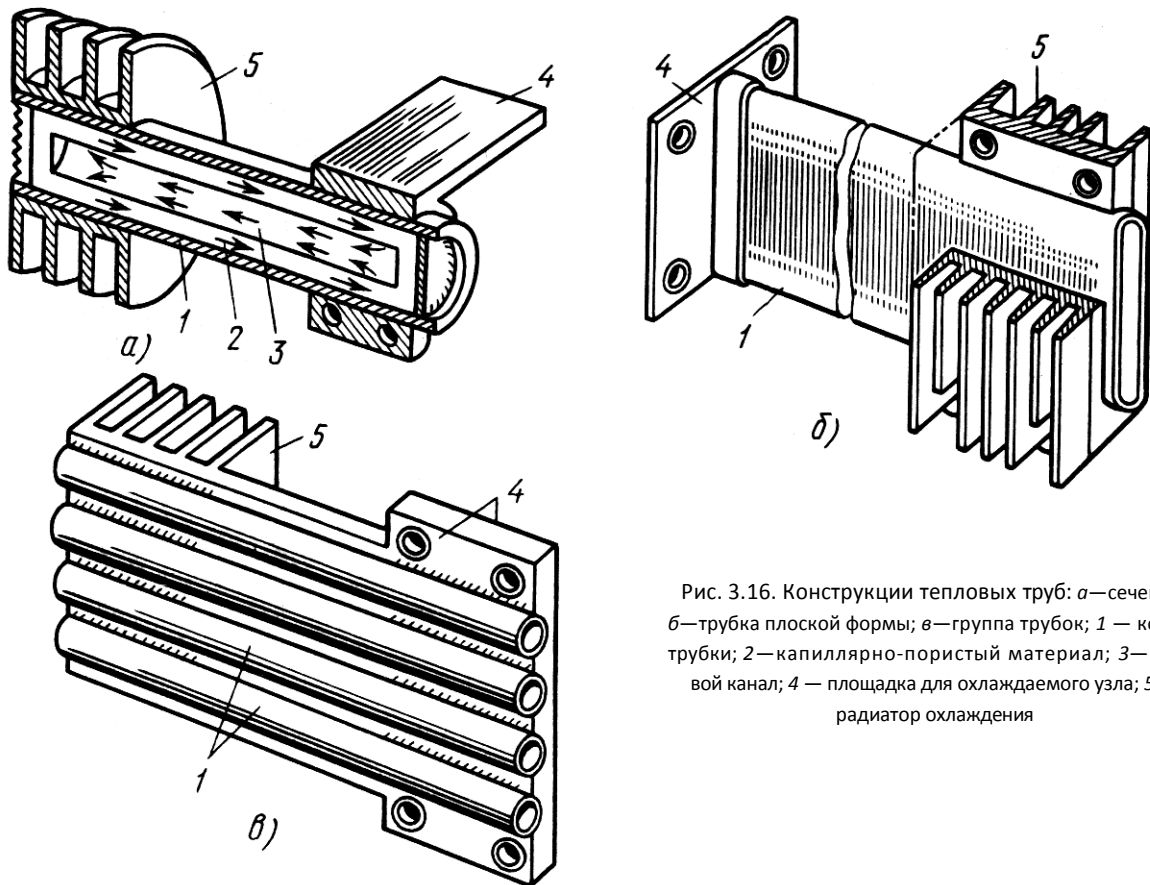


Рис. 3.16. Конструкции тепловых труб: а—сечение; б—трубка плоской формы; в—группа трубок; 1 — корпус трубки; 2—капиллярно-пористый материал; 3—паровой канал; 4 — площадка для охлаждаемого узла; 5 — радиатор охлаждения



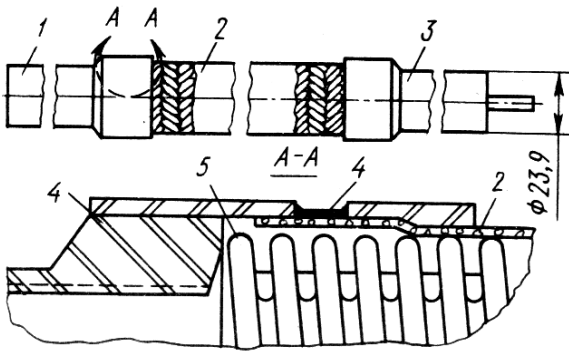


Рис. 3.17. Гибкая криогенная тепловая труба для ИСЗ: 1—конденсатор (16 см); 2—гибкая секция (92,4 см); 3—испаритель (16 см); 4—пайка; 5—сильфон

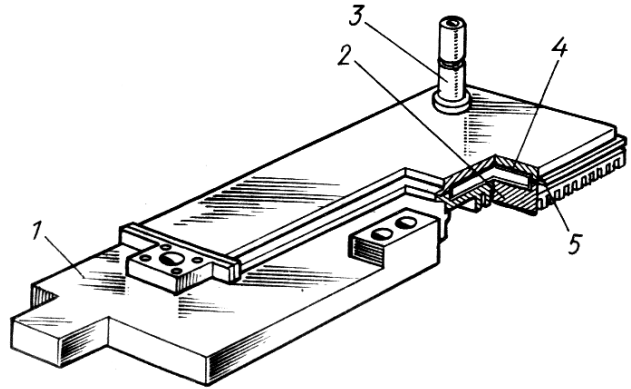


Рис. 3.18. Корпус узла РЭС с тепловой трубой: 1—корпус РЭС; 2—радиатор; 3—откачной штенгель; 4—фитиль; 5—место пайки двух половин корпуса тепло-

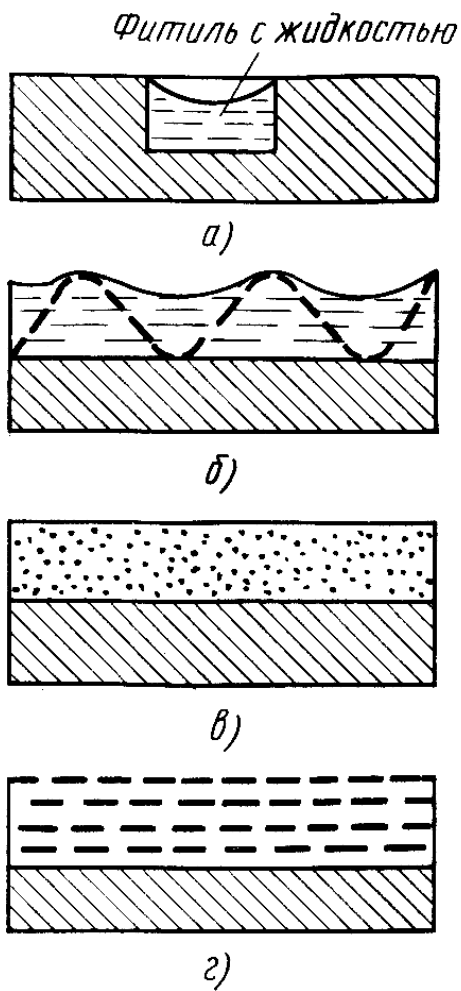


Рис. 3.19. Структура простых фитилей тепловых труб:

*а* — стенка с продольными канавками; *б* — уложенная вдоль стенки гофрированная сетка; *в* — пористая

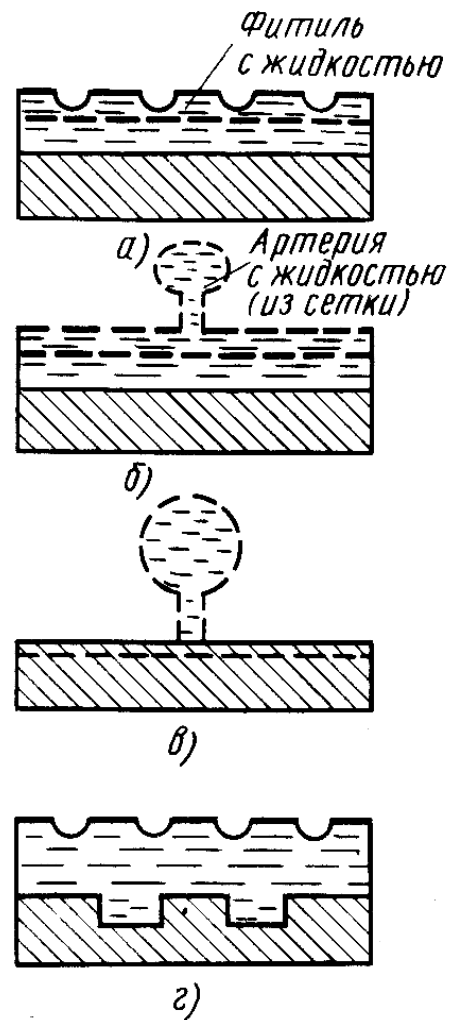


Рис. 3.20. Составные фитили тепловых труб: *а* — перфорированный экран и сетка; *б* — многослойная сетка с подпитывающей артерией; *в* — резба на стенке трубки и подпитывающая артерия; *г* — канавки на стенке трубки и сетка

### § 3.5. Теплоотвод теплопроводностью

*Теплопроводность* — молекулярный перенос теплоты в сплошной среде, обусловленный разностью температур. В РЭС широко используется теплопроводность твердых тел (несущих конструкций). Блоки РЭС (особенно бортовые) имеют высокий коэффициент заполнения объема и весьма малые внутренние каналы для передачи теплоты конвекцией.

Для планарной конструкции передача теплоты с помощью теплопроводности подчиняющаяся обобщенному закону Фурье, может быть описана линейным уравнением  $P_T = K_T S \Delta T$ , где  $P_T$  — тепловой поток, передаваемый с помощью теплопроводности, Вт;  $K_T$  — тепловая проводимость; для плоской стенки  $K_T = \lambda / \delta$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta$  — толщина элемента конструкции стенки, через которую проходит тепловой поток (длина теплоотводящей шины), м;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К);  $S$  — площадь поперечного сечения теплового потока, м<sup>2</sup>;  $\Delta T$  — перепад температур между двумя сторонами стенки, К. Величина, обратная  $K_T$ , называется *тепловым сопротивлением* (м<sup>2</sup>·К/Вт):  $R_T = 1/K_T = \delta / \lambda$ . Коэффициенты теплопроводности различных материалов приведены в табл. 3.8. Если стенка многослойная и плоская, то полное тепловое сопротивление теплопроводности  $R_{T\Sigma} = \sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i = \delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \dots + \delta_n / \lambda_n$ , а *тепловая проводимость*  $K_{T\Sigma} = 1/R_{T\Sigma} = (\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \dots + \delta_n / \lambda_n)^{-1}$ .

Если тепловой контакт с наружных сторон тонкостенной конструкции осуществляется с помощью конвекции, то в расчетах вместо тепловой проводимости  $K_T$  используют *коэффициент теплопередачи*  $K_{ТП} = (1/\alpha_1 + \delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \dots + \delta_n / \lambda_n + 1/\alpha_2)^{-1}$ , где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи конвекцией с одной и второй стороны, Вт/(м<sup>2</sup>·К). При построении тепловой схемы устройства используется величина, *называемая удельным тепловым сопротивлением* (К/Вт):  $R = R_T / S = \delta / (\lambda S)$ , где  $S$  — площадь сечения, через которое распространяется тепловой поток. Удельное тепловое сопротивление характеризует, например, тепловые параметры корпуса ИС. Так, для керамических корпусов  $R = 30 \dots 40$  К/Вт, для пластмассовых 55...60 К/Вт, т.е. перепад температур для пластмассовых корпусов при одной и той же мощности ИС в два раза выше.

Таблица 3.7

## Характеристики тепловых труб

Тип трубы	Теплоноситель	Диапазон температур,	Плотность теплового потока		Материал корпуса и фитиля
			в осевом направлении, кВт/см <sup>2</sup>	на поверхности, Вт/см <sup>2</sup>	
Криогенная	Гелий, аргон, криптон, азот, кислород, этан, фреоны	-273...-73	—	-	Никель, алюминий, нержавеющая сталь  12ХН9Т
	Азот	-200...-76	0,01	-	
Низкотемпературная	Фреоны, аммиак, спирты, ацетон, вода, органические соединения	-73...+ 777	0,1...0,7	3...15	Медь, никель, нержавеющая сталь 12ХН9Т, керамика
	Жидкий аммиак	-70... + 60	0,1...0,3	0,3...3	
	Метилловый спирт Вода	-45 + 120 + 5...+ 230	0,45 0,67	7,5 10 14,8	

Таблица 3.8

### Коэффициент теплопроводности $\lambda$ некоторых материалов

Материал	$\lambda$ , Вт/(м·К)	Материал	$\lambda$ , Вт/(м·К)
Газы	0,01	Сплав 12Х12Н10Т	14...33
Воздух	0,023...0,027	Ковар Н29К18	15...21
Стекловолоконная вата	0,051...0,059	Поликот (99,7% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	25,1-42
Пенопласты	0,03...0,06	Сталь	45...92
Жидкости	0,09...0,5	Германий	58
Полихлорвиниловая пленка	(вода 0,6) 0,12	Бронза	64...88
Резина	0,11...0,16	Олово	34...67
Эпоксидная смола	0,1...0,2	Никель	60...95
Парафин	0,27	Кремний	83...105
Слюда	0,43...0,6	Латунь Л63	86
Стеклотекстолит	0,34...0,74	Свинец	35...92
Пластмасса ЭФП-63	0,7	Алюминиевые сплавы: дюралюминий	160...180
Клей ВК-9	0,7-0,8	сплав АЛ2	175
Паста КПТ-8	0,7...0,8	Бериллиевая керамика	60...209
Стекло С48-1	1,2...1,5	Брокерит (Ве <sub>2</sub> О <sub>3</sub> )	217
Ситалл	1,2...4,0	Золото	293...297
Керамика 22ХС	20...30	Мель	259...400
Титановый сплав	14...16	Серебро	416...425

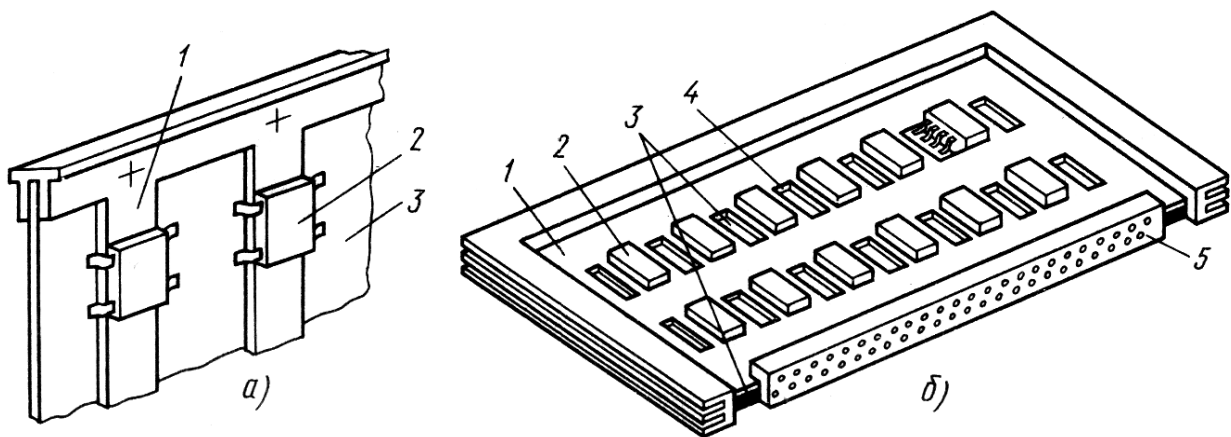


Рис. 3.21. Охлаждение ИС с помощью теплоотводящих шин: а — ячейка с шинами-теплостоками и торцевой накладкой; б — ячейка со сплошным тепло-отводом и периферийным радиатором; 1 — элементы теплоотвода; 2 — ИС; 3 — печатная плата; 4 — окна в теплоотводящей шине; 5 — розетка соединителя

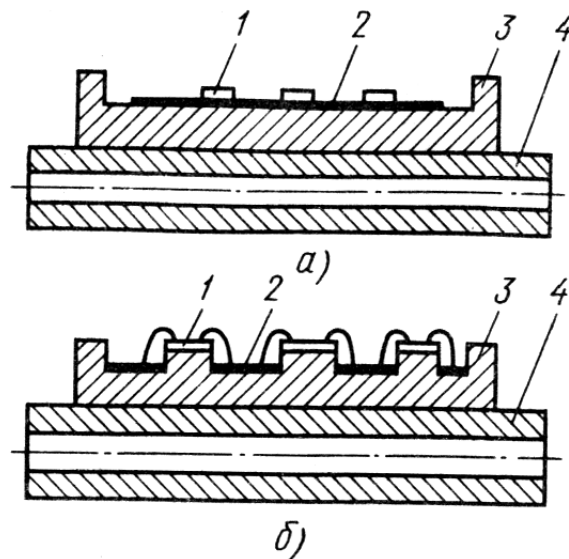


Рис. 3.22. Отвод теплоты от бескорпусных компонентов, установленных на плату (а) и выступы основания (б): 1 — компонент; 2 — полиамидная плата; 3 — основание из алюминия; 4 — охлаждаемая жидкостью плата

В ряде случаев для построения тепловой схемы необходимо знать контактное тепловое сопротивление  $R_{\text{ТКН}}$ . Его значение зависит от сочетания материалов в тепловом контакте, удельной нагрузки, шероховатости поверхности контактной пары. Для удельной нагрузки  $1000 \text{ Н/см}^2$  и шероховатости  $R_z 20$  контактное тепловое сопротивление ( $\text{см}^2\text{К/Вт}$ ) некоторых пар равно: медь — алюминий — 0,08; медь — медь — 0,1; медь — латунь — 0,18; медь — сплав Д16 — 0,2; сплав Д16 — сплав Д16 — 0,25; сталь — медь — 0,8; сталь — сплав Д16 — 1,2; сталь — сталь — 2,5; металл — краска — металл — 20,0. Тепловое сопротивление контакта ( $\text{К/Вт}$ ) определяется по формуле  $R_K = R_{\text{ТКН}}/S$ .

Для улучшения теплоотвода в конструкции РЭС используются материалы с высокой теплопроводностью (поликор, керамика 22ХС, оксид бериллия, медь, алюминий, теплопроводящий клей ЭТК-21 с наполнителем из нитрида бора), а также по возможности принимаются меры для исключения воздушных зазоров в местах тепловых контактов (например с помощью паст типа КПП-8 или клея ЭТК-21), уменьшения шероховатости поверхности (уменьшения микронеровностей), увеличения площади теплового контакта, увеличения контактного усилия.

Теплоотвод от компонентов, установленных на печатных платах, осуществляется с помощью теплоотводящих шин, которые располагают непосредственно под корпусами ИС (рис 3.21, а).



В ряде случаев ИС в пластмассовом корпусе содержат встроенные теплоотводящие шины (см. рис. 1.18), которые могут присоединяться к шинам на плате или к корпусу РЭС (через шины).

Шины на плате могут выполняться вместе с рамкой (рис. 3.21 б). Радиаторы, расположенные по краю платы, могут сами рассеивать теплоту или служить теплосоединителями, передающими теплоту к охлаждаемому жидкостью корпусу радиоэлектронного средства.

Бескорпусные компоненты могут устанавливаться на тонкие основания из полиимидной пленки (рис. 3.22, а) или непосредственно на выступы основания (рис. 3.22, б) проходящие через отверстия в платах. Теплоотводящие шины через рамку ячейки или корпус блока соединяются с теплостоком, который может представлять собой тепловые трубы или основание охлаждаемое жидкостью.

### § 3.6. Теплоотвод излучением

Теплообмен излучением возможен в теплопрозрачных, т. е. пропускающих теплоту, средах (газах, вакууме). В жидкости он практически отсутствует. При излучении тепловая энергия переносится электромагнитными волнами. Количество энергии, отводимой излучением, пропорционально четвертой степени температуры тела. Уровень рабочих температур для большинства компонентов и узлов РЭС невелик, поэтому часто переносом теплоты излучением (при наличии отвода теплоты конвекцией или теплопроводностью) можно пренебречь. Однако для вакуума (космоса) этим способом теплоотвода пренебречь нельзя, хотя плотность теплового потока не превышает 0,001...0,005 Вт/см<sup>2</sup>.

Количество теплоты, отводимой от блока с помощью излучения в неограниченном пространстве,  $P_{л} = \alpha_{л} S \Delta T$ , где  $P_{л}$  — излучаемая тепловая мощность, Вт;  $S$  — площадь излучающей поверхности, м<sup>2</sup>;  $\alpha_{л} = \varepsilon_{пр} \varphi f(T_1, T_2)$ , — коэффициент лучеиспускания, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $\Delta T$  — перегрев поверхности лучеиспускания относительно окружающей температуры, К;  $\varepsilon_{пр}$  — приведенный коэффициент черноты поверхности пары тел, являющийся функцией степени черноты  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  взаимодействующих поверхностей (табл. 3.9); для теплообмена между неограниченными плоскопараллельными поверхностями приведенная степень черноты  $\varepsilon_{пр12} = 1/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)$  при  $\varphi=1$ ; для РЭС в микроэлектронном исполнении принимают  $\varepsilon_{пр} = 0,8$ ;  $\varphi$  — коэффициент облучения (взаимной облученности) соседних компонентов,

обычно  $\varphi = 1$ ;  $f(T_1, T_2)$  — функция температуры одиночного блока, Вт/(м<sup>2</sup> • К), нагретого до температуры  $t_1$  и находящегося в среде с температурой  $t_2$ , определяется по табл. 3.10

Для увеличения интенсивности теплоотвода излучением можно увеличить площадь излучения (например, заменяя перфорацию на корпусе блока на жалюзи), степень черноты поверхности (например, радиатора) или температуру поверхности излучающих компонентов (это ограничено термостойкостью компонентов РЭС).

Таблица 3.9

Коэффициент черноты  $\varepsilon$  некоторых тел

Материал и состояние поверх-	T, К	$\varepsilon$	Материал и состояние по-	T, К	
Алюминий полированный	323...773	0,04...0,06	Лак черный	313...373	0,96...0,98
Алюминий сильно окисленный	323...773	0,2...0,3	Мүар серый, черный	293	0,89...0,90
Дюралюминий Д16	323...623	0,37...0,41	Краска алюминиевая	373	0,28
Медь шлифованная	293	0,03	Картон, бумага, ткань	293...573	0,93
Краски эмалевые	293...373	0,92			

Таблица 3.10

Значения функции  $f(T_1, T_2)$

T <sub>1</sub> , с	Температура T <sub>2</sub> , °С									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
15	5,32									
20	5,45	5,59								
25	5,59	5,76	5,90							
30	5,76	5,90	6,05	6,20						
35	5,90	6,05	6,20	6,35	6,51					
40	6,06	6,20	6,35	6,51	6,60	6,82				
45	6,20	6,35	6,51	6,60	6,83	7,00	7,14			
50	6,35	6,51	6,60	6,83	7,00	7,17	7,35	7,50		
60	6,70	6,87	7,04	7,19	7,35	7,51	7,69	7,87	8,05	
70	7,06	7,21	7,39	7,55	7,72	7,86	8,05	8,24	8,42	8,80
80	7,44	7,59	7,75	7,80	8,07	8,26	8,45	8,65	8,83	9,20
90	7,82	7,98	8,13	8,31	8,49	8,67	8,86	9,04	9,25	9,65
100	8,19	8,37	8,53	8,72	8,91	9,09	9,28	9,46	9,66	10,08

Примечание. T<sub>1</sub>—температура аппаратуры; T<sub>2</sub> — температура окружающей среды.

### § 3.7. Теплоотвод с использованием термоэлектрического эффекта

Термоэлектрический эффект открыл в 1834 г. французский физик Ж. Ш. А. Пельтье; в 30-е годы нашего столетия советский ученый А. Ф. Иоффе предложил использовать его для построения термобатарей путем последовательного соединения полупроводников р- и n-типа (рис. 3.23). При протекании через элемент тока  $I$  на холодном спае за единицу времени поглощается теплота  $Q_x = Q_{\text{пе}} - Q_{\text{дж}} - Q_{\lambda}$ , где  $Q_{\text{пе}} = \alpha_T I T_x$  — тепло Пельтье;  $\alpha_T$  — коэффициент Зеебека (коэффициент термоЭДС);  $T_x$  — температура холодного спае;  $Q_{\text{дж}} = T^2 R / 2$  — джоулева теплота, выделяющаяся на сопротивлении элемента  $R$ ;  $Q_{\lambda} = (\lambda / \delta) \Delta T$  — теплота, передающаяся от горячего спае к холодному за счет теплопроводности.

Термобатарея может осуществлять как охлаждение, так и нагрев, что особенно важно при работе в режиме активного термостатирования (для этого необходимо изменить направление тока). Для поддержания низкой температуры одного из концов термобатареи необходимо поддерживать заданную температуру другого (горячего) конца, охлаждая его (например, за счет конвекции). Зависимость выделяемой в термоэлементе теплоты от протекающего по нему тока представлена на рис. 3.24. При некотором значении тока  $I_{\text{opt}}$ , имеет место максимальное понижение температуры холодного спае. Если ток существенно больше  $I_{\text{opt}}$ , то эффект охлаждения может вообще исчезнуть из-за возрастания джоулевой теплоты.

Для повышения эффективности охлаждения применяют двухкаскадные батареи (рис. 3.25). Использование многокаскадных батарей позволяет снижать температуру до 70 К. В многокаскадных батареях каскады могут соединяться последовательно или параллельно. Лучшими материалами для элементов каскадов являются твердые растворы на основе теллурида висмута ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) с легирующими добавками. Для различных диапазонов температур, в которых работают термоэлементы многокаскадной батареи, используют растворы различного состава (табл. 3.11). На рис. 3.26 приведен общий вид однокаскадной термобатареи, а на рис. 3.27 — перепад температуры по каскадам и массы термобатареи в зависимости от числа каскадов  $N$ . При снижении температуры на 150 К холодопроизводительность термобатареи не превышает 1 Вт; при холодопроизводительности более 300 Вт при-

менение термобатарей вообще нецелесообразно ввиду их низкого КПД и большой массы (15...90 г/Вт) по сравнению с жидкостной самолетной системой охлаждения (9...11 г/Вт). Жидкостные системы на холодопроизводительность в несколько единиц или десятков ватт отсутствуют.

Таблица 3.11

### Зависимость оптимальных параметров материала элементов термобатарей от температуры каскада

Рабочий интервал температур, °С	Тип проводимости элемента	Параметры материала при 27° С	
		$\sigma$ , См/см	$e \cdot 10^{-6}$ , В/К
-43...+ 57	<i>p</i>	1000+100	210+10
-103...-27	<i>p</i>	800+100	225+10
	<i>n</i>	700+100	230+10
-123...- 15	<i>p</i>	650 + 50	235 + 5
	<i>n</i>	550 ±50	245 ±5
		или 7200+100*	или 90 ±5*

\* Параметры исходного материала  $\text{Bi}_{0,95}\text{Sb}_{0,05}$

Примечания: 1. Состав шихты и количество легирующих добавок *p*-типа проводимости:

$\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$  +4%(вес),  $\text{Te}$  + 0...1%(вес),  $\text{Se}$  в твердом растворе (26 мол. %  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и 74 мол.%  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ); *n*-типа проводимости;  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$  + 0,09...0,03% (вес.),  $\text{CdCl}_2$  в твердом растворе (4 мол.%  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и 96 мол.%  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ). 2.  $e$ —коэффициент термоЭДС.

2.  $e$  – коэффициент термоЭДС.

На рис. 3.28 приведено распределение температуры по каскадам пятикаскадной термобатареи с холодопроизводительностью 1 Вт, потребляемая мощность составляет 240 Вт, рабочий ток 300 А. К недостаткам термобатарей следует отнести: низкий КПД (30% для однокаскадной батареи; 12% для двухкаскадной, 3% для трехкаскадной и 0,013% для десятикаскадной); большую массу; сравнительно небольшую механическую

прочность (если элементы соединены только с помощью медных шин); довольно большую постоянную времени. Плотность теплового потока через термобатареи не должна превышать  $10 \text{ Вт/см}^2$ . Одним из важнейших преимуществ термобатарей является возможность получения температуры ниже температуры окружающей среды. Это позволяет применять термобатареи, например, для снижения темнового тока в чувствительных элементах передающих телевизионных трубок на приборах с зарядовой связью.

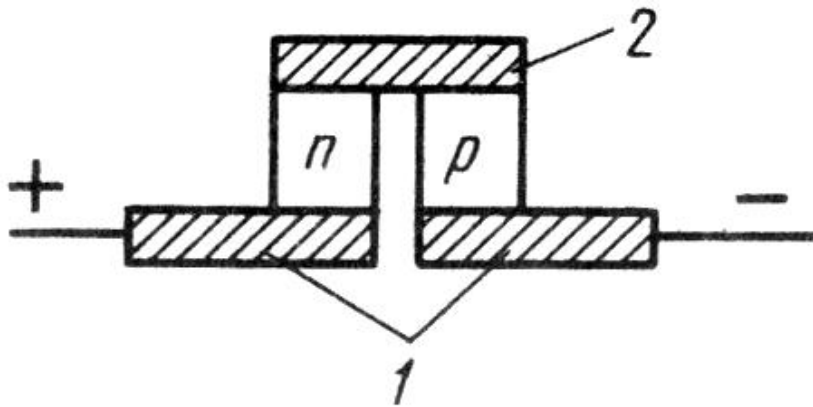


Рис. 3.23. Звено термобатареи:

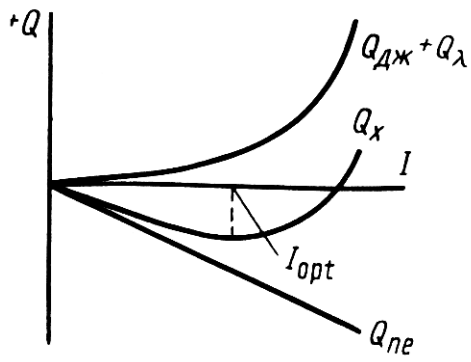


Рис. 3.24. Зависимость джоулевой теплоты  $Q_{дж}$ , теплоты Пельтье  $Q_{пе}$  и теплоты  $Q_x$ , передаваемой теплопроводностью, выделяющихся на холодном спае термобатареи от тока  $I$

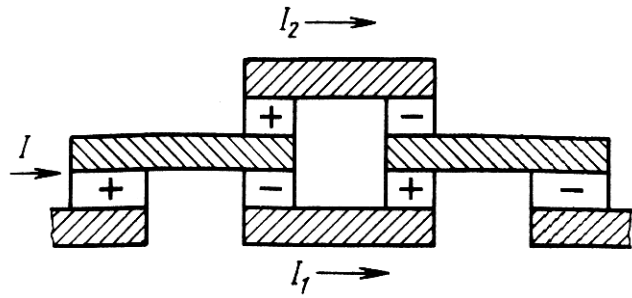


Рис. 3.25. Двухкаскадная термобатарея

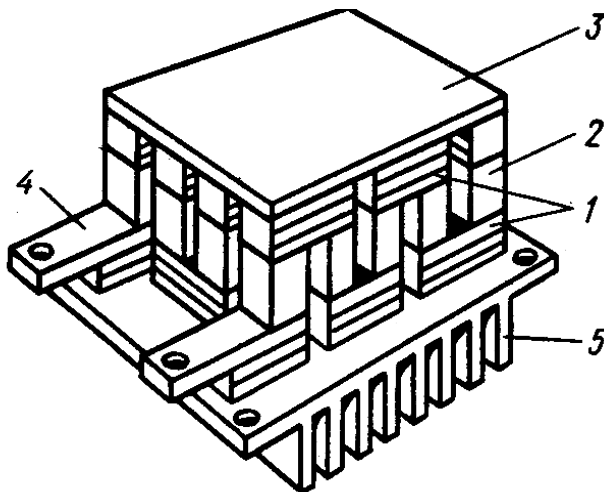


Рис 3.26. Конструкция термоэлектрической батареи:

1 термоэлементы и 2 термоэлементы

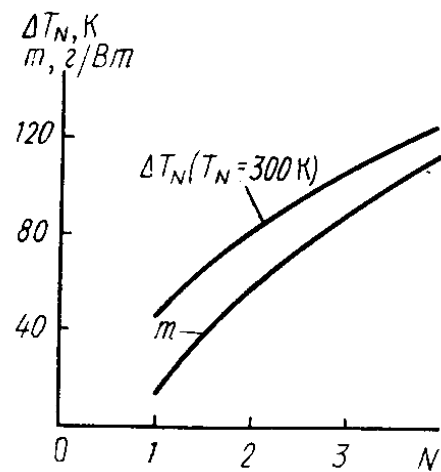


Рис. 3.27. Зависимость перепада температуры  $\Delta T_N$  и удельной массы  $m$  от числа каскадов  $N$  термобатареи

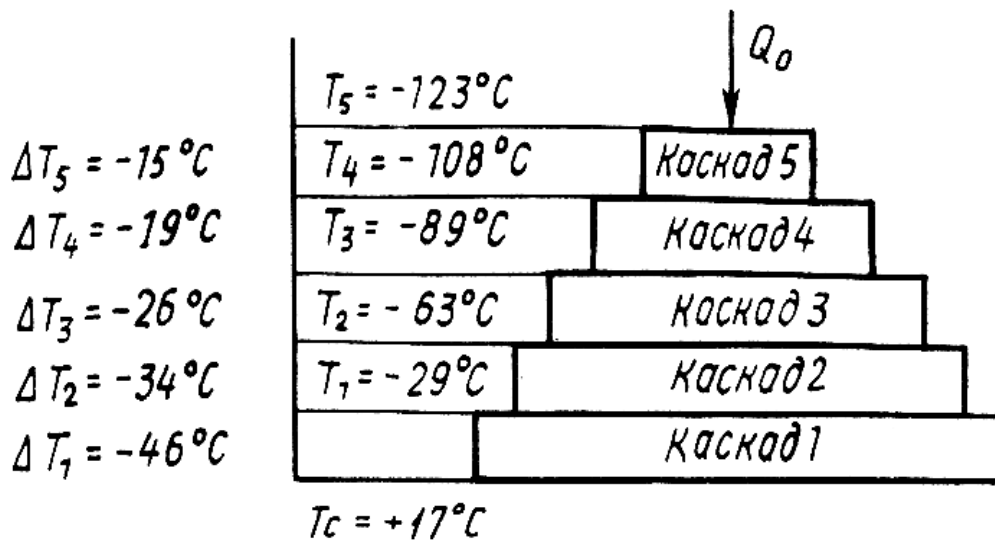


Рис. 3.28. Распределение температуры по каскадам пятикаскадной термобатареи холодопроизводительностью  $Q_0 = 1$  Вт относительно температуры окружающей среды

### § 3.8. Способы поглощения теплоты. Технологичность конструкции СОТР

На параметры СОТР в значительной степени влияют используемые способы поглощения теплоты, которые основаны на способности к теплоаккумуляции окружающей среды и материалов конструкции, а также на использовании термоэлектрического эффекта. При теплоаккумуляции происходит нагрев окружающей среды или конструкции, могут произойти фазовые превращения в материалах конструкции (плавление, испарение). Количество теплоты (кал), которое может поглотить среда или материал конструкции при нагреве, определяется соотношением  $Q = mC_p\Delta T$ , где  $C_p$ —удельная теплоемкость материала среды или конструкции, ккал/(г · К);  $m$  — масса среды или конструкции, г;  $\Delta T$ —перегрев среды или конструкции по отношению к начальной температуре, °С. Если нагреву подвергается окружающая среда (воздух, вода), массу которой можно считать практически бесконечной, то количество поглощаемой теплоты также бесконечно.

Для примера определим перегрев алюминиевого корпуса массой 570 г, в котором в течение 180 выделяется мощность 40 Вт. Удельная теплоемкость алюминия 0,22 ккал/(кг · °С). Учитывая, что 1 Дж = 1 Вт · с = 0,24 кал, получаем  $\Delta T = 40 \cdot 180 \cdot 0,24 / (570 \cdot 0,22) = 13,76^\circ\text{C}$ .

В тех случаях, когда РЭС работает в режиме повторно-кратковременных включений, для поглощения теплоты могут быть использованы вещества, обладающие относительно большой теплотой обратимых

фазовых превращений (табл. 3.12). Во время работы теплота поглощается за счет скрытой удельной теплоты плавления вещества  $L_{пл}$ , а после отключения происходит остывание и затвердевание вещества (по истечении достаточного времени). Наиболее распространены два способа взаимного расположения охлаждаемых элементов РЭС и плавящихся веществ: 1) компоненты находятся вне объема с плавящимся веществом (рис. 3.29), в этом случае при ремонте не требуется удаления вещества; 2) компоненты находятся внутри плавящегося вещества, в этом случае ремонт затруднен, но условия теплоотвода лучше. Первый способ применяют чаще, но требуется обеспечить хороший тепловой контакт компонента с контейнером, содержащим плавящееся вещество. Иногда плавящиеся вещества используют для построения активного термостата (рис. 3.30).

Таблица 3.12

Характеристики некоторых плавящихся веществ, предназначенных для охлаждения РЭС, работающих в режиме кратковременно-повторных включений

Вещество	Химическая формула, состав	Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, $L_{пл} \cdot 10^3$ , Дж/кг
Парафин	$C_nH_{2n+1}$	40...56	156
Кислота:			
Элаидиновая	$C_{18}H_{34}O_2$	45	214
Лауриновая	$C_{12}H_{24}O_2$	44	180
Кристаллический азотнокислый никель	$(NiNO_3)6H_2O$	56.7	155
Дифенил	$C_6H_5$	69.5	120
Нафталин	$C_{10}H_8$	79.5	157
Сплав Вуда	Bi – 50%; Cd – 12.5%; Sn – 12.5%; Pb – 25%;	65	35

Если тепловая энергия, выделяемая в РЭС, поглощается внешней средой (газом или жидкостью) и расходуется только на изменение теплосодержания среды (без фазовых превращений), то отводимая на нагрев мощность (Вт)  $P_{нагр} = G_p \gamma G_V (T_{вых} - T_{вх})$ , где  $G_p$  — удельная теплоемкость хладагента, Дж/(кгК);  $\gamma$  — его плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $G_V$  — объемный расход газа или жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $T_{вых}$  и  $T_{вх}$  — средняя температура хладо-



агента на входе и выходе системы. Если не только изменяется теплосодержание, но и происходят фазовые изменения, то необходимо учитывать дополнительные затраты теплоты (кал):  $Q_{пл} = m_{пл}L_{пл}$ ; где  $m_{исп}$  — масса плавящегося и испаряющегося вещества соответственно, г;  $L_{пл}$  и  $L_{исп}$  — удельная теплота плавления и испарения соответственно, кал/г. Зная время плавления или испарения, можно определить затрачиваемую дополнительную мощность  $P_{пл}$  или  $P_{исп}$ .

Технологичность теплонапряженной РЭС с СОТР сильно зависит от технологичности СОТР, которая обеспечивается максимально простой конструкцией СОТР, ее отработанностью в производстве, не дефицитностью покупных узлов. При обеспечении теплового режима с использованием конвекции наиболее технологичной является система естественной воздушной конвекции, менее технологичны принудительная воздушная, жидкостная и испарительная. Наиболее технологичным способом кондуктивного теплоотвода является заполнение воздушных зазоров более теплопроводными материалами (клеем, компаундом, прокладкой из слюды и т. д.). Менее технологично использование тепловых шин и тепловых труб. При изготовлении тепловых труб применяют такие операции, как вакуумирование, заполнение теплоносителем, герметизация. Эти операции усложняются, если корпус тепловой трубы одновременно является частью несущей конструкции РЭС. Ввиду сложности изготовления компоненты системы термоэлектрического и жидкостного охлаждения чаще всего приобретаются по кооперации, что требует учета степени их освоенности и дефицитности.

При выборе СОТР без использования систем автоматизированного проектирования предварительная их оценка может быть осуществлена по диаграмме, представленной на рис. 3.14. Для этого необходимо определить условную поверхность охлаждаемой аппаратуры по формуле  $S = 2[l_1l_2 + (l_1 + l_2)l_3]K_3$ , где  $l_1, l_2, l_3$  — габаритные размеры аппаратуры, м;  $K_3$  — коэффициент заполнения, определяемый отношением суммарного объема элементов к полному объему РЭС. Затем вычисляется удельная тепловая мощность  $g = P/S$ , где  $P$  — в Вт;  $S$  — в м<sup>2</sup>. Откладывая по оси ординат допустимый перегрев, а по оси абсцисс —  $g$ , можно определить область, соответствующую тому или иному способу теплоотвода. Далее производится разработка конструкции РЭС и СОТР, составляется тепловая модель (определяются наиболее значимые способы теплоотвода для различных

уровней иерархии), составляется тепловая схема РЭС и отдельных узлов (тепловые сопротивления элементов конструкции), рассчитывается температура компонентов и узлов. Критерием правильности выбора СОТР является отсутствие перегревов в конструкции. При расчете используются отраслевые нормативные и руководящие технические материалы.

При выборе типа СОТР с использованием систем автоматизированного проектирования, например системы ПРАМ-9, в ЭВМ вводятся сведения об используемых уровнях разукрупнения РЭС, мощности и размещении источников теплоты; система выбирает способ охлаждения и определяет температуру всех компонентов с выдачей результатов в виде карты тепловых режимов компонентов и узлов, таблицы перегретых элементов (если они имеются).

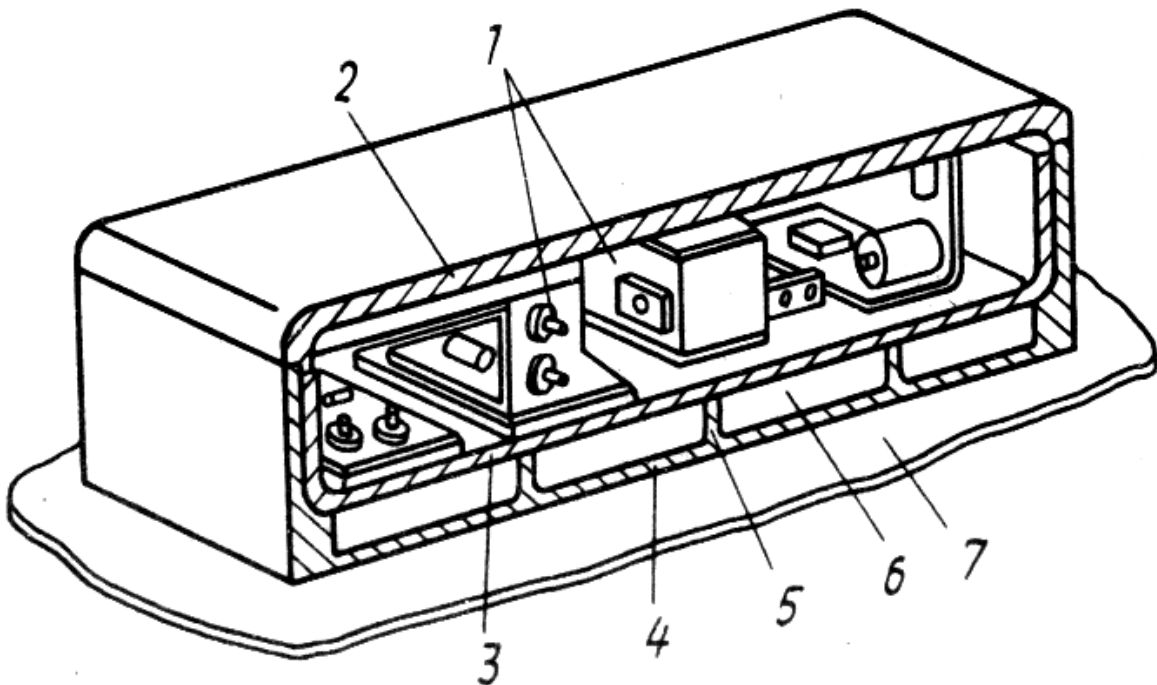


Рис. 3.29. Общий вид блока, охлаждаемого с помощью плавящегося вещества:

1- блок; 2-кожух; 3-плата из оксида бериллия; 4-основание; 5-ребра; 6-емкость с плавя-

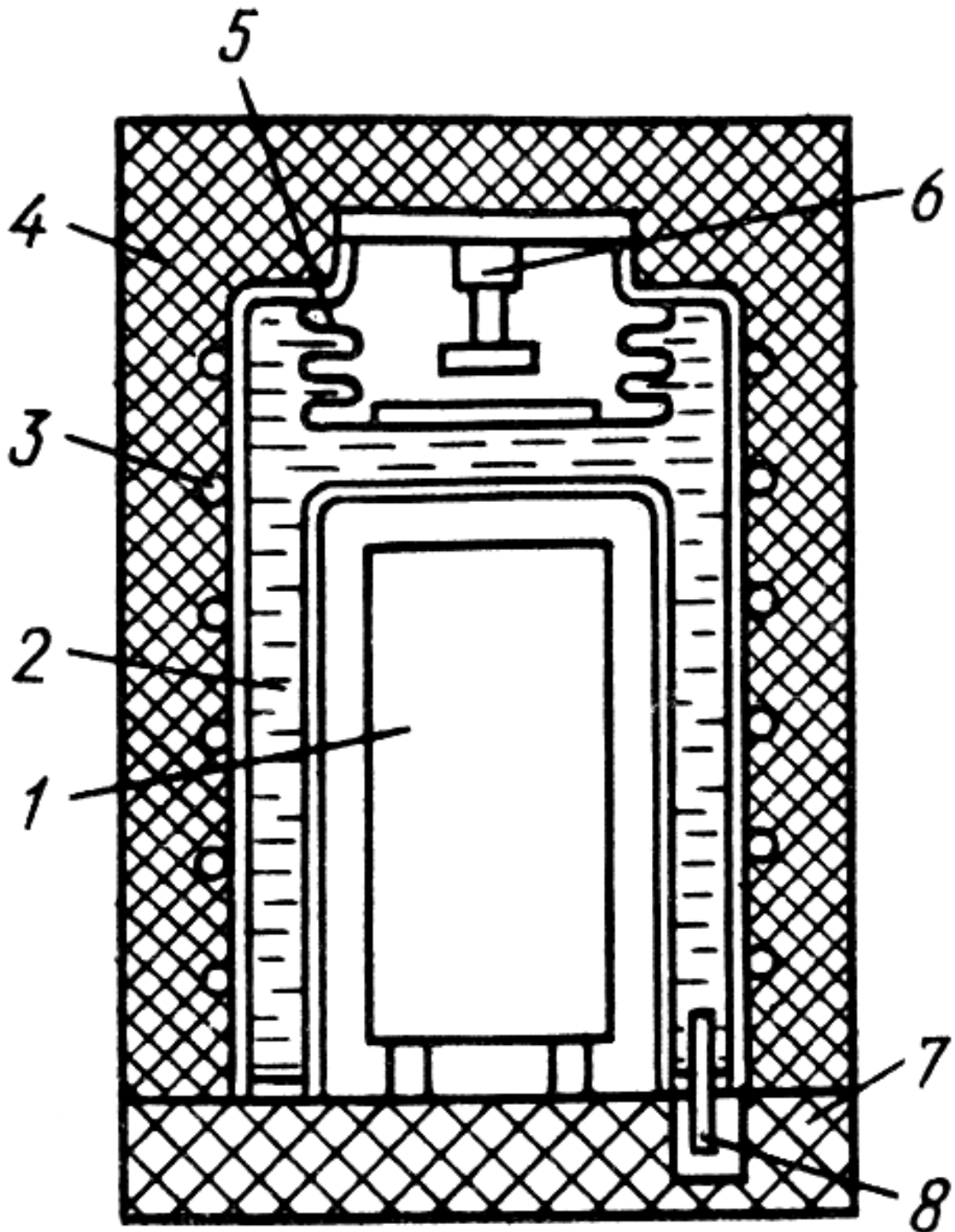


Рис. 3.30. Конструкция термостата:

1—термостатируемый объем с РЭС; 2—плавящееся вещество; 3—обмотка обогрева; 4—

#### 4.4. Основы защиты РЭС 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 к 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 нагрузках, 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 со-

противления в виде демпфера (рис. 4.4.1), 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. 4.4.1, повторяя ее многократно. Стремясь в пределе к бесконечному числу моделей в пределах объема конструкции, получим модель системы с распределенными параметрами (рис. 4.4.2).

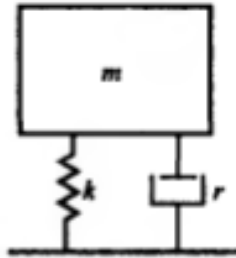


Рис. 4.4.1. Модель механической системы с одной степенью свободы

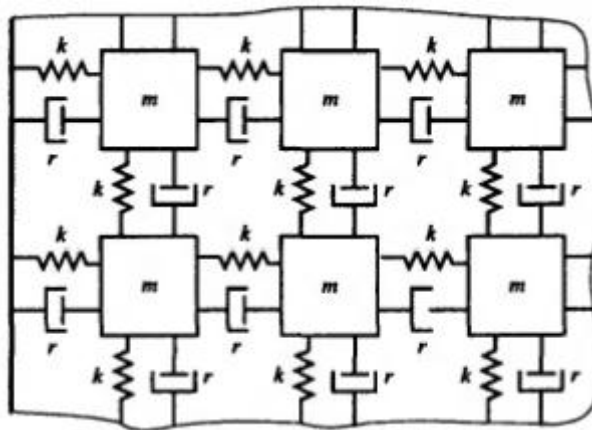


Рис. 4.4.2. Модель системы с распределенными параметрами

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  $F_r$ :

$$F(t) = F_m + F_r + F_k. \quad (4.4.1)$$

Составляющие правой части уравнения (4.4.1) 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  $\xi$  — смещение системы от положения равновесия при действии силы  $F(t)$ .

Линейное дифференциальное уравнение:

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} + r \frac{d\xi}{dt} + k\xi = F(t) \quad (4.4.2)$$

описывает состояние системы в любой момент времени.

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

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} + r \frac{d\xi}{dt} + k\xi = 0. \quad (4.4.3)$$

Решение (4.4.3) обычно записывается в виде:

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

где  $\xi_0$  и  $\varphi_0$  — 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

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} + r \frac{d\xi}{dt} + k\xi = F(t) = F_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (4.4.4)$$

Решение уравнения

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

состоит из двух слагаемых: первое описывает собственные колебания системы с частотой  $\omega_0$ , второе — вынужденные колебания с частотой  $\omega$ , где  $A_0$  и  $A_B$  — 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

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

где  $\xi_{нб} = mg / k$  — 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

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

$$\xi_{\text{д}} = \xi_{нб} + \xi_{\max} = \xi_{нб} \left[ 1 + \sqrt{1 + v_0^2 / (\omega_0^2 \xi_{нб}^2)} \right].$$

Максимальное ускорение и коэффициент ударной перегрузки соответственно будут

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

и

$$k_{\text{оа}} = \frac{d^2 \xi}{dt^2} \frac{1}{g}.$$

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 заземляются (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)  $\sigma_{\text{д.н.е}} = P / F \leq [\sigma]_{\text{д.н.е}}$ ;
- при изгибе  $\sigma_{\text{е}} = M_{\text{е}} / W_{\text{е}} \leq [\sigma]_{\text{е}}$ ;
- при срезе  $\tau_{\text{н.о}} = P / F \leq [\tau]_{\text{н.о}}$ ;
- при кручении  $\tau_{\text{е.о}} = M_{\text{е.о}} / W_{\text{е.о}} \leq [\tau]_{\text{е.о}}$ ;

где  $P$  — усилие, действующее на деталь, Н;  $F$  — площадь сечения детали, мм<sup>2</sup>;  $[\sigma]_{\text{д.н.е}}$ ,  $[\sigma]_{\text{е}}$  — допускаемые напряжения на растяжение, сжатие и изгиб;  $[\tau]_{\text{н.о}}$ ,  $[\tau]_{\text{е.о}}$  — допускаемые напряжения на срез и кручение;  $M_{\text{и}}$ ,  $M_{\text{кр}}$  — изгибающий и крутящий моменты, Н/мм;  $W_{\text{и}}$ ,  $W_{\text{кр}}$  — моменты сопротивления при изгибе и кручении, мм<sup>3</sup>.

*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. 4.4.3 и 4.4.4 приведены примеры плоских элементов конструкции с применением выдавок и отбортовки.



Рис. 4.4.3. Конфигурация выдавок тонкостенных конструкций деталей

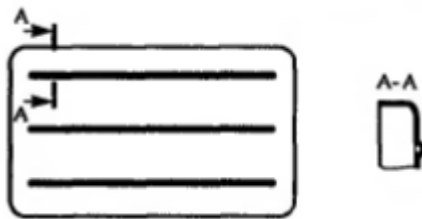


Рис. 4.4.4. Крышка прибора с тремя выдавками (рельефами жесткости) и отбортовкой по контуру

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  $f_0$ , 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 жест-

кость оценивается коэффициентом жесткости  $\lambda = P/\delta$ , где  $P$  — действующая сила;  $\delta$  — 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. 4.4.5) без ребра и с вертикальным ребром (соответственно  $J_a$  и  $J_b$  относительно оси  $x-x$ ) получим из соотношения

$$J_b / J_a = 1,5b_0h_0(1 + 2h_0 + 1,66h_0^2),$$

где  $b_0 = b_p/b$ ;  $h_0 = h/s$ .

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

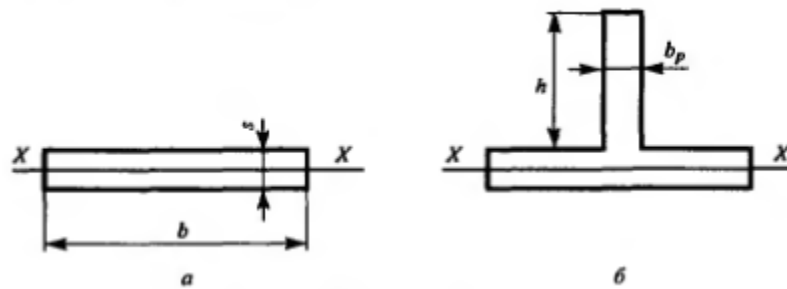


Рис. 4.4.5. Примеры сечений балок:  
*a* — без вертикального ребра; *б* — с вертикальным ребром

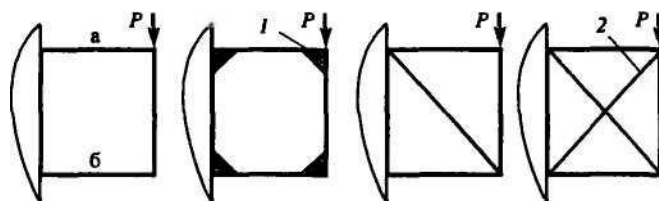


Рис. 4.4.6. Увеличение жесткости рамы введением косынок и диагональных элементов

На рис. 4.4.6 прямоугольная рама закреплена своей левой стороной. Под воздействием силы  $P$  элементы  $a$  и  $b$  рамы работают на изгиб. Повышение жесткости конструкции возможно введением косынок и диагональных элементов, работающих на растяжение и сжатие.

В табл. 4.4.1 приведены параметры материалов, применяющихся для конструкций ЭА. Удельная прочность и жесткость материалов рассчитывается по следующим выражениям:

- для металлов

$\sigma_p^{уд}$	$\sigma_n^{уд}$	$E^{уд}$
-----------------	-----------------	----------

$$\sigma_{\delta}^{\delta\delta} = [\sigma]_{\delta} / \rho; \quad \sigma_{\epsilon}^{\delta\delta} = [\sigma]_{\epsilon}^{2/3} / \rho; \quad E_{\delta}^{\delta\delta} = E / \rho;$$

- для неметаллов

$$\sigma_{\delta}^{\delta\delta} = [\sigma]_{\delta} / \rho; \quad \sigma_{\epsilon}^{\delta\delta} = [\sigma]_{\epsilon} / \rho,$$

где  $\rho$  – 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. 4.4.2.

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. 4.4.7). 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.

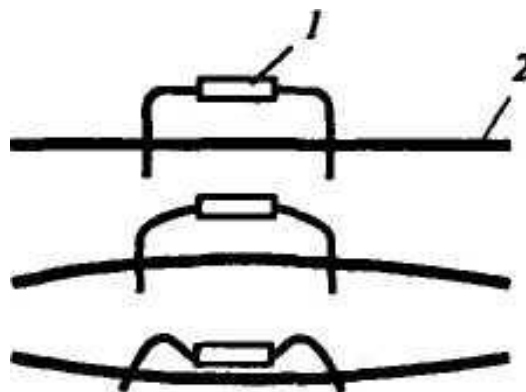


Рис. 4.4.7. Изменение формы выводов элементов при вибрациях печатной платы: 1 — элемент; 2 — печатная плата

Таблица 4.4.1

Параметры конструкционных материалов

Материал	Марка	$\sigma_p$ МПа	E, ГПа	$\rho$ г/см <sup>3</sup>	Удельная прочность и жесткость		
					$\sigma_p^{уд}$	$\sigma_H^{уд}$	E <sup>уд</sup>
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
Магниеые 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	BT1-0	687	113	4,5	152	28	25
	BT3-1	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	—
Фторопласт	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  $y_0 = 254GQ / fo^2$ , мм собственная частота  $fo$  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. 4.4.8);
- уменьшением добротности платы на резонансе ее демпфированием

многослойным покрытием лака.

Таблица 4.4.2

## 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  $Q = (0,5...2,0)\sqrt{f_0}$ ,  $f_0$  — 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 4.4.8. Ориентация выводов элемента на поверхности контактной площадки: 1 — печатная плата; 2 — элемент; 3 — контактная площадка

Таблица 4.4.3

## 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. 4.4.3 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.

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 воздействиях;
- 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 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.

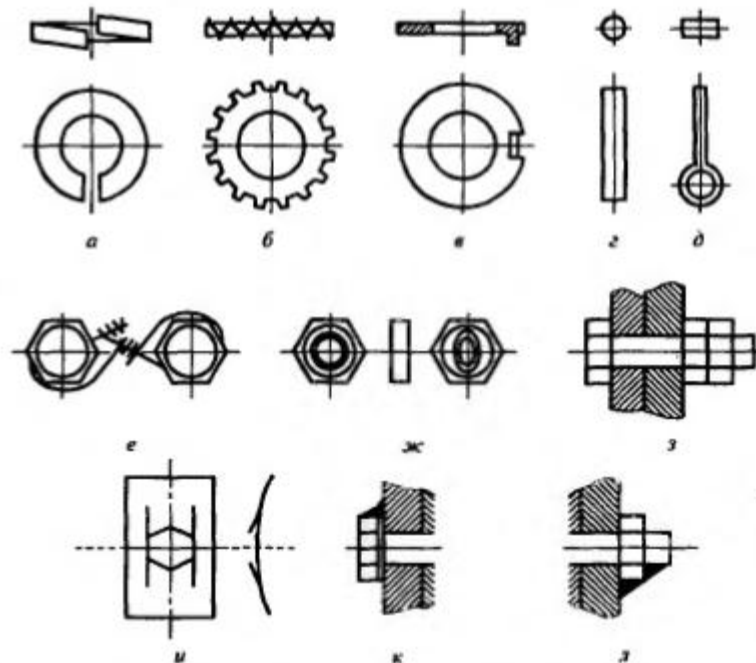


Рис. 4.4.9. Элементы фиксации и способы фиксации крепежных элементов

На рис. 4.4.9 приведены различные способы фиксации крепежных элементов. Пружинная шайба (рис. 4.4.9, 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. 4.4.9, 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 (рис. 4.4.9, в), отгибается, прижимая его к поверхности гайки. В отверстие, просверленное после затягивания гайки, устанавливают штифт (рис. 4.4.9, г). Корончатая (прорезная) гайка фиксируется шплинтом (рис. 4.4.9, д), проходящим через отверстие в теле болта. В головках болтов просверливаются отверстия, через которые протягивается и закручивается страховочная проволока (рис. 4.4.9, 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 — рис. 4.4.9, ж). На рис. 4.4.9, з показана фиксация болта двумя гайками. Условие надежной фиксации:

нижняя гайка должна плотно прилегать к контргайке. На рис. 4.4.9, и приведен перфорированный элемент, действующий как самоконтрящаяся гайка. На рис. 4.4.9, к и 4.4.9, л показаны примеры установки крепежных элементов на краску (головка винта и шайба, болт и гайка фиксируются краской).

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 4.1

### ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ РЭС ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Влияние динамических механических воздействий на надежность и качество РЭС

**Виды и источники механических воздействий.** В процессе производства, эксплуатации и хранения РЭС могут испытывать те или иные механические динамические воздействия, количественно характеризующиеся диапазоном частот колебаний, а также их амплитудой, ускорением, временем действия. Качественно все виды механических динамических воздействий делятся на вибрационные (вибрации), ударные (удары), инерционные (линейные ускорения). Под *вибрацией РЭС* обычно понимают длительные знакопеременные процессы в ее конструкции, которые влияют на работу РЭС. *Ударом* называют кратковременное воздействие, длительность которого примерно равна двойному времени распространения ударной волны через объект, подвергшийся удару. Удар сопровождается конечным изменением скорости движения тела за время удара. В момент удара происходит колебание системы на вынужденной частоте, определяемой длительностью удара, а после него — на собственной частоте конструкции.

*Линейные ускорения* характерны для всех объектов, движущихся с переменной скоростью (например, при разгоне и торможении), а также при движении по криволинейной траектории (центробежное ускорение). В процессе работы может изменяться значение и направление линейного ускорения (например, при выключении стартового двигателя ракеты). Результат воздействия линейных ускорений на РЭС может носить характер динамический (при изменении ускорения до установившегося значения) или статический (после достижения установившегося значения).

Механические воздействия характеризуются перегрузкой  $n$ , которая кратна ускорению силы тяжести  $g$ . Вибрации характеризуются также ампли-



тудой колебаний и их частотой, а удар — длительностью, амплитудой и формой ударного импульса. Перегрузка объекта при вибрации выражается коэффициентом виброперегрузки  $n_{вбр} = xf^2/250$   $x$  — амплитуда вибраций объекта, мм;  $f$  — частота колебаний, Гц. Амплитуда перегрузки ударного импульса, характеризующая максимальное значение ударного ускорения, может быть определена по формуле  $n_{уд} \approx 0,05V_{уд}/S$ , где  $S$  — перемещение соударяющихся тел с учетом амортизации, мм;  $V_{уд}$  — мгновенная скорость в момент удара, мм/с.

При перемещении по криволинейной траектории (например, при маневрировании летательного аппарата) линейное центробежное ускорение может быть определено по формуле  $n_{лнцб} = 4 \cdot 10^{-3} Rf_{об}^2$ , где  $n_{лнцб}$  — линейная центробежная перегрузка при вращении;  $R$  — радиус вращения, мм;  $f_{об}$  — частота равномерного вращательного движения, Гц.

Параметры механических динамических воздействий на РЭС для различных условий эксплуатации согласно отечественным и зарубежным данным приведены в табл. 5.1. *Источниками механических воздействий* могут быть: вибрации движущихся частей двигателя и движителя из-за несбалансированности их частей и наличия зазоров; акустические колебания, вызванные взаимодействием турбулентных газовых потоков с корпусом реактивного двигателя; перегрузки при маневрировании; неровности дорог и стыки рельсов; аэродинамические и гидродинамические воздействия окружающей среды (ветер, волны, снежные лавины, землетрясения, обвалы и т. д.); взрывные воздействия; небрежность или неосторожность обслуживающего персонала (падение РЭС, удары при погрузочно-разгрузочных работах и пр.).

Механические динамические нагрузки, воздействующие на РЭС, могут вызвать большие механические напряжения в их элементах (компонентах), нарушить нормальные режимы работы или даже привести к выходу из строя тех или иных частей РЭС. Согласно проведенным в США исследованиям, от 22 до 41% отказов самолетного оборудования были вызваны действием механических нагрузок, а число отказов бортовых ЭВМ вследствие механических воздействий достигает 50%.

**Влияние механических воздействий на РЭС.** В результате воздействия вибраций, ударов и линейных ускорений могут иметь место следу-



менение параметров полупроводниковых приборов: вольт-амперных характеристик диодов с барьером Шотки, транзисторов и других приборов; емкости и напряжения пробоя р–n переходов, некоторых характеристик диодов Ганна, коэффициента усиления транзисторов, длины волны излучения полупроводникового лазера и т. д. В основе этих изменений лежат явления смещения энергетических уровней, изменения ширины запрещенной зоны при деформации; эффективной массы, времени жизни и подвижности носителей тока.

Механические воздействия на РЭС могут привести к изменению диаграммы направленности антенн, сбоям цифровых устройств, снижению чувствительности и смещению частотного диапазона приемников, повышению энергопотребления (при коротком замыкании), снижению точности работы. Это наиболее вероятно в тех случаях, когда компоненты РЭС одновременно подвергаются различным воздействиям: вибрациям, ударам, линейным ускорениям, монтажным усилиям (затяжка винтов), возникшим в результате полимеризации внутренним напряжениям в полимерах и напряжениям в структурах из-за различия ТКЛР материалов и изменения температуры.

Наибольшую опасность представляют резонансы отдельных компонентов и узлов, возникающие в случаях, когда их собственная частота ( $f_0$ ) совпадает с частотой действующих на аппаратуру вибраций ( $Y$ ). Собственная частота компонентов и узлов

конструкции может быть определена по формуле  $f_0 = (1/2\pi)\sqrt{K/m}$ , где  $K$ —коэффициент жесткости конструкции, Н/м, определяемый как отношение силы к деформации, вызванной этой силой;  $m$  — масса конструкции, кг. Поведение конструкции при воздействии механических колебаний зависит от соотношения действующей и собственной частот конструкции, называемого коэффициентом расстройки:  $\gamma = f/f_0$ . Для виброизолирующих систем коэффициент расстройки стараются выбрать более 1,41, а для жесткозакрепленных компонентов—равным 0,8...0,3. При  $\gamma=1$  режим соответствует резонансному. Одной из основных причин вибраций и резонансов является наличие зазоров между деталями и люфтов в соединениях. Чем выше частота колебаний, тем при меньшем зазоре может возникнуть резонанс. Зоны контакта деталей при их соударении являются центрами возбуждения механических колебаний.

**Защита РЭС от механических воздействий** осуществляется следующими группами методов: 1) уменьшается интенсивность источников ме-

ханических воздействий (путем их балансировки, уменьшения зазоров, виброизоляции самого источника механических воздействий); 2) уменьшается величина передаваемых РЭС воздействий (путем его виброизоляции, демпфирования, устранения резонансов, активной виброзащиты с помощью эксцентриков, маятников, гироскопов); 3) используются наиболее прочные и жесткие компоненты и узлы.

Методы первой группы применяют специалисты по двигателям и транспортным средствам. Методы второй и третьей групп используют конструкторы РЭС, однако методы активной виброзащиты имеют ограниченное применение по причине высокой сложности и низкой надежности технических решений.

Устойчивость РЭС к механическим воздействиям принято характеризовать ее вибропрочностью и виброустойчивостью. Первая характеристика связана с транспортной вибрацией (аппаратура выключена), вторая—с эксплуатационной (аппаратура включена). *Вибропрочностью* называют способность конструкции противостоять разрушающему воздействию вибрации в заданном диапазоне частот и ускорений (не должно происходить силовых и усталостных разрушений). *Виброустойчивостью* называют способность конструкции РЭС выполнять свои функции при вибрации в заданных диапазонах частот и ускорений (не должно происходить изменения параметров РЭС: чувствительности, мощности излучения, паразитной модуляции, перемежающихся отказов и т. д.). *Под прочностью* понимают способность конструкции выдерживать нагрузки без остаточной деформации и разрушения. Повышение прочности в ряде случаев связано с увеличением массы конструкции или использованием дорогих и дефицитных материалов (титана, легированных сталей, бериллиевых сплавов и т.д.), сложной технологии их обработки (магниевых, бериллиевых сплавов).

#### **§ П4.2. Защита РЭС от механических воздействий с помощью виброизоляции**

**Система виброизоляции РЭС.** Виброизоляция осуществляется путем установки между РЭС и основанием упругих опор, образующих вместе с конструкцией РЭС сложную колебательную систему, которая обладает свой-

ствами демпфирования и частотной селекции механических колебаний. Демпфирование заключается в поглощении механических колебаний за счет трения в материале конструкции упругой опоры (резине, поролоне, вибропоглощающем покрытии), сочленениях амортизатора (сухом демпфере) перетекающем через дроссель материале (воздухе, вязкой жидкости). *Частотная селекция механических колебаний* заключается в том, что система виброизоляции в зарезонансной области является фильтром нижних частот, а при совпадении собственной частоты системы и частоты внешних воздействий переходит в резонансный режим.

В общем случае виброизолированный объект может иметь шесть степеней свободы относительно трех осей координат (три — для линейных перемещений и три — для угловых). В тех случаях, когда линейные или угловые перемещения не являются взаимосвязанными, можно ограничиться рассмотрением поведения системы с одной степенью свободы, для чего требуется только одна координата, чтобы определить положение системы в любой момент времени (рис. 5.1). Такая колебательная система состоит из инерционного элемента массой  $m$ , установленного на пружине, характеризуемой коэффициентом жесткости  $K$ , и демпфере с коэффициентом демпфирования  $h$ , которые закреплены непосредственно на основании. Таким образом, тело массой  $m$  может перемещаться в направлении оси  $X$  так, что его положение полностью определяется координатой  $x$ .

Силы, действующие при колебаниях виброизолированного объекта, можно разделить на возмущающие, восстанавливающие, демпфирующие, инерционные. Возмущающие силы  $F(t)$  — это внешние силы, являющиеся некоторыми функциями времени и вызывающие вынужденные колебания системы, на которую они действуют.

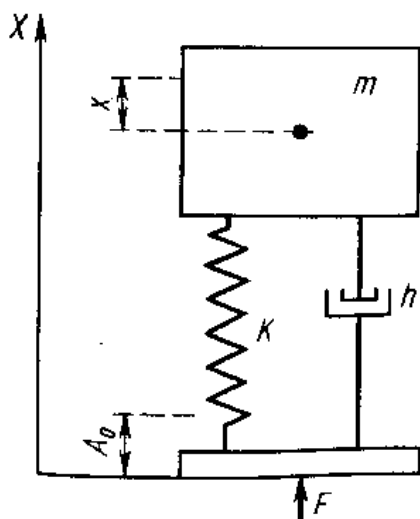


Рис. 5.1. Колебательная система из инерционного элемента массой  $m$ , спиральной пружины и демпфера, подверженная силовому возмущению  $F$

Восстанавливающие силы  $Kx$  возникают при отклонениях системы виброизоляции от положения равновесия и стремятся вернуть ее в это положение. Колебательные свойства систем виброизоляции обусловлены в основном наличием восстанавливающих упругих сил. Количественным показателем, характеризующим восстанавливающие свойства амортизатора, является статический коэффициент жесткости  $K$ , устанавливающий связь между восстанавливающей силой и деформацией амортизатора  $x$ . Демпфирующие силы  $h$  зависят от знака, знака и скорости или знака и амплитуды колебаний. Эти силы всегда направлены противоположно направлению скорости или перемещения, что способствует гашению колебаний за счет поглощения энергии. Инерционные силы ( $m\ddot{x}$ ) обусловлены массой колеблющейся системы и ее ускорением.

Если такую виброизолированную механическую систему вывести каким-либо образом из равновесия или сообщить ей некоторую скорость, то после прекращения действия внешней силы под действием инерционных и упругих сил в ней возникает затухающее колебательное движение. Такие колебания называют свободными собственными колебаниями системы. Количественной мерой этих колебаний является частота свободных колебаний (Гц) или собственная частота системы  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K/m}$ . Если колебания системы совершаются в результате постоянного действия силы  $F(t)$ , приложенной непосредственно к виброизолированному телу массой  $m$  либо к основанию

или в результате постоянно совершаемого движения основания, то такие колебания называют вынужденными; частота их соответствует частоте внешнего воздействия  $f$ . Дифференциальное уравнение движения тела массой  $m$  под воздействием силы  $F(t)$  для демпфированной системы

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + Kx = F(t), \quad (5.1)$$

где  $h$  — коэффициент демпфирования;  $K$  — коэффициент жесткости амортизатора с линейной характеристикой. В случае сухого трения  $h = \mu N \operatorname{sgn} \dot{x}$ , где  $\mu$  — коэффициент трения;  $N$  — нормальная к поверхности сила;  $\operatorname{sgn}$  — знак, означающий, что сила направлена противоположно скорости движения (для сухого трения) или противоположно направлению перемещения (для вязкого трения). В случае вязкого трения  $h = \dot{x} \operatorname{sgn} x$ ; в случае нелинейного демпфирования с использованием вязкой жидкости  $h = \dot{x}^2 \operatorname{sgn} x$ , т. е. пропорционален квадрату скорости и противоположен перемещению. Иногда применяют амортизаторы с нелинейной характеристикой, особенностью которых является зависимость частоты их свободных колебаний от амплитуды.

Качество виброизоляции характеризуется коэффициентом виброизоляции (динамичности)  $\eta$ , который показывает, во сколько раз амплитуда перемещения объекта  $x$  или его перегрузка  $n_{об}$  больше (меньше) амплитуды  $A_0$  перемещения основания, на котором расположен виброизолированный объект или его перегрузки  $n_{осн}$ :  $\eta = x/A_0 = n_{об}/n_{осн}$ . Другим показателем, характеризующим качество виброизоляции, является коэффициент эффективности виброизоляции  $\mathcal{E} = (1 - \eta) \cdot 100$  (рис. 5.2).

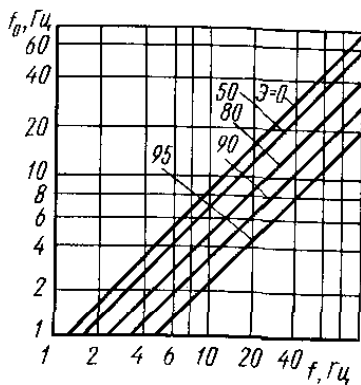


Рис. 5.2. Номограмма для определения эффективности виброизоляции системы  $\mathcal{E}$  в зависимости от соотношения частот  $f$  и  $f_0$

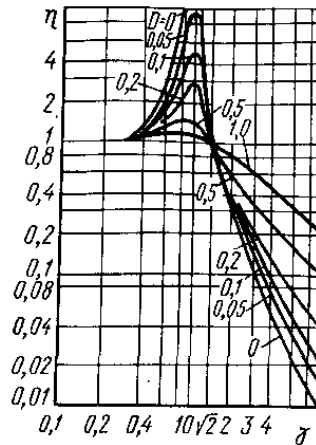


Рис. 5.3. Зависимость коэффициента виброизоляции  $\eta$  от коэффициента расстройки  $\gamma$  при вязком трении и кинематическом возбуждении (через основание)

Решение уравнения (5.1) зависит от коэффициента относительного затухания  $D = h/h_{кр}$ , где  $h_{кр} = 2\sqrt{Km}$  — коэффициент критического демпфирования. Стационарной частью решения уравнения (5.1) является зависимость  $x=x(t)$ , на основании которой в результате преобразования могут быть построены зависимости коэффициента виброизоляции  $\eta$  от коэффициента расстройки  $\gamma = f/f_0$  для различных значений коэффициента относительного затухания  $D$  (рис. 5.3). При рассмотрении графиков рис. 5.3 можно отметить следующие особенности работы амортизаторов с демпфером.

1. При  $\gamma$ , близком единице, наступает резонанс. Однако из-за наличия демпфирования амплитуда колебаний виброизолированного объекта не превышает 5... 10-кратного усиления колебаний основания. Чем больше демпфирование, тем при резонансе меньше максимальная амплитуда колебаний. Часто резонансные явления возникают в переходном режиме при пуске или остановке двигателя. В этом случае чем быстрее происходит изменение частоты, тем меньше амплитуда резонансных колебаний. В случае слабого демпфирования (острая резонансная кривая) отличие частоты возбуждающих колебаний от частоты собственных колебаний на 5... 10% приводит к исчезновению резонанса.



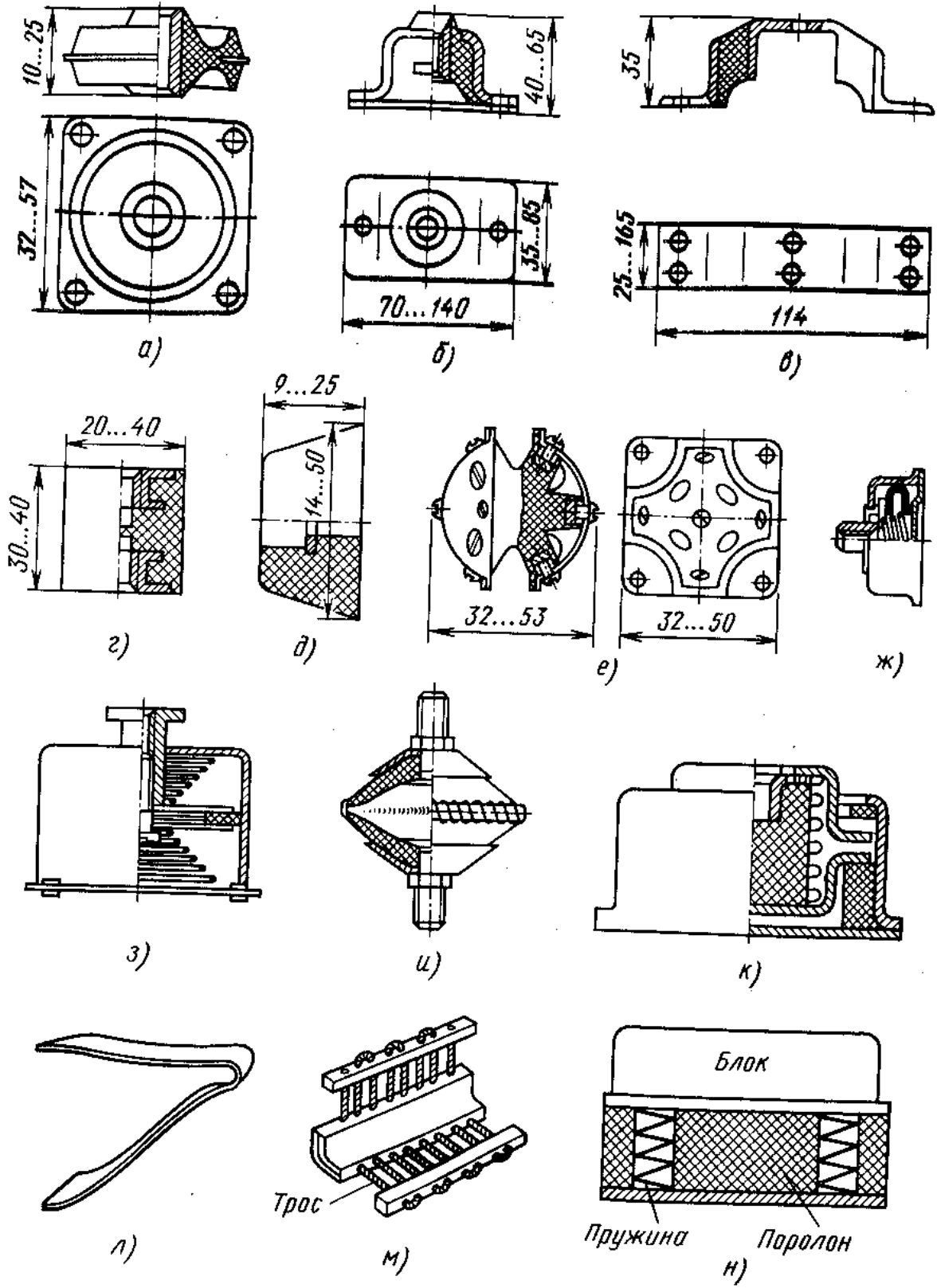


Рис. 5.4. Схематическое изображение наиболее распространенных типов амортизаторов:  
 а—АП, АЧ; б—АКСС; в—АМ; г—АН; д—АО; е—АР; ж—АД; з—АФД, АПН; и—ДК;  
 к—АЦМ, АЦП; л—лепестковый; м—тросовый; н—пружинно-поролоновый

Таблица 5.2

### Параметры некоторых приборных амортизаторов

Тип	Резонансная частота при нормальной нагрузке, Гц	Амплитуда вибраций, мм, не более	Диапазон нагрузок на один амортизатор, Н	Относительный коэффициент демпфирования	Диапазон рабочих температур, °С
АП, АЧ	15...20; 30...35	0,5	4,5...157	0,05	−45...+80
АД	8...10	0,5...1,5	3...150	0,06...0,5	−60...+70
АФД	15...20; 25...30	—	2...150	Сила демпфирования	−60...+150
АПН	10...20	—	5...150	0,15...0,25	−60...+150
ПК	11...12	1	4...400	Высокий	−50...+150
АПМ	8...12	1	0,5...5	Более 0,5	−50...+150
АЦП	8...10	1	5...300	» 0,5	−50...+150
Лепестковый	10...12	—	—	—	−60...+150
Тросовый	10...12	Более 1,5	20...680	Более 0,5	−70...+260

2. Независимо от степени демпфирования осуществляется защита от вибрации в области, удаленной от резонансной, когда  $\gamma > \sqrt{2}$ . С увеличением  $\gamma$  все кривые стремятся к нулю и эффективность виброизоляции повышается. В области частот, где  $\gamma > \sqrt{2}$ , значение  $\eta$  уменьшается при снижении демпфирования, т. е. увеличение демпфирования оказывает отрицательное влияние на эффективность виброизоляции в зарезонансной области.

3. В области  $\gamma < 1$ , т. е. при  $f < f_0$ , виброизоляция отсутствует ( $\eta \geq 1$ ). В этом случае защита от механических воздействий достигается обеспечением жесткости и прочности элементов конструкции, а также их демпфированием за счет свойств материалов.

**Амортизаторы для виброизоляции РЭС.** Частоты интенсивных вибрационных воздействий на РЭС обычно составляют 5...2000 Гц. Поэтому нижняя граница частоты собственных колебаний амортизаторов должна лежать в полосе 1...3 Гц. Для виброударозащиты РЭС первых поколений были разработаны так называемые *приборные амортизаторы*, которые можно разделить на три группы: *резинометаллические* (АП, АЧ, АКСС, АМ, АО, АР и др.); *пружинные с демпфированием* (АД, АФД, АПН и др.); *металлические* (АЦМ, АЦП, АКПО, тросовые и т. д.). Схематическое изображение некоторых приборных амортизаторов приведено на рис. 5.4, а основные характеристики — в табл. 5.2. Недостатками приборных амортизаторов являются высокая собственная частота (10...30 Гц) и линейность статических и динамических характеристик. Это накладывает ограничение на диапазон изменения статических нагрузок и свободный ход амортизатора одного типоразмера, что обусловле-

но сложностью регулирования сил внутреннего трения таких материалов, как резина, поролон металл пружины.

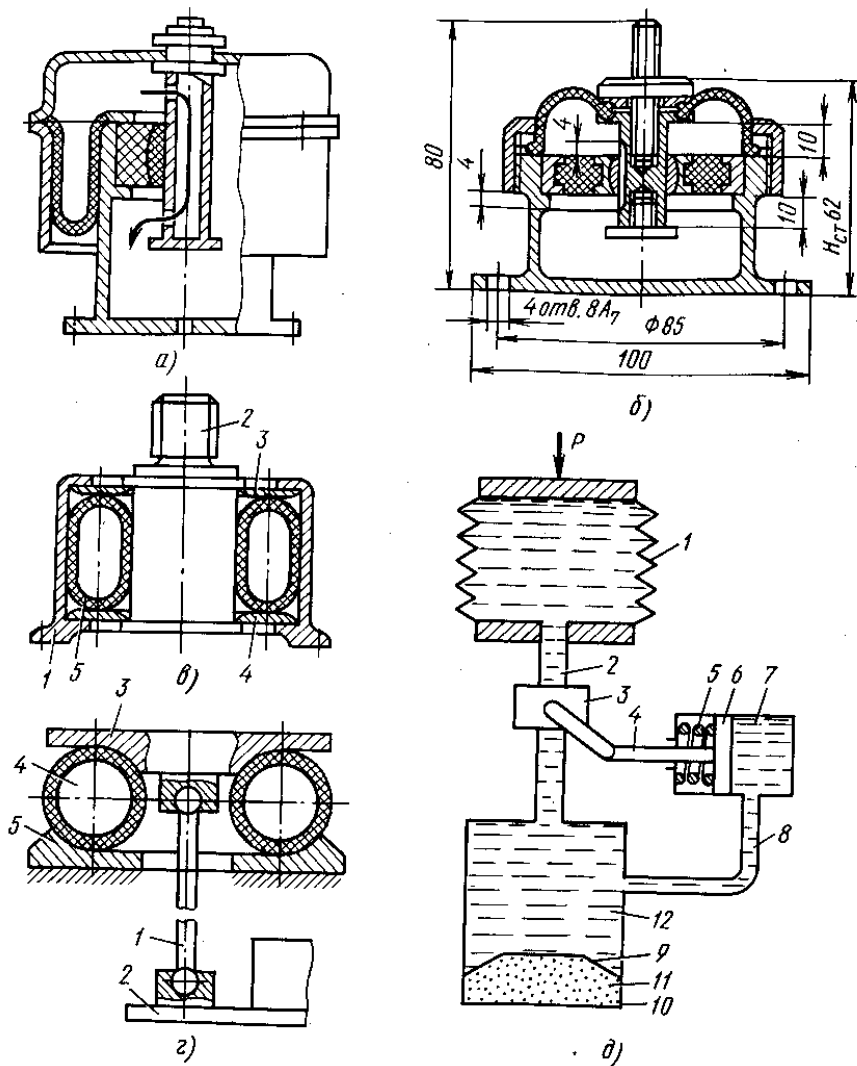


Рис. 5.5. Пневмогидравлические амортизаторы:  
 а — с упругим шарниром; б — малогабаритный со сферическим шарниром; в — тороидальный;  
 1 — корпус; 2 — шток; 3, 4 — кольца; 5 — упругий элемент; в — маятниковый противосейсмический;  
 1 — маятник; 2 — несущая платформа; 3 — опора; 4 — упругий элемент; 5 — основание;  
 д — гидропневматический: 1 — упругий элемент; 2, 8 — трубопроводы; 3 — вентиль; 4 — шток;  
 5 — пружина; 6 — поршень; 7 — корпус с жидкостью; 9 — диафрагма; 10 — баллон; 11 — сжатый газ; 12 — жидкость

От этих недостатков свободны пневмогидравлические амортизаторы (рис. 5.5.). Нижний предел собственной частоты амортизаторов различных типов составляет 0,5...5 Гц. Это позволяет осуществлять виброизоляцию от воздействий частотой 1...7 Гц. Дросселирование упругой среды позволяет обеспечить большой диапазон изменения статических нагрузок ( $P_{\max}/P_{\min}=15...25$ ) и нелинейность характеристик при значительном отклонении амортизаторов от статического положения, что позволяет получить высо-

кокачественную виброудароизоляцию при ограниченном ходе амортизатора. В последнее время стали также использовать амортизаторы на основе вибропоглощающих полимерных материалов (рис. 5.6—5.8), что позволяет осуществить виброзащиту в диапазоне 20...2000 Гц. Это особенно важно при защите аппаратуры от акустического воздействия двигателей самолетов и ракет.

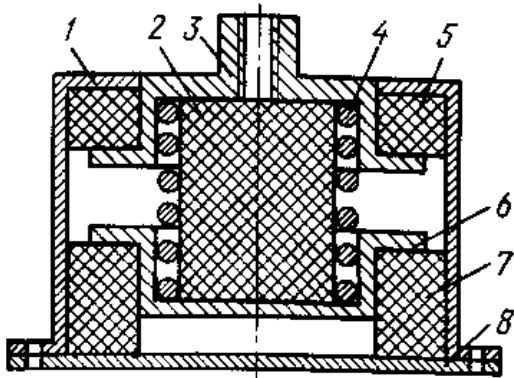


Рис. 5.6. Полимерно-пружинный амортизатор:

1—корпус; 2—полимерный демпфер; 3—шток; 4—цилиндрическая пружина; 5, 7—верхняя и нижняя полимерные прокладки; 6—обойма; 8—дно

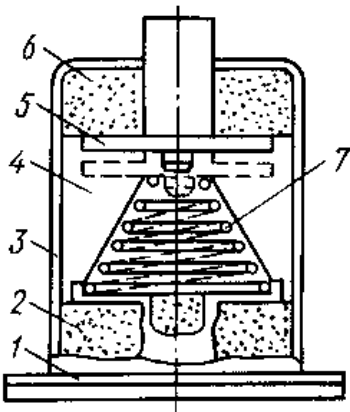
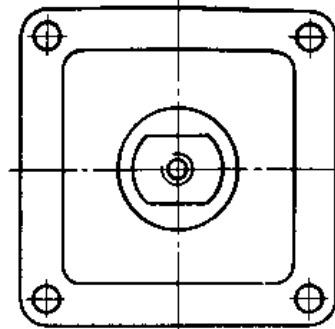
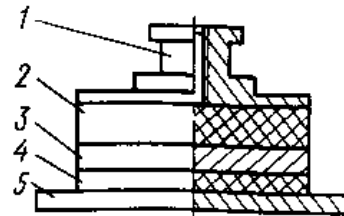
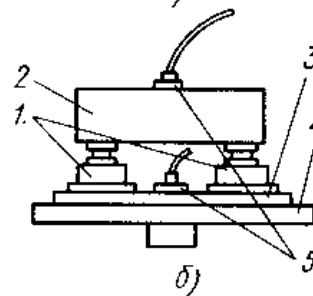


Рис. 5.7. Полимерно-пружинный амортизатор с экспоненциальной пружиной:

1—корпус амортизатора; 2, 6—нижняя и верхняя полимерные прокладки; 3—обойма; 4—полимерный демпфер; 5—шток; 7—пружина



а)



б)

Рис. 5.8. Трехслойный полимерный амортизатор (а) (1—верхняя обойма; 2—полимер КМ-9; 3—полимер, композиция № 1 на основе низковязкого тиокола; 4—полимер ЭЗК-7; 5—основание) и схема испытаний амортизаторов (б) (1—амортизаторы; 2—макет РЭС; 3—крепежное приспособление; 4—вибростенд; 5—виброакселерометры)

**Проектирование системы виброизоляции.** При разработке системы виброизоляции габариты, масса, стоимость, надежность и условия эксплуатации защищаемого объекта выступают в качестве ограничений. Определению подлежат типоразмер и число амортизаторов, их расположение, параметры прокладок для устранения перекосов и меры коррекции положения оси жесткости амортизаторов. Критериями правильности проектирования системы виброизоляции являются допустимые перегрузки и амплитуды вынужденных колебаний виброизолированного блока.

При проектировании системы виброудароизоляции исходят из общих положений теории колебаний и теории удара. Как правило, производят статический и динамический расчет. Целью статического расчета системы виброизоляции является определение статических нагрузок на каждый амортизатор и последующий выбор типоразмера амортизаторов в соответствии с найденными нагрузками. При этом уточняются координаты расположения амортизаторов и параметры выравнивающих прокладок. Если блок массой  $m$  опирается на четыре несимметрично расположенных амортизатора (рис. 5.9), то нагрузка на каждый амортизатор:

$$\begin{aligned} m_{a1} &= m(l-l_2)(b_1-b_2)/(l_1b_1), \\ m_{a2} &= m(b_1-b_2)/(l_1b_1), \\ m_{a3} &= m(l_1-l_2)b_2/(l_1b_1), m_{a4} = ml_2b_2/(l_1b_1). \end{aligned}$$

Если нагрузка оказывается неравномерной, то следует либо изменить координаты размещения амортизаторов, либо применить амортизаторы различных типоразмеров. В случае различного начального прогиба амортизаторов необходимо предусмотреть выравнивающие прокладки. Для изменения суммарной жесткости системы виброизоляции применяют параллельные, последовательные и смешанные схемы соединения амортизаторов (рис. 5.10). Формулы для расчета суммарной жесткости приведены на рис. 5.10. Параллельное соединение амортизаторов делает систему более жесткой, а последовательное соединение—более мягкой. Однако стремление повысить эффективность виброизоляции путем последовательного соединения двух амортизаторов приводит к системе с 12 степенями свободы, что чаще всего дает обратный эффект. Прибегать к таким конструкциям, как правило, нежелательно.

В качестве примера определим типоразмер четырех симметрично расположенных амортизаторов для системы виброизоляции, на которую уста-

новлен блок массой  $m = 5,6$  кг. Допустимая перегрузка на блок  $0,8$  g; основная система подвергается вибрации амплитудой  $0,5$  мм с частотой  $30 \dots 70$  Гц.

1. Наибольшее действующее ускорение (перегрузка)

$$n_{\max} = f_{\max} A_0 / 250 = 70^2 \cdot 0,5 / 250 = 9,8 \text{ g}.$$

2. Необходимый коэффициент виброизоляции

$\eta = n_{\text{об}} / n_{\text{осн}} = 0,8 / 9,8 = 0,082$ ; по графику рис. 5.3 для  $\eta = 0,08$  и  $D = 0,05$  находим коэффициент расстройки:  $\gamma = f / f_0 = 3,8$ .

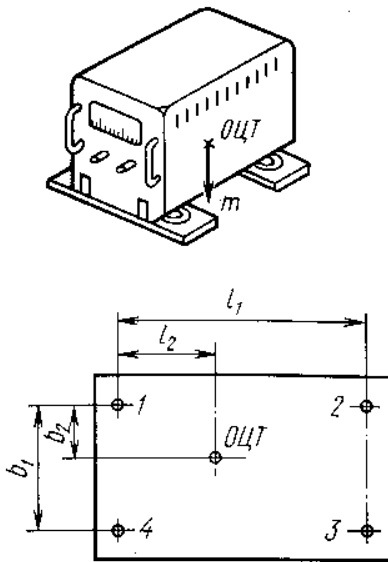


Рис. 5.9. Схема для определения нагрузки на амортизатор блока:  
ОЦТ — ось центра тяжести

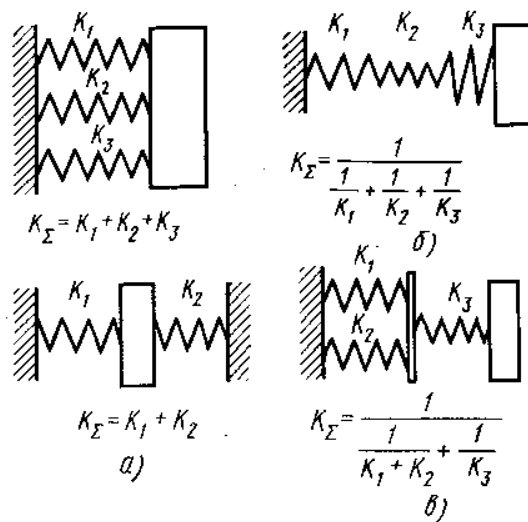


Рис. 5.10. Схемы соединения амортизаторов:  
а — параллельное; б — последовательное;  
в — смешанное

3 Максимальная собственная частота амортизатора для худшего случая ( $30$  Гц)  $f_0 = f / \gamma = 30 / 3,8 \approx 8$  Гц.

Для вертикальных колебаний с небольшой амплитудой ( $1 \dots 1,5$  мм) такую собственную частоту могут обеспечить амортизаторы типа АД, имеющие  $D = 0,03 \dots 0,25$ ;  $f_0 = 8 \dots 10$  Гц. При установке на четыре амортизатора нагрузка на каждый из них составит  $m/4 = 5,6/4 = 1,4$  кг. Выбираем амортизатор типа АД-1,5, рассчитанный на нагрузку  $10 \dots 15$  Н.

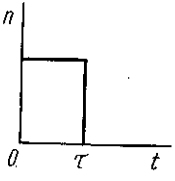
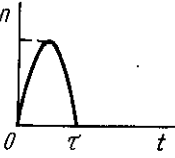
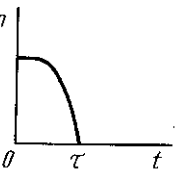
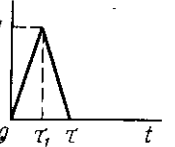
4. Определяем ожидаемую амплитуду колебаний блока:  $x = A_0 n_{\text{об}} / n_{\text{осн}} = 0,5 \cdot 0,8 / 9,8 = 0,041$  мм. Так как нагрузка на амортизаторы одинакова, то прокладки в данном случае не нужны.

При расчете системы виброизоляции на воздействие ударного импульса необходимо определить максимальное ускорение и перемещение амортизированного объекта в результате действия ударного импульса. Исходным для расчета является закон изменения ускорения во время удара  $n(t)$ , который может быть задан функциональной зависимостью или графически, что полностью определяет форму ударного импульса.

Форма эквивалентного ударного импульса принимается прямоугольной, что в энергетическом отношении является наиболее тяжелым случаем для системы амортизации. Формулы для вычисления параметров эквивалентного прямоугольного импульса для некоторых частных случаев приведены в табл. 5.3, где  $n(t)$  — закон изменения ускорения основания амортизированного объекта,  $\tau$  — длительность ударного импульса. Если соотношение между длительностью  $\tau_{\text{эк}}$  эквивалентного ударного импульса и собственной частотой системы  $\omega_0$  соответствует условию  $\tau_{\text{эк}} \geq \pi / \omega_0$ , то удар называется длинным, при  $\tau_{\text{эк}} \ll \pi / \omega_0$  удар называется коротким. Максимальное перемещение амортизированного объекта для длительного удара  $x_{y\partial} = 2n_{\text{эк}} / \omega_0^2$ , а для короткого  $x_{y\partial} = \sqrt{2}n_s \sqrt{1 - \cos \omega_0 \tau_s} / \omega_0^2$ . Максимальное ускорение амортизированного объекта  $n_{об}$  в результате действия прямоугольного ударного импульса определяется по формуле  $n_{об} = \omega_0^2 x_{y\partial}$ . Защита от удара имеет место в том случае, если обеспечено соотношение  $\tau < \pi / 3\omega_0$ . При этом ускорение объекта меньше ускорения внешнего удара. Поэтому для обеспечения условий защиты от ударов надо стараться уменьшить значение  $\omega_0$ . Однако следует учесть нелинейность характеристик амортизаторов, иначе могут быть получены неверные результаты.

Таблица 5.3

Формулы для расчета параметров эквивалентного прямоугольного ударного импульса

Ударный импульс		$n_{эк}$	$\tau_{эк}$
 $n(t) = \begin{cases} n, & 0 < t \leq \tau, \\ 0, & t < 0, t > \tau \end{cases}$		$n$	$\tau$
 $n(t) = n \sin\left(\frac{\pi}{\tau} t\right)$		$\frac{2}{\pi} n$	$\tau$
 $n(t) = n \cos\left(\frac{\pi}{2\tau} t\right)$		$\frac{n}{2}$	$\frac{4}{\pi} \tau$
 $n(t) = \begin{cases} \frac{n}{\tau_1} t & \text{при } 0 < t < \tau_1, \\ \frac{n(\tau - t)}{\tau - \tau_1} & \text{при } \tau_1 < t < \tau \end{cases}$		$\frac{3}{4} \frac{n\tau}{2\tau - \tau_1}$	$\frac{2}{3} (2\tau - \tau_1)$

Реальные виброизолирующие системы способны ослаблять только очень короткие и резкие удары (ускорением 50...100 g и длительностью 0,001 с) или продолжительные, но слабые (5...10 g и 0,005...0,01 с). Если система не защищена от удара и перемещение объекта превышает допустимую осадку амортизаторов, то выбирают амортизатор другого типа или вводят ограничение перемещения объекта.

Сложность выбора амортизаторов, защищающих одновременно от вибрации и ударов, обусловлена тем, что при ограниченном ходе амортизатора с малой жесткостью (низкой собственной частотой) сильный удар может довести его до упора. В результате удар от упора, передаваемый аппаратуре, может иметь ускорение большее, чем при первоначальном ударе, так как перемещение при торможении может быть меньше. Затрудняет работу амортизаторов одновременное воздействие вибраций, ударов и линейных ускорений. Так, линейное ускорение после достижения установившегося значения приводит к дополнительной деформации амортизаторов и может довести их до упора. В этом случае виброизолирующие свойства исчезают, а виброзащита РЭС осуществляется за счет прочности и жесткости конструкции РЭС (как



и в случае отсутствия амортизаторов). При одновременном воздействии значительных ударных нагрузок и вибраций целесообразно использовать пневмогидравлические амортизаторы.

Определяя расположение амортизаторов, надо стремиться к тому, чтобы координаты центра тяжести объекта по возможности совпадали с координатами центра жесткости системы виброизоляции. Схемы расположения амортизаторов относительно центра тяжести РЭС могут быть самыми разнообразными (рис. 5.11). Каждая схема имеет свои преимущества и недостатки. Схема нижнего монтажа (рис. 5.11, а) чаще всего используется для амортизации при воздействии вибрации. Это наиболее простая схема, и ее часто выбирают по привычке без учета недостатков. Наиболее существенный из них состоит в том, что при боковых нагрузках следует предусматривать достаточный зазор между виброизолируемым объектом и смежными конструкциями, чтобы избежать соударения. Такие же последствия вызывает несовпадение центра тяжести РЭС с центром жесткости системы виброизоляции. Поэтому эта схема применяется в РЭС винтовых самолетов.

При пространственном нагружении в данной системе могут применяться лишь некоторые типы амортизаторов, например резинометаллические или типов АПН ДК, тросовые, некоторые виды пневматических амортизаторов. Схему, представленную на рис. 5.11, б, целесообразно использовать в условиях пространственного нагружения на реактивных самолетах и ракетах. Здесь амортизаторы расположены в плоскости, проходящей через центр тяжести защищаемого объекта. Такая схема позволяет уменьшить колебания по горизонтальным осям. Наиболее выгодно располагать амортизаторы так, чтобы расстояние от центра тяжести объекта было равно радиусу инерции. Однако это не всегда удается, так как связано с увеличением габаритов системы монтажа амортизаторов.

Амортизаторы не обязательно располагать в горизонтальной плоскости, проходящей через центр тяжести РЭС. Эффективность их не уменьшается при установке на наклонной плоскости, проходящей через центр тяжести объекта, на расстояниях, равных радиусу инерции (рис. 5.11, в). Габариты такой системы больше, но больше и ее устойчивость. Монтаж амортизаторов в двух горизонтальных плоскостях (рис. 5.11, г) обычно используют при защите РЭС, у которых отношение высоты к ширине больше двух. Установка амортизаторов в верхней плоскости обеспечивает дополнительные точки опоры. Если амортизаторы расположены несимметрично относительно центра тяже-

сти, то все режимы собственных колебаний взаимосвязаны и система становится неустойчивой.

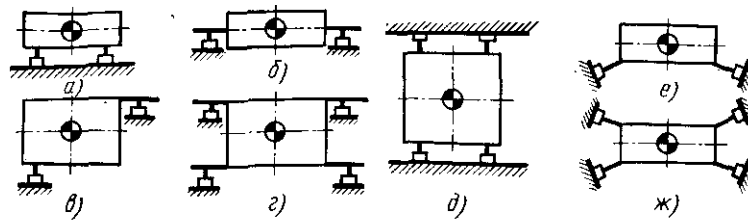


Рис. 5.11. Схема монтажа амортизаторов

Двусторонний монтаж (рис. 5.11, д) обеспечивает всестороннюю защиту от действующих сил. Амортизаторы предварительно нагружены, что делает систему жесткой, т. е. сдвигает ее собственную частоту в область более высоких частот. Схема монтажа амортизаторов под углом к осям симметрии объекта (рис. 5.11, е) используется для изоляции пространственных вибраций, но она и наиболее сложная, так как при небольшом отклонении направления линий, проходящих через ось жесткости амортизаторов, от направления на центр тяжести объекта в системе возникают все шесть связанных режимов собственных колебаний.

Если ось жесткости амортизатора совпадает с центром тяжести объекта, то все действующие силы уравниваются и вращательные колебания невелики. Этому условию удовлетворяет схема монтажа амортизаторов, расположенных снизу и сверху объекта под углом (рис. 5.11, ж). Так как характеристики системы амортизации во всех положениях виброизолируемого объекта одинаковы, то характер движения объекта установки (транспортного средства) может быть любым. При проектировании системы амортизации необходимо учитывать наличие кабелей, шин заземления, трубопроводов и пр., которые могут изменить собственную частоту системы амортизации и приводить к смещению центра тяжести виброизолируемого объекта.

Разработка системы виброизоляции является сложной, трудоемкой и длительной работой, сократить которую можно при использовании моделирования на аналоговой ЭВМ МН-10 и др. Это позволяет избежать натурального моделирования, сократить сроки и увеличить точность моделирования. Удобство этого метода заключается в возможности быстрого изменения исходных данных и наглядности наблюдения характера колебаний виброизолированного объекта.

В качестве примера рассмотрим методику моделирования системы виброизоляции объекта массой 5 кг, установленного по схеме рис. 5.11,а на четырех пружинных амортизаторах типа АФД-5, имеющих демпфер с сухим трением. На основание воздействует ударный импульс амплитудой  $F=200$  Н и длительностью  $\tau=0,01$  с. Жесткость одного амортизатора типа АФД-5 равна 14,3 Н/мм, коэффициент демпфирования  $h=32$  Н. Требуется определить характер изменения во времени перемещения, скорости и ускорения виброизолированного объекта.

Представляем систему виброизоляции в виде системы с одной степенью свободы (рис. 5.1). В этом случае коэффициент жесткости всей системы виброизоляции, включающей четыре амортизатора,  $K= 57200$  Н/м. Считаем, что до приложения ударного импульса система находилась в равновесии:  $x_0 = \dot{x}_0 = \ddot{x}_0 = 0$ . Для проведения масштабирования на основе предварительных расчетов принимаем:  $x_{\max} = 0,005$  м;  $\dot{x}_{\max} = 0,4$  м/с;  $\ddot{x}_{\max} = 100$  м/с<sup>2</sup>. Выбираем длительность ударного импульса в машине  $\tau_{\text{маш}} = 1$  с. Поведение системы описывается уравнением (5.1).

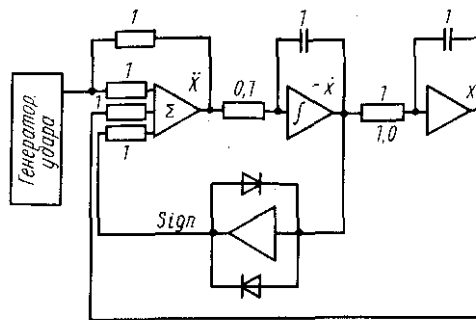


Рис. 5.12. Схема модели удара на амортизированный объект с использованием блоков аналоговой ЭВМ

Рассчитаем масштабные коэффициенты в последовательности:

1. Приведем уравнение (5.1) к виду, удобному для моделирования:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}F - \frac{K}{m}x - \frac{1}{m}h \operatorname{sgn} \dot{x}.$$

Обозначим  $K_p = 1/m$ ,  $K_x = K/m$ ,  $K_v = h/m$ .

2. Произведем выбор масштабов, если для ЭВМ МН-10 максимальная амплитуда сигнала  $U_{\max} = 25$ В:

$$\begin{aligned}
 M_x &= U_{\max}/x_{\max} = 25/0,005 = 5000 \text{ В/м}; \\
 M_{\dot{x}} &= U_{\max}/\dot{x}_{\max} = 25/0,4 = 62,5 \text{ В} \cdot \text{с/м}; \\
 M_{\ddot{x}} &= U_{\max}/\ddot{x}_{\max} = 25/100 = 0,25 \text{ В} \cdot \text{с}^2/\text{м}; \\
 M_h &= U_{\max}/h_{\max} = 25/32 = 0,78 \text{ В/Н}; \\
 M_F &= U_{\max}/F_{\max} = 25/200 = 0,125 \text{ В/Н}; \\
 M_{\tau_{\text{маш}}} &= \tau_{\text{маш}}/\tau = 1/0,01 = 100.
 \end{aligned}$$

Эти масштабы учитывают при анализе осциллограмм, полученных на экране осциллографа или ленте самописца.

3. Произведем переход от физического уравнения к уравнению, пригодному для решения на аналоговой ЭВМ:

$$\frac{d^2 U}{dt^2} = \frac{M_{\ddot{x}}}{M_F} \frac{F}{m} + \frac{M_{\dot{x}}}{M_x} \frac{K}{m} - \frac{M_{\ddot{x}}}{M_h} \frac{h}{m}.$$

Схема модели для решения этого уравнения представлена на рис. 5.12.

4. Рассчитаем коэффициенты  $K$ , учитывая, что для интегрирующих блоков  $K = M_{\text{вых}} / M_{\text{вх}} M_{\tau_{\text{маш}}}$ , а для суммирующего блока  $K = M_{\text{вых}} K_{\text{уп}} / M_{\text{вх}}$ , где  $K_{\text{уп}} = K_F, K_x, K_h$ ;  $M_{\text{вых}}$  и  $M_{\text{вх}}$  — масштабы величин на выходе и входе блоков:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \frac{M_{\ddot{x}}}{M_x M_{\tau_{\text{маш}}}} = \frac{62,5}{0,25 \cdot 100} = 2,5; \quad K_2 = \frac{M_x}{M_x M_{\tau_{\text{маш}}}} = \frac{5000}{62,5 \cdot 100} = 0,8; \\
 K_{11} &= \frac{M_{\ddot{x}} K_F}{M_F} = \frac{0,25 \cdot 0,2}{0,125} = 0,4; \quad K_F = \frac{1}{m} = \frac{1}{5} = 0,2; \\
 K_{12} &= \frac{M_{\ddot{x}} K_x}{M_x} = \frac{0,25 \cdot 11440}{5000} = 0,57; \quad K_x = \frac{K}{m} = \frac{57200}{5} = 11440; \\
 K_{13} &= \frac{M_{\ddot{x}} K_h}{M_h} = \frac{0,25 \cdot 0,2}{0,75} = 0,06; \quad K_h = \frac{1}{m} = 0,2.
 \end{aligned}$$

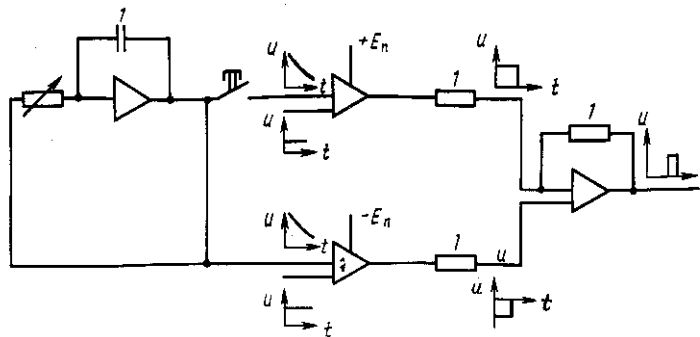


Рис. 5.13. Схема генератора, имитирующего ударное воздействие в ЭВМ:  
 $E_n$  — напряжение питания

Схема генератора, имитирующего ударное воздействие, приведена на рис. 5.13, а результаты моделирования — на рис. 5.14. Из осциллограмм следует, что длительность переходного процесса при воздействии ударного импульса длительностью 0,01 с составляет 0,15 с; максимальное перемещение объекта

виброизоляции имеет место через 0,025 с после начала удара, максимальное ускорение – через 0,005 с после начала удара; коэффициент демпфирования изменяет знак в момент, когда объект находится в крайних положениях, а скорость равна нулю.

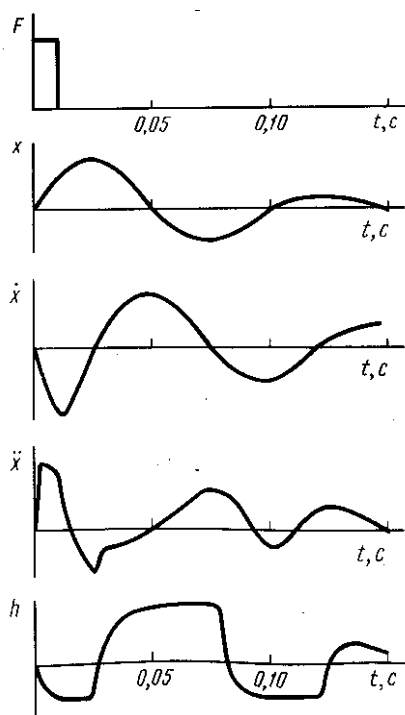


Рис. 5.14. Осциллограммы результата моделирования ударного воздействия на ЭВМ:

$F$  — ударный импульс,  $x$  — перемещение;  
 $\dot{x}$  — скорость,  $\ddot{x}$  — ускорение;  $h$  — демпфирование

**Использование вибропоглощающих материалов.** Уменьшение массы и габаритов блоков РЭС, а также необходимость обеспечения работы объектов виброизоляции в широком диапазоне частот (вплоть до 2000 Гц) затрудняют защиту от механических воздействий с помощью традиционных методов амортизации и демпфирования, так как не обеспечивают минимума массогабаритных параметров РЭС и защиты их от акустических воздействий высокой интенсивности (130... 165 дБ). Эффективным средством является *введение демпфирования в конструкцию РЭС*. В ряде случаев оно используется совместно с амортизацией. Наиболее перспективным и распространенным способом демпфирования конструкций РЭС является одно- или двусторонняя заливка (рис. 5.15, 5.16) или введение высокоэффективных *вибропог-лощающих материалов* в структуру несущих оснований. Эти способы основаны на способности полимеров рассеивать большое количество энергии при растяжении, изгибе или сдвиге за счет упругих свойств. К недостаткам данных способов относятся: худшая ремонтпригодность

при заливке, худший теплоотвод от залитых элементов, сильная зависимость демпфирующих свойств от температуры, возможность возникновения больших внутренних напряжений в компаунде при изменении температуры, изменение свойств полимеров при воздействии радиации. Тем не менее использование вибропоглощающих материалов позволило снизить коэффициент виброизоляции ячеек, представленных на рис. 5.17, с 40 до 3 за счет приклейки ИС к рамке ячейки (рис. 5.17, а) компаундом КТ-102, а к склеенной компаундом КТ-102 (рис. 5.17, б) плате — клеем КВК. При одном и том же эффекте демпфирования толщина внешней заливки должна быть в 5... 10 раз больше, чем при введении вибропоглощающих материалов в структуру несущей конструкции.

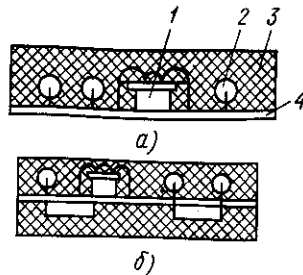


Рис. 5.15. Односторонняя (а) и двусторонняя (б) заливка вибропоглощающим пенополиуретаном:  
1, 2 — электрорадиоэлементы;  
3 — пенополиуретан; 4 — плата

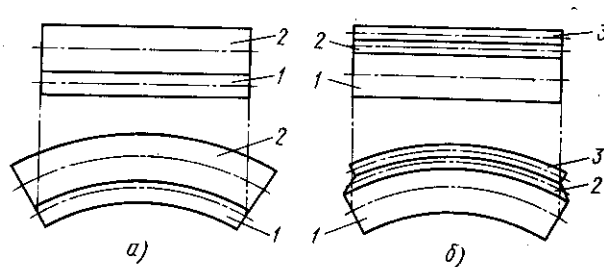


Рис. 5.16. Деформации вибропоглощающих конструкций с наружным (а) и внутренним (б) вибропоглощающим слоем:  
1, 3 — конструктивный; 2 — вибропоглощающий материал

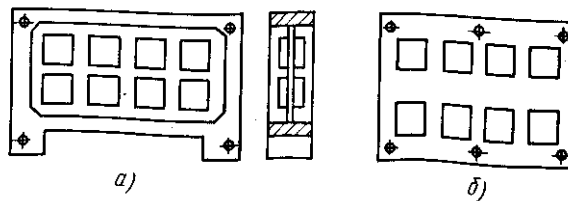


Рис. 5.17. Ячейки с низким коэффициентом динамичности ( $\beta=3$ ) на основе металлической рамки (а) и склеенной компаундом КТ-102 печатной платы (б) ( $\beta=\eta_{\text{рез}}$ )

Таблица 5.4

## Параметры вибропоглощающих материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Температура, °С	Динамический модуль упругости, Па	Коэффициент механических потерь $\eta_n$
Листовой:				
Агат	1400	20	$1,4 \cdot 10^9$	0,38
ВМЛ-25	1570	20	$5,0 \cdot 10^9$	0,40
Мастика:				
Адем-НШ	1150	20	$5,4 \cdot 10^9$	0,25
Антивибрит-5М	1600	20	$5,4 \cdot 10^9$	0,25
Антивибрит-7М	1600	70	$2,0 \cdot 10^9$	0,30
Композитный материал полиакрил-ВС, полимерная прослойка	1200	20	$6,0 \cdot 10^7$	0,65
Металлополимерный листовой материал випонит, полимерная прослойка	1200	20	$1,2 \cdot 10^8$	1,25

Примечание.  $\eta_n = E_2/E_1$ ,  $E_1 + jE_2 = E^*$  — комплексный динамический модуль упругости (модуль Юнга).

Параметры некоторых вибропоглощающих материалов приведены в табл. 5.4. Примеры применения вибропоглощающих материалов для подавления резонансных колебаний в конструкциях представлены на рис. 5.18—5.20. На рис. 5.20 представлено несущее основание для монтажа ракетного РЭС (США) массой 11,3 кг, состоящее из семи слоев стеклотекстолита, склеенных вязкоупругим компаундом, и имеющее массу 2,25 кг. Это позволило по сравнению с монолитным основанием такой же формы уменьшить резонансную частоту с 320 до 95 Гц, а коэффициент виброизоляции — с 36 до 3,6, т. е. на порядок. Для обеспечения работоспособности вибропоглощающих покрытий при изменении температуры внешней среды их иногда выполняют из электропроводного полимера, что позволяет поддерживать температуру путем подогрева полимеров электрическим током.

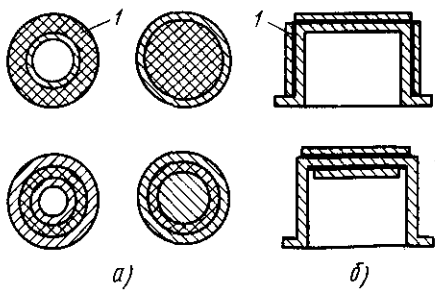


Рис. 5.18. Применение вибропоглощающих материалов в трубчатых и стержневых конструкциях (а) и в конструкциях экранов (б):  
1 — вибропоглощающий материал

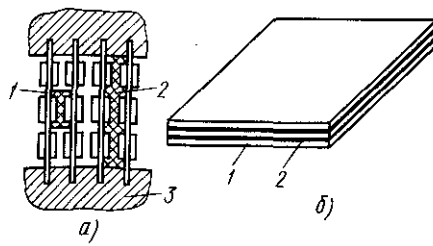


Рис. 5.19. Демпфирование электромагнитных плат РЭС:  
а — кассетная конструкция; б — слоистая плата;  
1 — конструкционный материал; 2 — вибропоглощающий материал; 3 — кассета

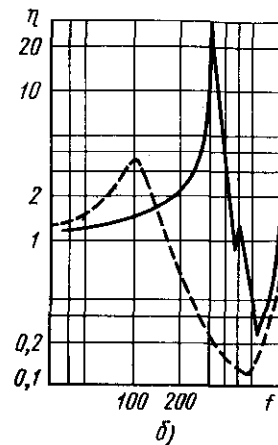
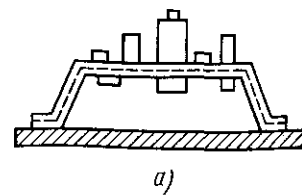


Рис. 5.20. Виброизоляция конусной несущей платы (а) и ее частотная характеристика (б)

**Технологичность конструкций виброизоляции РЭС.** Для обеспечения технологичности виброзащиты РЭС могут быть приняты следующие меры: 1) использованы типовые виброизолирующие основания, разработанные и изготавливаемые специализированными организациями (рис. 5.21); 2) обеспечена в производстве стабильность центра тяжести виброизолированного объекта благодаря стабильности расположения в однотипных объектах (блоках, стойках) элементов электрических связей (плоских и радиочастотных кабелей, жгутов объемных проводников и т. д.) и различных коммуникаций (трубопроводов, шин заземления и т. д.). 3) предусмотрены прокладки, с помощью которых могут быть компенсированы неодинаковые прогибы амортизаторов из-за разброса положения центра тяжести объекта амортизации и жесткости отдельных амортизаторов; 4) конструкция системы виброизоляции должна обеспечивать легкость сборки, демонтажа, регулировки.

Для обеспечения технологичности конструкции виброизоляции, выполненной с применением внешней заливки или внутренних вибропоглощающих слоев, предусматриваются следующие меры: 1) предпочтительно выбирается заливочный материал (пенопласт и др.), полимеризующийся без дополнительного повышения температуры; 2) должна быть обеспечена хорошая адгезия внутренних вибропоглощающих слоев конструкции по всей поверхности контакта; 3) полимерные материалы выбираются с учетом их токсичности и



химической агрессивности (особенно для гермоблоков); 4) разрабатываются технологические приемы демонтажа и повторного монтажа залитого или установленного на виброизолирующий слой объекта виброизоляции, а также исправления брака при виброизоляции заливкой либо при установке на виброизолирующий слой (это не всегда требует демонтажа и повторного монтажа).

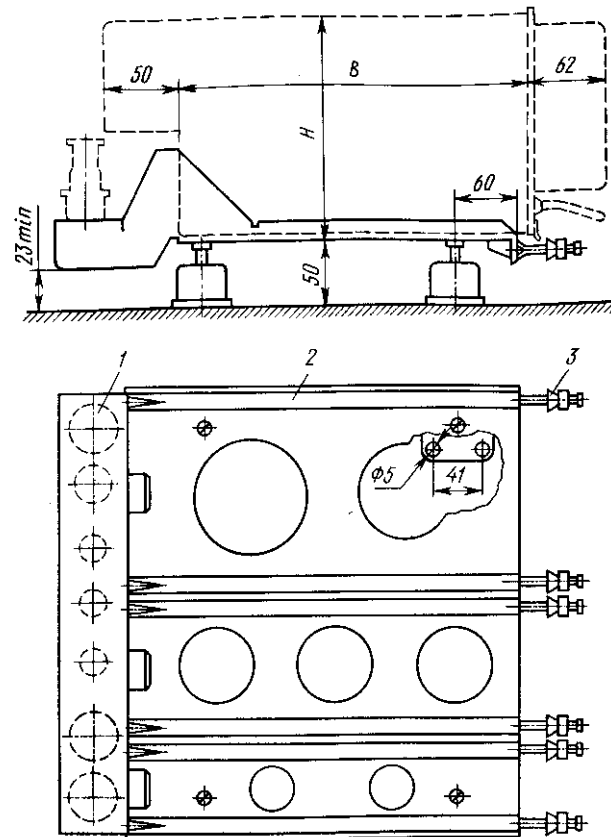


Рис. 5.21. Конструкция типового амортизационного основания для блоков самолетных РЭС:

1—соединители; 2—направляющие; 3—накидные болты;  $H$ ,  $B$ —высота и длина блока

### § 5.3. Обеспечение прочности и жесткости элементов конструкции РЭС

Введение амортизаторов между РЭС и объектом установки ослабляет амплитуду внешних механических воздействий, но не уничтожает их полностью. В тех случаях, когда для обеспечения приемлемого ослабления требуются амортизаторы с очень большим свободным ходом или недостаточно эффективны вибропоглощающие структуры, надежность работы РЭС обеспе-

чивается прочностью и жесткостью элементов конструкции, а также **исключением** резонансов.

**Прочностные параметры материалов конструкций РЭС.** Прочность и жесткость элементов конструкции в значительной степени зависят от используемых материалов, их обработки, а также от геометрических размеров самих элементов, их формы и способов крепления.

Эксплуатационные возможности материалов, используемых в конструкциях РЭС, характеризуются рядом параметров, наиболее важными из которых являются предел прочности при растяжении  $\sigma_{\text{в}}$ , сжатии  $\sigma_{\text{сж}}$  и изгибе  $\sigma_{\text{и}}$ ; предел текучести  $\sigma_{\text{т}}$ ; предел выносливости при симметричном цикле  $\sigma_{-1}$ ; модуль упругости  $E$  (модуль Юнга); удельные значения этих параметров  $\gamma$ , равные их отношению к плотности материала. *Пределом прочности* при растяжении называют напряжение, равное отношению наибольшего растягивающего усилия к первоначальной площади поперечного сечения образца. Аналогично определяются  $\sigma_{\text{и}}$  и  $\sigma_{\text{сж}}$ . *Пределом текучести* называют напряжение, при котором образец заметно удлиняется (например, на 0,2%) без увеличения напряжения. При удлинении на 0,2% предел текучести обозначают  $\sigma_{0,2}$ . Величина  $\sigma_{-1}$  зависит от числа циклов нагружения знакопеременной нагрузкой. Установлено, что деталь из стали, выдержавшая  $2 \cdot 10^8$  циклов, может выдерживать любое число циклов; для деталей из цветных металлов это число увеличивается до  $5 \cdot 10^8$  циклов (рис. 5.22). *Модуль упругости* определяется формулой  $E = \sigma_y / \varepsilon$ , где  $\sigma_y$  – предел упругости, ГПа;  $\varepsilon = \Delta l / l$  – относительное удлинение ( $\Delta l$  – относительное удлинение образца,  $l$  – его длина).

Значения этих параметров для некоторых материалов представлены в табл. 5.5. и 5.6. Из рассмотрения этих таблиц можно сделать следующие выводы: 1) от состояния металлов и сплавов (отожженный, закаленный и т. д.) зависит не только предел прочности, но и удельная прочность  $\sigma_{\text{уд}}$  при растяжении и изгибе; 2) среди материалов, предназначенных для работающих на растяжение деталей, максимальную удельную прочность имеют бериллий, титановый сплав ВТЗ-1, алюминиевый сплав В-95, сталь 45, минимальную удельную прочность – алюминиевый сплав АД-1, латунь Л-63 и др. Модуль упругости металлов и сплавов не зависит от состояния материала, поэтому удельная жесткость  $E_{\text{уд}}$  также не зависит от состояния материала.

Рис. 5.22. Кривые усталости для стали (кривая 1, левая шкала) и для демпфирующего алюминиевого сплава (кривая 2, правая шкала):

$N$  — число циклов нагружения;  $\sigma_a = 0,5(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$  — амплитуда цикла

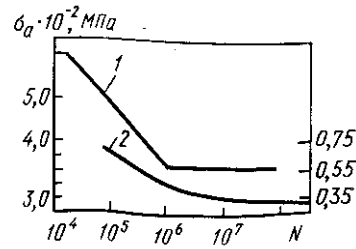


Таблица 5.5

## Удельные прочность и жесткость металлов и сплавов

Металл или сплав	Состояние материала	Предел прочности $\sigma_a$ , МПа	Модуль упругости $E$ , ГПа	Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Удельная прочность		Удельная жесткость $E_{уд}$
					при растяжении $\sigma_{удр}$	при изгибе $\sigma_{удн}$	
Сталь углеродистая:	Нормализованный	334	203	7,85	42,5	12,3	25,9
		412			52,5	14	
Ст. 45	Холоднотянутый	600	200	7,85	76,5	18	25,5
		1176			150	28,2	
Сталь легированная:	Отожженный	540	193	7,75	69,7	16,9	24,9
		930			120	24,3	
4Х13	После закалки и отпуска	490	198	7,85	62,4	15,7	25,3
		1080			137,5	26,6	
Алюминиевый сплав:	Отожженный	58	69,6	2,71	21,4	7,7	25,7
		147			54,3	14,3	
АД-1	Нагартованный	275	69,6	2,85	96,5	21	24,2
		490			172	30,9	
В-95	Закаленный и состаренный	294	103	8,43	35	10,7	12,2
		490			58,2	15	
Магниевый сплав:	Мягкий	392	115	8,23	47,7	13,1	14,0
		735			89,2	20	
МА2-1	Твердый	294	103	8,43	35	10,7	12,2
		490			58,2	15	
МА-8	Мягкий	392	115	8,23	47,7	13,1	14,0
		735			89,2	20	
Медный сплав: латунь Л-63	Твердый	294	103	8,43	35	10,7	12,2
		490			58,2	15	
бронза Бр.Б2	Мягкий	392	115	8,23	47,7	13,1	14,0
		735			89,2	20	
Титановый сплав:	Отожженный	687	113	4,5	152	28,5	25,0
		981			218	36,2	
ВТ1-0	»	981	113	4,5	218	36,2	25,1
		1176			262	40,9	
ВТ3-1	Закаленный и состаренный	480	290	1,84	260	—	158
		480			260	—	
Бериллий	Горячевыдавленный через матрицу	480	290	1,84	260	—	158
		480			260	—	
Алюминиево-бериллиевые сплавы (40...80% Ве)	Горячепрессованный, выдавленный и отожженный	390...	280...	300	210...	—	152...
		620			335	163	
Алюминиево-бериллиевые сплавы (40...80% Ве)	—	490	132	2,35	210	—	56
		490			210	—	

Сплав Al—Mg—Li (72%Al; 6,5%Mg; 1,4%Li)	При специальной термообработке	120...	—	1,6	75...	—	—
		205 340... 450	—	1,75	117 210... 260	—	—

Таблица 5.6

## Удельные прочность и жесткость неметаллических материалов

Материал	Предел прочности, МПа, при			Модуль упругости $E$ , ГПа	Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Удельная прочность при			Удельная жесткость $E_{уд}$
	растяжении $\sigma_r$	сжатии $\sigma_{сж}$	изгибе $\sigma_{из}$			растяжении $\sigma_{удр}$	сжатии $\sigma_{удсж}$	изгибе $\sigma_{удиз}$	
Фенопласт К-21-22	53,3	147,0	63,7	8,6	1,4	38,0	105,0	45,6	6,17
Пресс-материал АГ-4С	491,0	196,2	245,0	34,3	1,8	273,0	109,0	136,0	19,1
Гетинакс II	68,7	—	98,1	20,6	1,4	49,0	—	70,0	14,7
Текстолит	981	147,0	157,0	9,8	1,4	70,0	105,0	112,0	7,0
ШТК									
Стеклотекстолит ВФТ-С	334,0	77,0	245,0	—	1,85	180,0	41,7	132,5	—
Стеклопластик СВМ-ЭР	442,0	442,0	687,0	20,6	2,0	221,0	221,0	343,5	10,3
Фторопласт-4А	22,1	19,6	13,7	0,44	2,19	10,1	8,96	6,2	0,2
Смола полиамидная 68Н	49,1	68,7	68,7	1,67	1,1	44,6	6,25	6,25	1,52
Стекло органическое СТ-1	76,5	137,0	137,0	2,86	1,18	64,8	116,2	116,2	2,42
Пенопласт ПС-1-350	4,9	—	—	0,15	0,35	14,0	—	—	0,45

Среди неметаллических материалов, предназначенных для работающих на растяжение/сжатие деталей, максимальной удельной прочностью обладают стеклопластик СВМ и пресс-материал АГ-4С; минимальной удельной прочностью – фторопласт-4, пенопласт ПС-1-350 (последний имеет малую плотность  $\gamma = 0,35$  г/см<sup>3</sup>); из материалов, выбираемых для работающих на изгиб деталей, максимальную удельную прочность  $\sigma_{уд}$  имеют стеклопластик СВМ и пресс-материал АГ-4С; удельная прочность минимальна у фторопласта и фенопласта К-21-22.

Среди материалов для деталей, рассчитываемых на жесткость, максимальную удельную жесткость имеют пресс-материал АГ-4С и гетинакс II; удельная жесткость минимальна у фторопласта-4, пенопласта ПС-1-350. К наиболее перспективным материалам относятся бериллий, алюминий-бериллиевые и магниевые сплавы. Ввиду высокой стоимости бериллий и его сплавы находят ограниченное применение (в основном в авиационной и космической технике). Достоинствами бериллия являются высокие прочность (ресоры из бериллия выдерживают 20 млрд. толчков, из обычного материала — 850 тыс.), термостойкость (до 700...800 °С), теплопроводность. К недостаткам относятся хрупкость (это затрудняет его прокатку, ковку, резание; детали обычно получают методом порошковой металлургии), токсич-

ность, высокая стоимость. Аллюминиево-бериллиевые и магниеволитиевые сплавы несколько дешевле и лучше поддаются обработке, но тоже довольно дороги и дефицитны. В конструкциях РЭС бериллий и его сплавы используются в исключительных случаях.

**Обеспечение прочности и жесткости элементов конструкций РЭС** затруднено рядом причин, прежде всего сложностью конструкции РЭС, которая является многокомпонентной системой. Каждый компонент может иметь несколько основных резонансных частот (для каждого элемента конструкции, для каждой степени свободы, для каждой гармоник спектра колебаний). В ряде случаев необходимо увеличивать прочность и жесткость при сохранении или даже уменьшении массы и габаритов разрабатываемой конструкции по сравнению с прототипами. Это особенно актуально с точки зрения снижения массы бортовых РЭС, сохранения природных ресурсов, возрастания удельной доли несущих конструкций в общей массе конструкций РЭС (30...40% для РЭС первых поколений, до 70% для РЭС четвертого поколения), уменьшения времени на обработку деталей.

В других случаях сложность обеспечения прочности и жесткости элементов конструкции определяется сложностью расчетного обоснования прочности и жесткости из-за того, что расчетные модели конструкций в виде рам чаще всего являются статически неопределимыми системами. Расчетная модель конструкции РЭС в большинстве случаев содержит значительное число степеней свободы и оказывается сложной для аналитического расчета. Это затрудняет получение модели простой и в то же время достаточно точной. Используемые машинные методы – конечных разностей, конечных элементов и различные вариационные методы – также имеют недостатки. Недостатком метода конечных разностей является большая трудоемкость составления конечно-разностных уравнений при подготовке задачи к решению на ЭВМ. В связи с этим применение этого метода ограничивается только простыми конструкциями (например, не имеющими ступенчатого изменения жесткости). С помощью метода конечных элементов можно решать задачи для конструкции любой сложности, но трудоемкость подготовки исходных данных также велика. Метод возник как результат аппроксимации сплошной среды элементами конечных размеров. Используется он в тех случаях, когда нельзя произвести расчеты другими методами. Имеются трудности и при использовании аналоговых моделей.

Таблица 5.7

Исходные данные для составления расчетных схем прочности конструкции РЭС

Наименование узла, позиция сборочного чертежа	Вид и направление сил	Место (способ) крепления	Расчетная модель	Источник нагрузки
Кронштейн крепления корпуса, поз. 9	Статическая сила, действующая в направлении, перпендикулярном плоскости основания	К корпусу (прилив), к объекту (болтом)	Балка, зашцементированная на одном конце и нагруженная на другом	Масса прибора с учетом кронштейнов и перегрузки
Печатная плата в сборе, поз. 5	Вибрации, действующие в направлении, перпендикулярном плоскости платы	Сзади (соединителем), спереди (планкой с винтами), сверху и снизу (направляющими)	Пластина, жестко закрепленная по коротким сторонам, с опорой по длинным сторонам	Масса печатной платы и ЭРЭ с учетом вибрации частотой 20...70 Гц, амплитудой 0,5 мм

Целесообразен следующий порядок работ по обеспечению прочности и жесткости РЭС: 1) составление расчетной схемы блока (узла), выявление действующих сил и элементов конструкции, в которых напряжения и деформации могут достигать недопустимо больших значений; 2) выбор расчетных моделей для критичных узлов;

3) расчет собственной частоты узлов и напряжений и сравнение их с допустимыми;

4) разработка мероприятий по обеспечению жесткости и прочности узлов. При определении расчетной схемы и расчетных моделей исходная информация представляется в виде таблицы, например табл. 5.7.

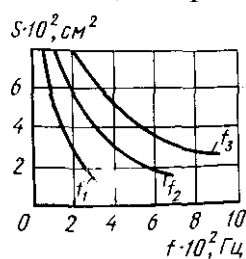




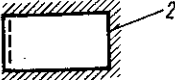

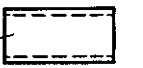

Рис. 5.23. Зависимость площади стеклотекстолитовой платы толщиной 1,5 мм, закрепленной по углам, от собственных частот (тона  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ )

Жесткость конструкции (или ее элементов) обеспечивается при собственной ее частоте (или элементов) выше действующей, что исключает работу в резонансном режиме. Для плат таким способом можно получить собственную частоту не выше 400...500 Гц (рис. 5.23). В общем случае собственная частота (Гц) недемпфированной платы может быть определена по формуле  $f = K_M K_{\text{масс}} Ch \cdot 10^4 / a^2$ , где  $K_M = \sqrt{E\gamma_c / E_c\gamma}$ ;  $E$  и  $\gamma$  – модуль упругости и плотность материала платы;  $E_c$  и  $\gamma_c$  – модуль упругости и плотность стали соот-

ответственно;  $m_э$  и  $m_{п}$  — масса элементов и самой платы;  $C$  — коэффициент, зависящий от способа закрепления платы и соотношения размеров сторон платы  $a/b$  (рис. 5.24, табл. 5.8);  $h$  — толщина платы;  $a$  — длина платы (наибольший размер);  $b$  — ширина платы (наименьший размер);  $K_{\text{масс}} = \frac{1}{1 + m_э / m_{п}}$ .

Таблица 5.8

Значение коэффициента  $C$  для стальной пластины

Схема закрепления пластины	$a/b$					
	1	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
	86	145	234	352	497	868
	56	84	124	176	240	864
	76	139	230	349	494	866
	69	93	131	181	244	406
	38	70	112	165	230	394
	47	76	117	170	234	375

Примечание: 1 — сторона пластины свободно оперта; 2 — сторона пластины зашкреплена; 3 — сторона пластины свободна.

Для увеличения жесткости платы могут быть приняты следующие меры: уменьшена длина и ширина, увеличена толщина; увеличено число точек крепления (в том числе за счет приклеивания), исключено ухудшение крепления за счет контровки резьбовых соединений; использованы дополнительные упоры, накладки, выполняющие функции ребер жесткости (иногда эти функции выполняют теплоотводящие шины или шины питания, поставленные на ребро, заливка жесткими пенокомпундами); замена материала платы (например, стеклотекстолита металлом или керамикой).

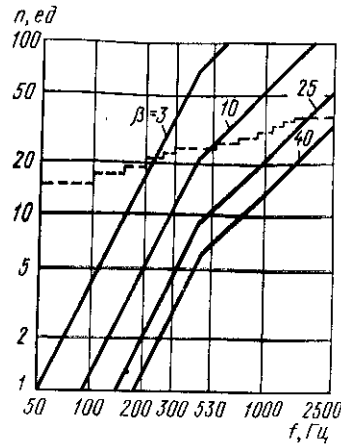


Рис. 5.24. Номограмма для определения коэффициента виброизоляции ячеек  $\beta = \eta_{\text{рез}}$  (штриховая линия — график перегрузок ячейки)

В тех случаях, когда плата с закрепленными на ней компонентами работает в *режиме резонанса* при условии, что амплитуда колебаний  $A_0$  не должна превышать 0,3 мм, а виброскорость  $V_0 = 0,8$  м/с, толщина платы при известном коэффициенте виброизоляции при резонансе  $\beta = \eta_{\text{рез}}$  (находится экспериментально) определяется по формуле

$$h = \frac{\omega_c a^2}{\pi^2 (1 + a^2/b^2)} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)\gamma}{Eg}}, \quad (5.2)$$

где ( $\omega_c$  — допустимая собственная частота;  $a$ ,  $b$  — размер большей и меньшей стороны платы соответственно, м;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $E$  — модуль упругости материала платы, Н/м<sup>2</sup>;  $g$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\gamma$  — плотность материала, Н/м<sup>3</sup>).

Величина  $\omega_c$  в формуле (5.2) выбирается наибольшей из двух значений:  $\omega_{c1} = \sqrt{\beta n g / A_0}$  для  $A_0 < 0,3$  мм и  $\omega_{c2} = \beta n g / V_0$  для  $V_0 < 0,8$  м/с, где  $n$  — перегрузка;  $g$  — ускорение силы тяжести. Уменьшения  $\beta$  можно добиться, вводя в плату слои из вибропоглощающего материала. Требуемое значение  $\beta$  для ячейки того или иного типа при заданных параметрах внешних вибраций удобно определить по номограмме рис. 5.24. Ломаные линии, образующие семейство графиков для различных коэффициентов виброизоляции платы (ячейки), получены расчетным путем по приведенным формулам для  $A_0 < 0,3$  мм и  $V_0 < 800$  мм/с, причем левые части ломаных линий соответствуют первому условию, а правые (более пологие) — второму. В точке из-



лома выполняются оба условия одновременно. Таким образом, область, ограниченная кривой графика сверху и осью абсцисс, является областью нормального обеспечения вибропрочности. Ступенчатая штриховая линия отображает заданные параметры внешних вибраций (перегрузки в определенных диапазонах частот). После определения собственной частоты платы необходимо из расчетной точки восстановить перпендикуляр к оси частот и сравнить перегрузки на этой частоте для внешних вибраций (ступенчатая кривая) и допустимую перегрузку плат (ломаная кривая с выбранным значением  $\beta$ ). Если первый уровень перегрузок выше второго, то на семействе ломаных кривых надо выбрать такую кривую, где это условие будет нарушено, т. е. выбрать плату с меньшим значением  $\beta$  что обеспечит требуемую вибропрочность.

Особое значение прочностные расчеты имеют для бортовых РЭС, где нежелательны излишние запасы прочности (вывод на орбиту 1 кг груза ракетой «Сатурн-5» составляет около 10000 долл., снижение массы полезного груза на 1 кг позволяет уменьшить количество топлива на 42 кг). Прочностные расчеты выполняются методами, основанными на теории сопротивления материалов. Обеспечить заданную прочность при минимальной массе можно с помощью следующих конструкторских мер:

- 1) выбором наиболее прочных материалов (см. табл. 5.5 и 5.6);
- 2) обеспечением равнопрочности элементов конструкции путем удаления малонагруженного материала (рис. 5.25);
- 3) обеспечением равнопрочности сечений элемента конструкции благодаря одинаковому сечению детали при работе на растяжение/сжатие (рис. 5.26.а) или равнопрочности сечения при изгибе (рис. 5.26.б, в);
- 4) выбором конструкций с максимальным моментом сопротивления (рис. 5.25–5.28);
- 5) заменой работы элементов конструкции на изгиб работой на растяжение/сжатие (рис. 5.29);
- 6) дополнительным креплением узлов и компонентов с помощью держателей, ниток, клея, мастики, заливкой пенопластом и т. д.

Значительные перегрузки могут испытывать объемные проводники микросборок, что требует расчета их параметров. Для монолитных проводников без изоляции допустимая длина (мм) между двумя точками жесткого закрепления при условии отсутствия резонанса может быть определена по формуле  $l = \sqrt[4]{EJ_z / m_{np}} \cdot 1,88 / \sqrt{f}$ , где  $E$  – модуль упругости проводника, Н/мм<sup>2</sup>;  $f$  – частота колебаний, Гц;  $m_{np} = \gamma_{np} \pi d^2 / (4g)$  – погонная масса проводника, Н·с<sup>2</sup>/мм<sup>2</sup>;  $\gamma_{np}$  – его плотность, Н/мм<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, мм/с<sup>2</sup>;

$J_z = \pi d^4 / 64$ —момент инерции сечения круглого проводника,  $\text{м}^4$ . С учетом запаса на контактирование длина проводника между контактами  $l_k = 0,8l$ . Расчет на усталостную прочность сводится к определению максимальных напряжений (Н/м) в проводниках  $\sigma_{\max} = 0,667mgnl^2d^{-3}$ . Проводник сохраняет прочность в условиях усталостной нагрузки, если  $\sigma_{\max} < \sigma_{\text{доп}}$ . Для медных проводников при симметричном цикле (равенстве амплитуд относительно начального состояния)  $\sigma_{\text{доп}} = 55$  МПа. Обычно допустимыми считаются размеры перемычек и выводов при длине  $l \leq 60 \dots 100d$  и консольности  $L \leq 10d$ , где  $d$ —диаметр проводника. Если консольность превышает допустимую, то необходимо дополнительное крепление в промежуточных точках с помощью клея или покрытие лаком. Для микросборок максимальная длина перемычек из объемного провода без дополнительного крепления составляет 3 мм. Приведенные соотношения справедливы для проводников без изоляции. Наличие изолирующей оболочки снижает собственную частоту проводника. Так, собственная частота отрезка проводника типа МГТФ-0,07 длиной 85 мм составляет 118 Гц, а при снятии оболочки—190 Гц.

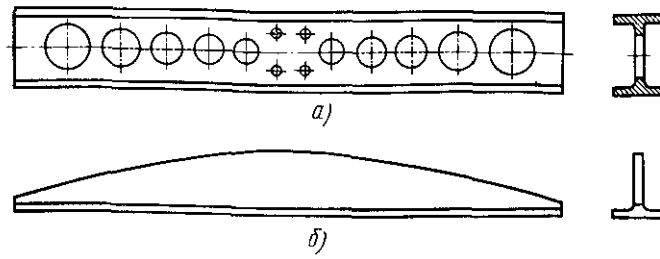


Рис. 5.25. Облегчение деталей в результате высверливания отверстий (а) и удаления малонагруженного материала (б)

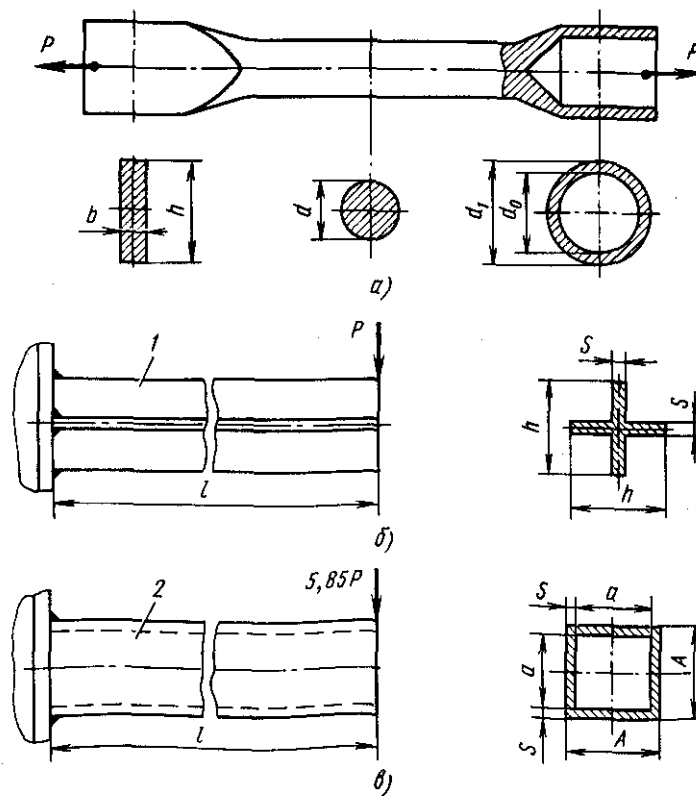


Рис. 5.26. Обеспечение равнопрочности деталей, работающих на растяжение (а) и на изгиб (б, в):  
1 — крестообразное сечение; 2 — трубчатое сечение

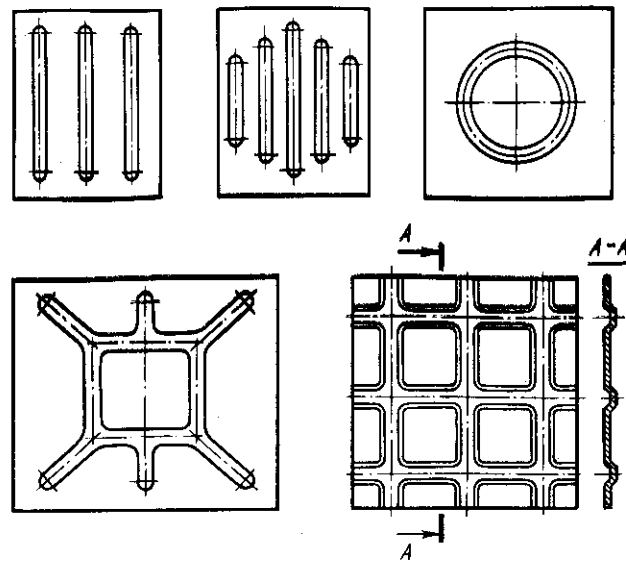
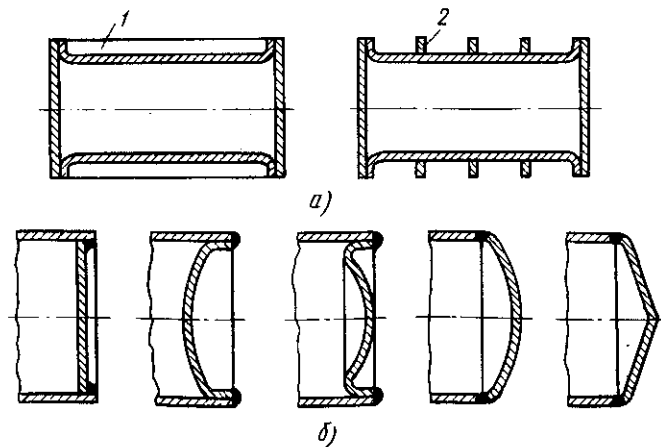


Рис. 5.27. Конфигурации выдавок

Рис. 5.28. Усиление стенок герметичных кожухов РЭС с помощью ребер (а) и виды днищ (б):  
1, 2 — ребра

**Технологичность конструкции при обеспечении прочности и жесткости.** При обосновании прочности и жесткости конструкции необходимо принимать меры для обеспечения ее технологичности путем выбора вида типовой конструкции, марок материалов, способов формообразования, снижения материалоемкости и трудоемкости изготовления, способов упрочнения поверхности для увеличения предела выносливости. Наиболее технологичными являются типовые (базовые) конструкции, в которых материалы выбраны с учетом их прочности, способов формообразования, снижения материалоемкости и трудоемкости. Типовые конструкции выполняются с использованием типовых технологических процессов, хорошо оснащенных и отработанных. Для нетиповой конструкции выбор материалов осуществляется с учетом типа производства (способов формооб-

разования), легкости их обработки с заданной точностью и шероховатостью, минимальной толщиной стенок.

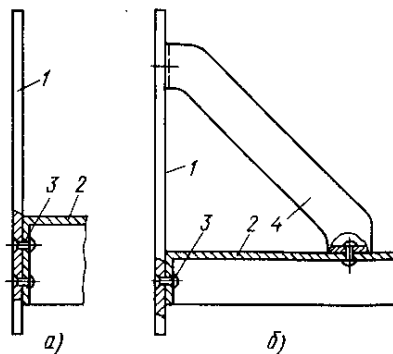


Рис. 5.29. Обеспечение прочности несущей конструкции заменой работы заклепки на изгиб (а) работой тяги на растяжение/сжатие (б):  
1 — панель; 2 — шасси; 3 — заклепка; 4 — тяга

Для индивидуального и мелкосерийного производства используются материалы, пригодные для обработки на универсальном металлорежущем оборудовании (станках с ЧПУ),—алюминиевый сплав Д16, титановый сплав ВТ4 и др. Для массового производства используются материалы, пригодные для обработки высокопроизводительным способом штамповки (сталь 08кп, титан ВТ4 и ВТ5, алюминиевые сплавы АМг, АМц); шероховатость обрабатываемых поверхностей  $Ra = 3,2 \dots 1,6$  мкм, точность по квалитетам 6—9. Для литья под давлением используются магниевые сплавы (МЛ3, МЛ5, МЛ6, МА1, МА3, МА5), латуни (ЛС59-1Л, ЛН80-3Л), алюминиевые сплавы (АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ11 АЛ28, АЛ32), толщина стенок которых может быть доведена до 0,5 мм.

Для повышения усталостной прочности деталей из металлов и сплавов иногда осуществляют поверхностное упрочнение путем поверхностной закалки токами высокой частоты, термохимической обработки (азотирования, цементации), обкатки поверхности шариком или дробеструйной обработкой для получения уплотняющего слоя. Повышению усталостной прочности способствуют увеличение плавности переходов между ступенчатыми поверхностями, наличие галтелей и фасок, повышение чистоты обработки поверхности. Перспективно для массового производства использование металлических порошков и их смесей с неорганическими материалами для формования элементов конструкции путем прессования с последующим спеканием в защитной атмосфере. Механические свойства изделий из порошков близки по свойствам к литым деталям, по отдельным параметрам они выше. Например, для

алюминия  $\sigma_b = 300...400$  МПа по сравнению с  $180...200$  МПа. Насыпная плотность алюминиевых порошков составляет  $0,7...0,8$  г/см<sup>3</sup> (ее постоянство определяет стабильность усадки при спекании). Однако детали, изготовленные из порошков, не могут иметь наружной и внутренней резьбы, должны иметь плавные переходы от тонких сечений к толстым и радиусы скругления не менее 1 мм.

Методом литья под давлением и прессованием изготавливают детали из пластмассовых пресс-порошков, часто имеющих наполнители (порошки, волокниты, стекловолокниты), с шероховатостью поверхности  $Ra = 1,25...0,8$  мкм, точностью размеров по 11...13-му квалитетам. Усадка может быть менее  $0,1...0,16\%$ . Для полиимидов и стеклопластиков допускается толщина до 0,3 мм при диаметре отверстий до 0,5 мм. К пластмассовым деталям предъявляется ряд ограничений: радиусы скруглений должны быть не менее  $0,5...1,0$  мм для внутренних и  $1...2$  мм для наружных поверхностей, не рекомендуются прямоугольная и мелкая резьба (с шагом менее 0,4 мм). Поверхность пластмассовых деталей можно металлизировать. Чаще всего наносится слой меди толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков микрометров с последующим электрохимическим нанесением защитного слоя из сплавов олова, никеля, реже — золота. Способы металлизации — химическое осаждение, вакуумное или горячее распыление металлов.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды механических динамических воздействий могут испытывать РЭС?
2. Что называют ударом? вибрацией? линейным ускорением?
3. Какова интенсивность виброперегрузок для РЭС, транспортируемой автомобилем?
4. Какие повреждения могут быть в РЭС под воздействием механических перегрузок?
5. Какие методы используют для защиты РЭС от механических перегрузок?
6. Какие силы воздействуют на виброизолированный объект?
7. Как зависит коэффициент виброизоляции  $\eta$  от коэффициента относительного демпфирования  $D$  и коэффициента расстройки  $\gamma$ ?
8. Какие виды амортизаторов Вам известны? Каковы их характеристики и области применения?

9.Какова последовательность проектирования системы виброизоляции РЭС?

10.Какие свойства конструкционных материалов наиболее важны при расчете и обеспечении прочности РЭС?

11.Какие конструкционные материалы наиболее применимы для деталей, работающих на растяжение/сжатие?

12. Назовите порядок расчета прочности и жесткости узлов РЭС.

13. Назовите методы обеспечения технологичности виброзащитных и ударозащитных конструкций РЭС.

#### 4.5. Электромагнитная совместимость и защита РЭС от помех

**Конструкторский анализ электрической схемы РЭС.** Прежде чем приступить к конструкторской разработке электромонтажа, необходимо провести анализ электрической схемы, принципа работы, специфики элементной базы, требований к источникам питания и тепловой совместимости. Оцениваются следующие характеристики элементной базы: быстродействие, помехоустойчивость, габариты, требования к установке и формовке выводов, методы крепления, необходимость теплоотвода и т. д. Оцениваются токи и напряжения в схеме путем поверочного расчета или по картам напряжений, составленных схемотехниками. Анализируется чувствительность элементов к тем или иным помехам: тепловым шумам во входных цепях, помехам по цепям питания и заземления, перекрестным помехам. Выявляются элементы и связи, способные создавать помехи, а также элементы, наиболее чувствительные к помехам. Особое внимание следует обращать на однородность элементов по быстродействию (выявляются элементы с необоснованно завышенным быстродействием) и по температурному диапазону работы (уточняются элементы с заниженным температурным диапазоном). Определяются тепловыделяющие элементы и намечаются меры их теплоизоляции, а также определяется тип производства элементов (серийное, массовое), их стоимость и дефицитность. В результате анализа вырабатываются требования к компоновке отдельных узлов и РЭС в целом, намечаются те или иные конструктивные решения по реализации электрических связей (межконтактная коммутация и контактирование). В том случае, если принятые меры не обеспечивают электромагнитной совместимости или других характеристик РЭС (габаритов, массы, стоимости, надежности и т. д.), разрабатываются другие варианты конструкции.

При разработке конструкции электрических соединений аналогового узла особое внимание уделяется технологичности конструкции: использованию несущей конструкции из латуни или другого металла с покрытием (лужение и др.) для облегчения контактирования с земляной шиной в ближайшей к элементу точке; использованию конструкций электрических соединений, поддающихся автоматизации и механизации (печатные платы и шлейфы, контакты для группового контактирования, стежковый монтаж, контактирование накруткой, наличие контактных площадок для автоматизированных контрольных устройств); обеспечению надежных соединений экранов с земляной шиной (в том числе ВЧ - соединителей с оплеткой коаксиальных кабелей); удобству подготовки компонентов к сборке и монтажу (зачистка изоляции, формовка выводов, лужение контактных площадок и т.д.). При изготовлении экранов следует использовать высокопроизводительные методы формообразования и сборки (штамповка, прессо-



вание, термическое напыление и т.д.), минимальное количество драгоценных металлов, дефицитных и токсичных материалов.

**Анализ схемы электрической принципиальной.** Его целесообразно проводить на уровне функциональной схемы. При этом удается выделить функциональные узлы и устройства, которым в последующем можно придать конструктивную обособленность. При анализе ЭЗ целесообразно установить рабочие частоты, определить элементы и узлы, чувствительные к паразитным наводкам, которые, в свою очередь, могут являться источниками помех, а также сделать выводы о целесообразности экранирования. Необходимо уяснить, какие органы управления и индикации должны быть вынесены на лицевую панель, какие из элементов и приборов являются наиболее тяжелыми и требуют специального крепления, какие элементы являются теплонагруженными. Следует также определить, какими элементами внешней электрической связи изделие соединено с другими устройствами, установить наличие высоковольтных цепей с тем, чтобы, с одной стороны, обеспечить электрическую прочность, а с другой — безопасность работы оператора. На основании выполненного анализа необходимо уяснить принцип работы конструируемого изделия.

**Анализ элементной базы.** Цель анализа элементной базы состоит в том, чтобы установить, соответствует ли элементная база заданным характеристикам конструируемого изделия при предусмотренных ТЗ условиях эксплуатации и, в случае несоответствия, предложить конструктивные методы обеспечения нормального функционирования изделия. При таком анализе производится также оценка схемной надежности. Сопоставление данных, полученных на основе анализа условий эксплуатации, с характеристиками ЭРЭ позволяет конструктору сделать обоснованные выводы.

**Электромагнитная совместимость цифровых узлов.** Под внутренней электромагнитной совместимостью (ЭМС) понимается свойство РЭС и его частей (ячеек, блоков, шкафов, пультов) функционировать без ухудшения качественных показателей при заданной внутри РЭС или его частей электромагнитной обстановке. Обеспечение внутренней электромагнитной совместимости становится все более актуальной задачей ввиду непрерывного уменьшения энергии сигналов цифровых устройств РЭС и роста взаимного влияния элементов, из-за увеличения плотности компоновки и сложности устройств. На цифровые узлы могут влиять и внешние помехи, проникающие, например, по цепям питания. Для защиты от этих помех принимают те же меры, что и для защиты от внутренних помех. Для обеспечения внутренней ЭМС цифрового узла необходимо, чтобы фактическая помеха была меньше допустимой. Зависимости амплитуды помех  $U_{ном}$ ,  $I_{ном}$  от их длительности  $\tau_{ном}$  для логических элементов ТТЛ серий К130 и К155 представлены на рис. 4.5.1,

4.5.2. Из графиков следует, что при уменьшении длительности помех их допустимая амплитуда увеличивается. В технических условиях на цифровые ИС обычно приводится статическая помехоустойчивость, соответствующая горизонтальной части кривых. Для различных логических элементов статическая помехоустойчивость различна: 0,4 В для ТТЛ серии К155; 0,125...0,15 В (относительно уровней — 0,9 и — 1,7 В) для ЭСЛ серии 500; 1 В для элементов КМДП серии К176.

Для удобства рассмотрения методов обеспечения внутренней ЭМС цифровых узлов РЭС все электрические соединения можно условно разделить на электрически длинные и электрически короткие. Электрически длинной называется линия связи, геометрическая длина которой соизмерима с длиной волны наиболее высокочастотной составляющей спектра дискретного сигнала.

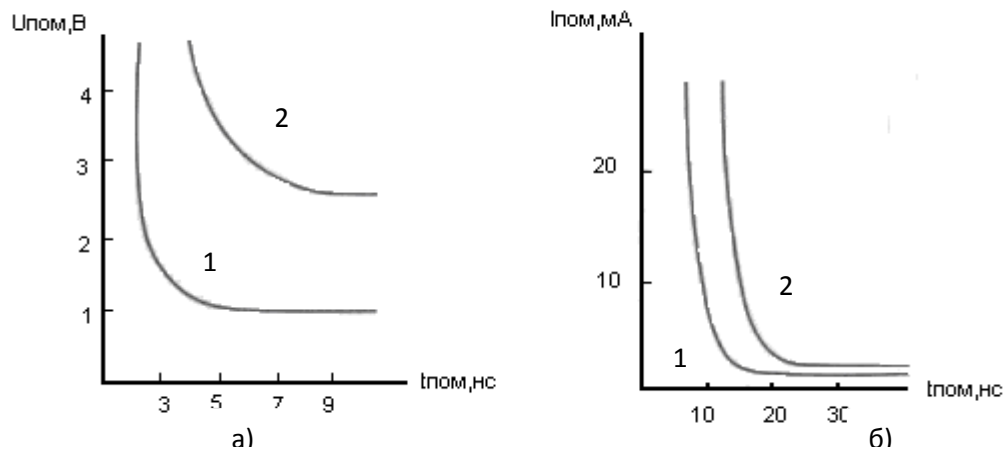


Рис. 4.5.1. Зависимость амплитуды помех по напряжению (а) и по току (б) от их длительности для логических элементов ТТЛ: 1 – для отпирающих; 2 – для запирающих сигналов

Часто электрическую длину линии определяют из соотношения задержки сигнала в линии  $\tau_n$  и длительности фронта импульса  $\tau_\phi$ . Если  $t_n > 0,1\tau_\phi$ , то линия считается электрически длинной, если  $t_n < 0,1\tau_\phi$  – электрически короткой. Время распространения сигналов на единицу длины для большинства электрических соединений РЭС составляет  $\tau_n = 4...7 \text{ нс/м}$ . Поэтому при  $\tau_\phi = 1 \text{ нс}$  линия является электрически длинной уже при геометрической длине более 14...25 мм.

Характеристическим параметром электрически длинной линии является волновое сопротивление (Ом)  $Z_n = \sqrt{L_n/C_n}$ , где  $L_n$  — индуктивность линии, Гн;  $C_n$  — емкость линии, Ф. При распространении сигнала в электрически длинной линии, имеющей неоднородность волнового сопротивления отдельных участков, от этой неоднородности происходит отражение падающего сигнала (приложенного к началу линии) напряжения  $U_{nad}$  или тока  $I_{nad}$ . Отраженный сигнал складывается с падающим и искажает его.

В качестве неоднородности линии связи могут выступать, например, внутреннее сопротивление генератора сигналов, подключенного к началу линии, или сопротивление нагрузки в конце линии, не равные волновому сопротивлению линии связи. Причиной неоднородности может быть также наличие в линии связи участков различного конструктивно-технологического исполнения (одиночный объемный проводник, печатный проводник, коаксиальный кабель, экранированный проводник, контакт соединителя и т. д.), технологический разброс волнового сопротивления линии связи (например, из-за разброса толщины или диэлектрической проницаемости изоляции коаксиального кабеля) или разветвление линий.

Отраженная энергия характеризуется коэффициентом отражения по напряжению ( $K_U$ ) или по току ( $K_I$ ):

$$K_U = \frac{Z_n - Z_d}{Z_n + Z_d}; \quad K_I = \frac{Z_d - Z_n}{Z_n + Z_d}; \quad K_U = -K_I$$

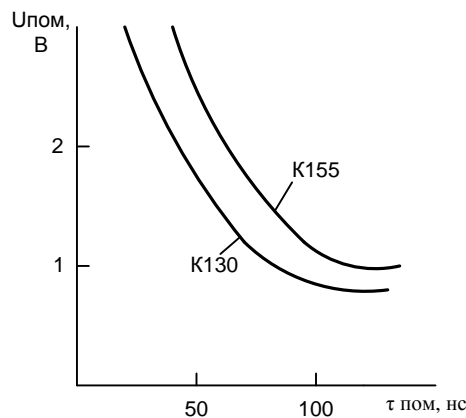


Рис. 4.5.2. Зависимость амплитуды допустимой помехи от длительности для *RS*-триггера на логических элементах серии К130 и К155

Амплитуда отраженного импульса может быть определена из соотношений  $U_{\text{отр}} = K_U U_{\text{над}}$ ,  $I_{\text{отр}} = K_I I_{\text{над}}$ .

Влияние неоднородности линий на характер искажения импульса напряжения иллюстрируется рис. 4.5.3. К началу согласованной с генератором сигналов электрически длинной линии подан скачок напряжения (рис. 4.5.3, *а*). Если линия на конце нагружена на сопротивление  $Z_n = Z_d$  (линия согласована на конце), то перепад напряжения, достигнув через время  $t_d$  конца линии, не изменит своей формы (рис. 4.5.3, *б*), так как коэффициент отражения по напряжению  $K = 0$  и  $U_{\text{отр}} = 0$ . Если линия не согласована с одного или с обоих концов, то искажения сигнала носят апериодический (рис. 4.5.3, *в*) или колебательный (рис. 4.5.3, *г*) характер.

Апериодический переходный процесс имеет место при условии  $K_1 K_2 > 0$  ( $K_1 = K_2 < 0$  или  $K_1 = K_2 > 0$ ), а колебательный — при условии  $K_1 K_2 < 0$ , где  $K_1$  и  $K_2$  — коэффициенты отражения по напряжению от начала и конца линии.

Длительность «ступенек» сигналов составляет  $2t_d$ . Если переходный процесс носит аperiодический характер, то быстродействие цифровых узлов уменьшается, так как увеличивается время нарастания амплитуды сигнала до номинального значения и должна быть уменьшена тактовая частота следования импульсов. Если переходный процесс колебательный, то это может вызвать ложное срабатывание логических элементов при значительной амплитуде колебаний сигнала около порогового значения. Кроме того, выбросы напряжения могут привести к пробоем  $p$ - $n$ -переходов полупроводниковых приборов или к насыщению транзисторов логических элементов ЭСЛ (это также снизит быстродействие).

Максимальная геометрическая длина несогласованной электрически длинной линии различна при различных длительностях фронта сигнала:  $l_{\max} = 1500 \text{ мм}$  при  $\tau_{\phi} = 30 \text{ нс}$ ;  $l_{\max} = 250 \text{ мм}$  при  $\tau_{\phi} = 5 \text{ нс}$ ;  $l_{\max} = 15...50 \text{ мм}$  при  $\tau_{\phi} = 1 \text{ нс}$ . Отражение импульсов в электрически коротких линиях не опасно из-за их малой (по сравнению с длительностью фронта) длительности. Это определяется ограниченной полосой пропускания линий связи, а также повышенной помехоустойчивостью схем при малых длительностях помех (рис. 4.5.1, 4.5.2).

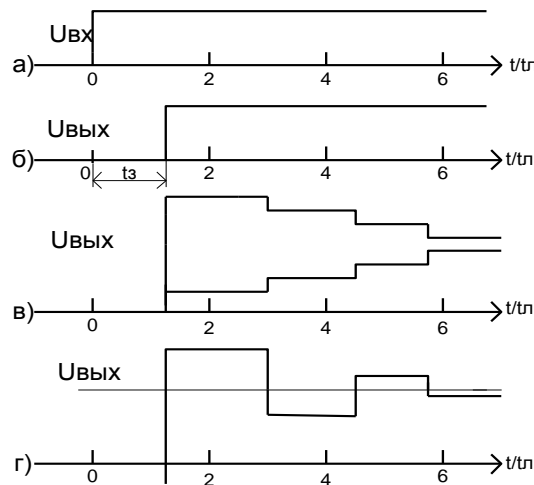


Рис. 4.5.3. Искажение импульсного сигнала (а) при передаче его по длинной линии в случае ее полного согласования (б) и рассогласования на обоих концах (в, г).

Помехи в электрически коротких линиях связи возникают из-за «паразитных» связей между различными электрическими соединениями и различными компонентами в пределах одного соединения (например, шины питания) и могут привести к сбою в работе цифровых схем. Несмотря на то, что в цифровых узлах используют схемы с небольшим коэффициентом усиления по напряжению (в  $10^4...10^5$  раз меньшим, чем, например, в аналоговых блоках РЛС), наличие большого числа параллельных связей, а также высокая плотность компоновки требуют принятия специальных мер для обеспечения ЭМС

с учетом помех в электрически коротких линиях. Паразитные связи определяются конструкцией РЭС и параметрами используемых материалов (особенно диэлектрической проницаемостью). Все виды внутренних паразитных связей делят на емкостные, индуктивные и кондуктивные. Если сигнал (составляющая спектра), наводящий помеху, имеет гармонический характер, то независимо от характера паразитной связи (рис. 4.5.4) амплитуда помехи может быть определена по формуле

$$U_{ном} = U_{и ном} Z_n / (Z_n + Z_{нар}) \quad (4.5.1)$$

где  $U_{ном}$  – напряжение помехи на сопротивлении нагрузки  $Z_n$ ;  $U_{и ном}$  – напряжение источника помех, приложенное к линии, наводящей помеху;  $Z_{нар}$  – сопротивление паразитной связи;  $K_{нар} = Z_n / (Z_n + Z_{нар})$  – коэффициент связи по напряжению.

Из рассмотрения рис. 4.5.4, а и формулы (4.5.1) следует, что в общем случае сопротивление паразитной связи и сопротивление нагрузки образуют делитель напряжения. В том случае, когда паразитная связь носит емкостный характер (рис. 4.5.4, б),  $Z_{нар} = 1/(\omega C_{нар})$ , где  $C_{нар}$  – паразитная емкость (емкость паразитной связи). Тогда где  $K_C = C_{нар} / (C_n + C_{нар})$  – коэффициент емкостной связи;  $C_n = C_l + C_{вых} + C_{вх}$  – емкость нагрузки, равная сумме емкостей собственно линии связи, выходной емкости передающей и входной емкости приемной схемы соответственно.

В том случае, когда паразитная связь носит индуктивный характер (рис. 4.5.4, в), напряжение помехи  $U_{ном} = M dI_1 / dt$ , где  $M$  – взаимная индуктивность, Гн;  $I_1$  – ток в первом контуре, А;  $t$  – время, с. Можно показать, что  $U_{ном} = U_1 M / L_1 = U_1 K_L$ , где  $K_L = M / L_1$  – коэффициент индуктивной связи;  $L_1$  – индуктивность первого контура. Можно определить  $K_L$ , не вычисляя  $M$  и  $L_1$ , а используя то обстоятельство, что при  $\varepsilon = 1$ ,  $\mu = 1$  (вакуум) коэффициент емкостной связи в вакууме  $K_{C0}$  равен коэффициенту индуктивной связи  $K_L$ .

$$U_{ном} = U_{и ном} \frac{C_{нар}}{(C_n + C_{нар})} = U_{и ном} K_C$$

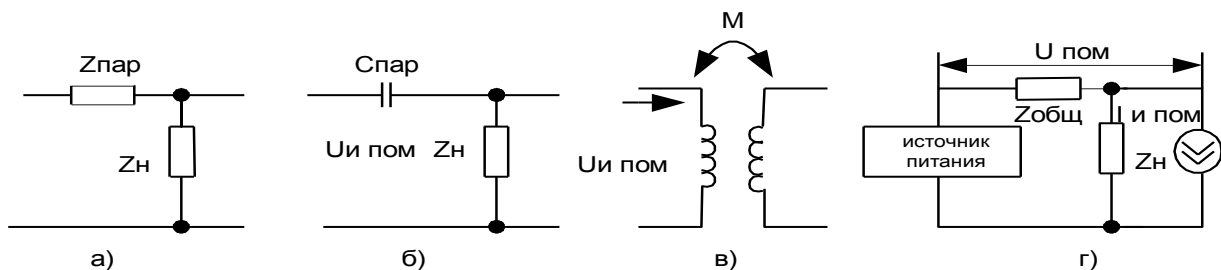


Рис. 4.5.4. Схемы паразитной связи: *a* — обобщенной; *b* — емкостной; *в* — индуктивной; *г* — кондуктивной.

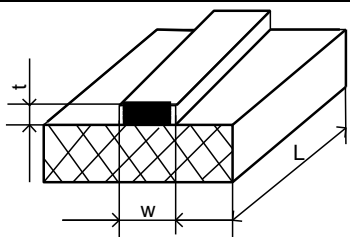
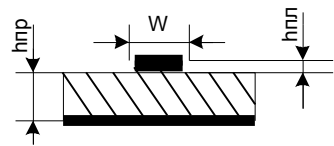
При кондуктивной связи помехи выделяются на сопротивлении связи  $Z_{обц}$ , которое складывается из внутреннего сопротивления шин питания  $Z_{шп}$  и внутреннего сопротивления источника питания  $Z_{ин}$ . Так как  $Z_{обц} \leq Z_{ин}$ , то коэффициент кондуктивной связи

$$K_Z = Z_{обц} / (Z_{обц} + Z_{ин}) \approx Z_{обц} / Z_{ин}.$$

Природа  $Z_{обц}$ , зависит от частотного спектра сигнала, наводящего помеху. Для постоянного тока и очень низких частот это в основном сопротивление дросселей фильтра, диодов выпрямителя, внутреннего сопротивления химических источников питания; для звуковых частот — активное сопротивление шин питания, емкостное сопротивление конденсаторов фильтра; на высоких частотах — индуктивное сопротивление шин питания и конденсаторов фильтра.

Чтобы оценить ожидаемое искажение сигналов и наводки (помехи), необходимо рассчитать электрические параметры линий связи ( $L_l, C_l, C_{нар}, Z_l, M, Z_{обц}$ ) по известным конструктивным данным (геометрическим размерам, физическим параметрам материалов, конструктивному исполнению; числу и взаимному расположению взаимодействующих линий связи) по формулам, приведенным в табл. 4.5.1, а также по графикам рис. 4.5.5 — 4.5.6. Точность формул составляет: 5... 10% для одиночного объемного проводника, одиночного проводника над экраном, экранированного проводника, коаксиального кабеля; 15...20% для пары объемных проводников над экраном; 20...30% для печатных проводников.

Таблица 4.5.1

Тип электромонтажа	Эскиз конструкции	Расчетные соотношения
Печатный проводник		$L = 0.2l(2.31g \frac{4l}{d_0} - 0.75),$ $d_0 = 0.67h_{np} + 0.567w$
Печатный проводник над экраном		$L = 0.46l \lg \frac{4h_{пл}}{d_0},$ $C = \frac{24\epsilon_{эф}l}{\lg \frac{4h_{пл}}{d_0}},$ $d_0 = 0.67h_{np} + 0.567w$

Примечание. Размерность индуктивности  $L$  — мкГн; емкости  $C$  — пФ; волнового сопротивления  $Z$  — Ом; линейных размеров ( $l, d, D, h, A, d_0, h_{nl}, h_{np}, w$ ) — м.

На рис. 4.5.5 представлена зависимость волнового сопротивления печатного проводника, расположенного в вакууме ( $\varepsilon=1$ ), от соотношения его ширины  $w$  к расстоянию  $h_{nl}$  до экранирующей плоскости. Эти графики справедливы, если толщина проводника  $h_{np}$  мала по сравнению с шириной  $w$ . Для печатного проводника, расположенного в среде с  $\varepsilon > 1$ , волновое сопротивление линии  $Z_{л} = Z_0 / \sqrt{\varepsilon_{эф}}$ . Графики, представленные на рис. 4.5.6, позволяют определить волновое сопротивление линии связи в зависимости от геометрических размеров  $w$ ,  $h_{nl}$  и диэлектрической проницаемости материала платы при условии, что  $h_{np} \leq w, \varepsilon \geq 1$ . Волновое сопротивление линии на плате без экрана составляет  $2Z$ .

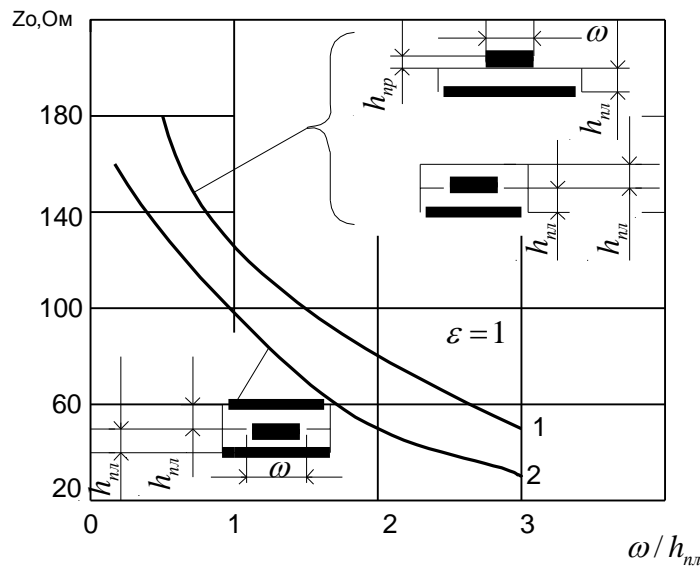


Рис. 4.5.5. Графики для расчета волнового сопротивления внешнего и внутреннего проводников печатной платы с экранирующей плоскостью (кривая 1) и волнового сопротивления внутреннего проводника, расположенного между двумя экранирующими плоскостями в вакууме (кривая 2)

Емкость между двумя проводниками, расположенными с одной или с двух сторон печатной платы, можно определить, используя графические зависимости рис. 4.5.7 и 4.5.8, по формуле  $C = C_0 / \varepsilon_{эф}$ , где  $C_0$  — удельная емкость линии, пФ/см, расположенной в среде с  $\varepsilon=1$  (вакуум, сухой воздух);  $l$  — длина линии, см. При расчете допустимых параметров электрически коротких линий обычно исходят из эквивалентной схемы (рис. 4.5.9, б). Допустим, что собственной индуктивностью линии можно пренебречь; входное и выходное сопротивления и фронты линейны. Тогда для интервала времени  $0 < t < \tau_{ф}$

напряжение помехи, отсчитываемое от статического уровня напряжения в линии

$$U_{ном}(t) = \pm \frac{R_{ex} \parallel R_{вых}}{\tau_{\phi}} \left( C_{нар} \Delta U \pm M \frac{\Delta I}{R_{вых}} \right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (4.5.2.)$$

где  $\Delta I$  – перепад тока в линии, наводящий помеху;  $\tau = CR_{вых}R_{ex} : (R_{вых} + R_{ex})$  – постоянная времени;  $C = C_{нар} + C_{вых} + C_{ex} + C_{л}$  – суммарная емкость. Из соотношения (4.5.2) следует, что емкостная помеха преобладает, если  $R_{вых}C_{нар}\Delta U \geq M\Delta I$ . Таким образом, емкостная помеха существенна при больших перепадах напряжения, больших выходных сопротивлениях и сильной емкостной связи. Индуктивная помеха существенна при больших перепадах токов в линиях (малых  $R_{вых}$ ) и сильной индуктивной связи.

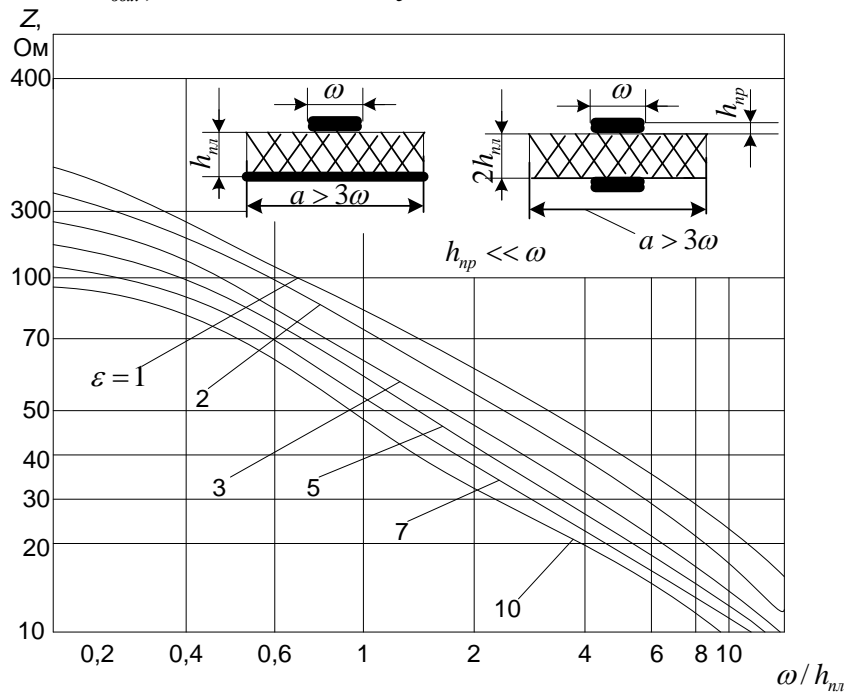


Рис. 4.5.6. Волновое сопротивление печатных полосковых линий



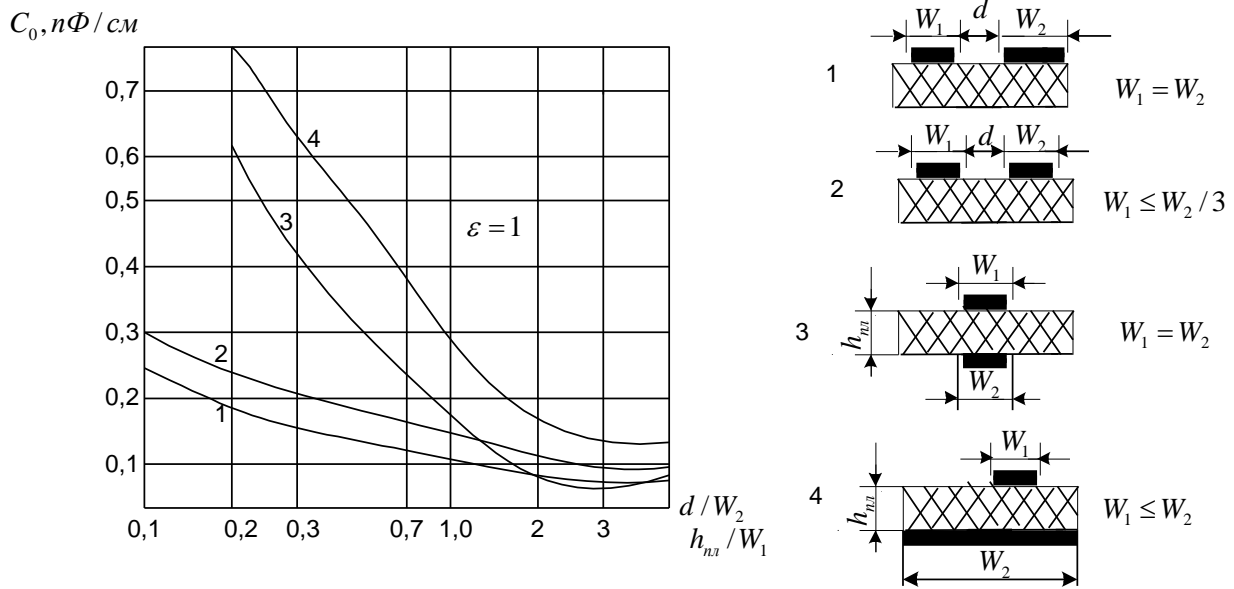


Рис. 4.5.7. Взаимная емкость печатных проводников в вакууме

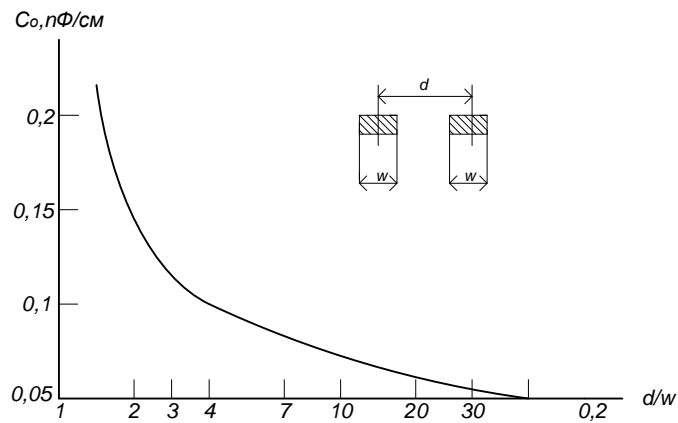


Рис. 4.5.8. Зависимость емкости между плоскими проводниками, расположенными в вакууме, от отношения расстояния между проводниками  $d$  к ширине проводников  $w$

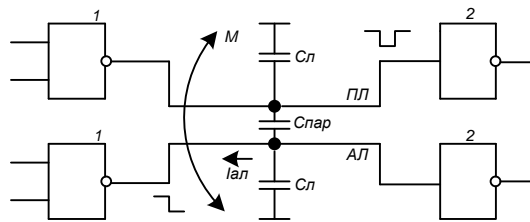


Рис. 4.5.9. Параллельные электрически короткие линии связи: АЛ — активная (наводящая помеху) линия; ПЛ — пассивная линия; 1 — передающие; 2 — приемные схемы;  $C_{л}$  — емкость линии относительно земляной шины

Логические элементы ТТЛ различаются быстродействием (потребляемой мощностью) и выходным сопротивлением. Маломощные элементы ( $P < 1$  мВт) с большим выходным сопротивлением  $R_{\text{вых}}$  наиболее критичны к емкостным запирающим помехам. Элементы высокого быстродействия ( $P > 10$  мВт) с малым выходным сопротивлением наиболее чувствительны к индуктивным отпирающим помехам. Для элементов ТТЛ среднего быстродействия ( $1 < P < 10$  мВт) необходимо учитывать емкостные запирающие и индуктивные отпирающие помехи. Элементы со структурой МДП характеризуются очень малыми входными токами и большими (кОм) выходными сопротивлениями. Поэтому для них наиболее опасными являются емкостные отпирающие и запирающие помехи. Элементы ЭСЛ, имеющие очень малое выходное сопротивление (около 10 Ом), нечувствительны к емкостным и индуктивным помехам в электрически коротких линиях.

При расчете линий связи микросборок на полиамидном, керамическом или алюминиевом (с анодированием) основании необходимо учитывать не только паразитные связи, но и постоянные времени линий связи. Это особенно важно для линий связи микромоощных элементов со структурой КМДП. Постоянная времени линии связи зависит от емкости схемных элементов, емкости линий связи относительно шины с нулевым потенциалом («земляной»), паразитных емкостей относительно других линий связи, активного сопротивления линий связи. В ряде случаев минимум постоянной времени линий связи является критерием оптимального размещения интегральной схемы (ИС) в составе микросборки.

**Электромагнитная совместимость усилительных схем.** Наиболее универсальным (широко применяемым) и наиболее чувствительным к помехам аналоговым узлом является усилитель. При отсутствии полезного сигнала на входе усилителя на его выходе имеется некоторое (обычно небольшое) напряжение, обусловленное внутренними помехами (вызванными тепловыми шумами резисторов и активных элементов), а также внешними помехами (наводками) на входе с выхода усилителя или от других устройств. Наибольшее влияние оказывают внешние помехи, которые могут поступать на усилитель различными путями через емкостные, индуктивные и кондуктивные паразитные связи.

На рис. 4.5.10. показана схема трехкаскадного усилителя, на вход которого поступает емкостная помеха (рис. 4.5.10, а) с выхода последнего каскада. Для оценки допустимой величины паразитной емкости предположим, что обратные связи имеются только между входом и выходом однокаскадного усилителя (рис. 4.5.11), коэффициент усиления которого без обратной связи равен  $\dot{K}$ , а коэффициент, показывающий, какая доля выходного сигнала передается на вход через обратную связь, равен  $\dot{\beta}$ . Коэффициент усиления усилителя с обратной связью  $\dot{K}_{oc} = \dot{K} / (1 - \dot{\beta}\dot{K})$ . Если  $|1 - \dot{\beta}\dot{K}| < 1$ , то обратная связь

положительная, если  $|1 - \beta \dot{K}| > 1$ , то отрицательная. Произведение  $\beta \dot{K}$  зависит от частоты, и на одних частотах наблюдается положительная обратная связь, а на других – отрицательная. Петлями обратной связи может быть охвачен один или несколько каскадов.

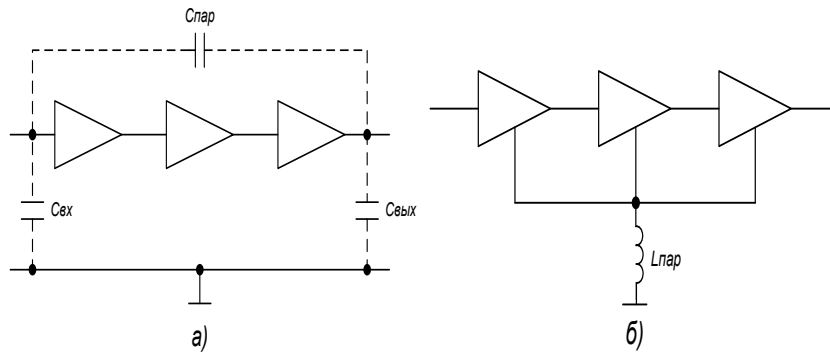


Рис. 4.5.10. Образование паразитной связи в многокаскадном усилителе: *а* – емкостная связь между входом и выходом; *б* – индуктивная связь по земляной шине

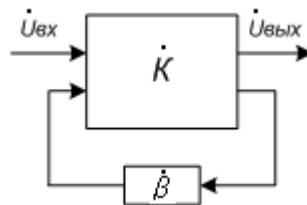


Рис. 4.5.11. Схема усилителя с обратной связью

При коэффициенте положительной обратной связи любой из петель, равном или превышающем единицу, усилитель может самовозбудиться. При емкостном сопротивлении обратной связи  $X_C$ , много большим сопротивления входной цепи усилителя  $Z_{вх}$ , в которую попадает напряжение помехи, условие самовозбуждения имеет вид:

$$K_y = Z_{вх} / (Z_{вх} + X_C) \approx K Z_{вх} / X_C = |K Z_{вх} \omega C_{пар}| \geq 1,$$

где  $K_y$  – коэффициент усиления по напряжению части усилителя, охваченной обратной связью через емкость  $C_{пар}$ .

Из этого условия следует, что достаточная для самовозбуждения усилителя емкость  $C_{пар} = 1 / (\omega Z_{вх} K_y)$ . При  $K_y = 10^4$ ;  $Z_{вх} = 10^3$  Ом;  $\omega = 10^7$  ( $f = 1,5$  МГц) и благоприятном для возбуждения фазовом сдвиге помехи  $C_{пар} = 0,01$  пФ. Чтобы характеристики устройства при наличии обратной связи заметно не изменились, величина  $C_{пар}$  между входом и выходом усилителя должна быть на порядок меньше, т.е. должна быть равна 0,001 пФ. Уменьшения емкостной паразитной связи можно добиться, разнося источники и приемники помех или

используя во входной цепи диэлектрики с небольшой относительной диэлектрической проницаемостью, например фольгированный фторопласт (ФФ-4, ФАФ-4), полиимид. Это одновременно позволяет уменьшить потери во входных цепях усилителя и паразитную связь с другими устройствами.

Примером кондуктивной помехи является помеха  $E_{ном}$ , поступающая на вход усилителя с шины питания через делитель  $R_1R_2$  (рис. 4.5.12). В конструкциях аналоговых РЭС и их узлов имеют место паразитные общие сопротивления  $Z_{общ}$ , входящие одновременно в цепь источников и приемников наводки. В качестве таких сопротивлений могут выступать активное и индуктивное сопротивления шин питания и шин с нулевым потенциалом, внутреннее сопротивление источника питания, а также отдельные участки шин, общие для нескольких цепей (переходные лепестки, участки проводов в цепи заземления, (рис. 4.5.13). Паразитная связь через внутреннее сопротивление источника питания и питающие шины является наиболее распространенной, так как обычно используется источник питания, общий для элементов и узлов, различающихся мощностью и помехоустойчивостью. Минимальные сигналы на входе усилителя могут достигать долей микровольта. Использование источника питания, имеющего на порядок более низкий уровень помех, сложно и дорого.

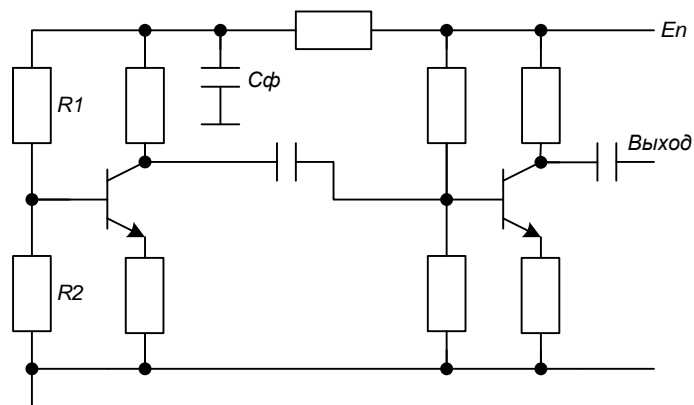


Рис. 4.5.12. Схема воздействия помех на вход усилителя от шины питания

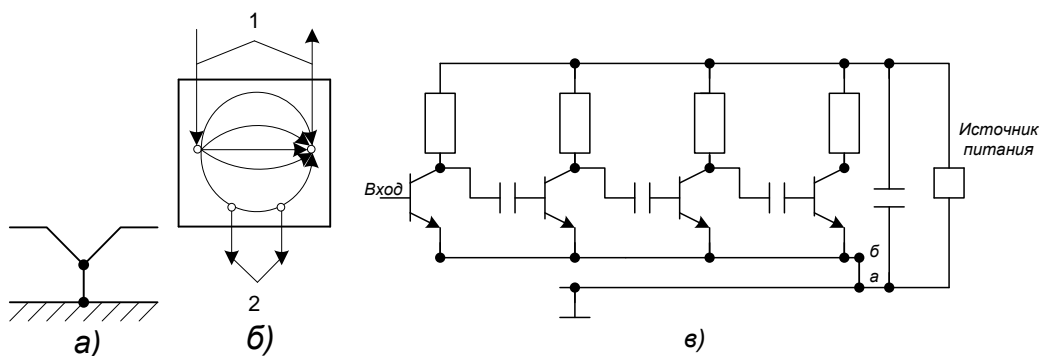


Рис. 4.5.13. Паразитные связи в общей шине через общий лепесток (а), через общий для цепей 1 и 2 участок корпуса (б), через общий участок а—б в цепи заземления многокаскадной схемы (в).

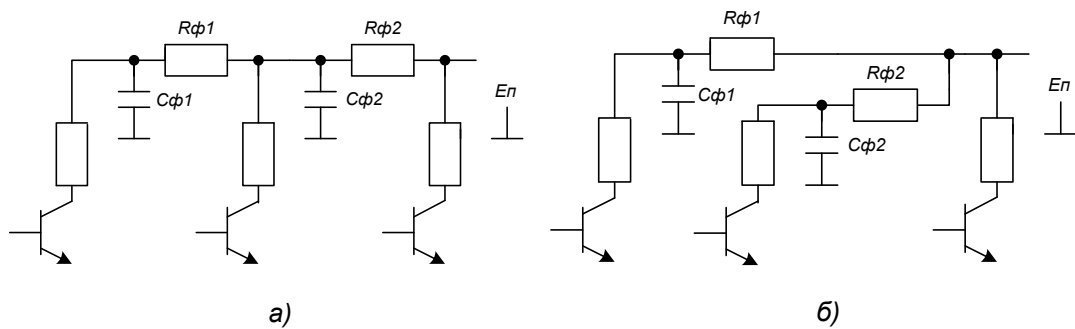


Рис. 4.5.14. Последовательное (а) и параллельное (б) включения фильтров в цепи питания.

Поэтому он рассчитывается исходя из пульсаций, допустимых для мощного каскада, а дополнительное сглаживание пульсаций, возникающих из-за падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника питания и шинах питания, осуществляют с помощью фильтров, подключенных к мало-мощным каскадам.

При использовании  $RC$ -фильтров (рис. 4.5.14) резистор выбирают из условия  $R_\phi = U_\phi / I_\phi = (0,05 \dots 0,5) E_n / I_0$ , где  $E_n$  – ЭДС источника питания;  $I_0$  – постоянная составляющая тока. Коэффициент развязки фильтра  $K_{\phi p} = U_{ном} / U_{дон}$ , где  $U_{дон}$  – допустимая амплитуда помехи на выходе фильтра;  $U_{ном}$  – амплитуда помехи на входе фильтра. В этом случае емкость фильтра можно определить по формуле  $C_\phi = \sqrt{K_{\phi p} - 1 / (\omega R_\phi)}$ . На практике коэффициент развязки всегда меньше вычисленного, поскольку при расчете не учитываются паразитные параметры электро монтажа фильтров.

В качестве примера рассмотрим фильтр, включенный на выходе генератора помех с внутренним сопротивлением  $R_z = 100$  Ом (рис. 4.5.15, а) и параметрами  $C_1 = C_2 = C_3 = 0,05$  мкФ;  $L_1 = L_2 = 100$  мкГн. Частота сигнала помех на входе фильтра равна 6 МГц. Теоретический коэффициент развязки фильтра

$$K_{\phi p \Sigma} = \frac{R_r}{\frac{1}{(\omega C_1)}} \frac{\omega L_1}{\frac{1}{(\omega C_2)}} \frac{\omega L_2}{\frac{1}{(\omega C_3)}} = R_r \omega^5 C^3 L^2 = 100 (2\pi \cdot 6 \cdot 10^6)^5 (5 \cdot 10^{-8})^3 (10^{-4})^2 = 10^{10}$$

Допустим, при монтаже фильтра емкости  $C_1 - C_3$  подсоединены к шине с нулевым потенциалом через отрезок  $ab$  длиной 30 мм, индуктивное сопротивление которого на частоте 6 МГц составит примерно 1 Ом. Тогда напряжение помехи, ослабленное в 100 раз, поступит через конденсатор  $C_3$  прямо на выход фильтра. Таким образом, фактическое значение  $K_{\phi p \Sigma}$  меньше теоретического в  $10^8$  раз.

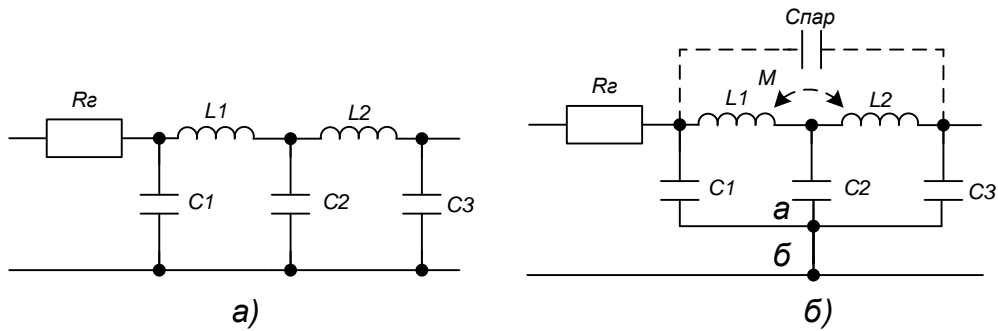


Рис. 4.5.15. Схема многозвенного фильтра (а) и его неверного монтажа (б): аб — общий участок в цепи заземления.

Для уменьшения влияния активного и индуктивного сопротивлений конденсаторов фильтрующие элементы, как правило, выполняют из параллельно включенных электролитического и «безындукционного» керамического конденсаторов. Для уменьшения индуктивности соединительных проводников фильтрующие конденсаторы располагают как можно ближе к защищаемому каскаду, а заземление осуществляется в ближайшей точке.

Связь через корпус, который часто выполняет функцию шины с нулевым потенциалом, проявляется тем сильнее, чем выше рабочая частота. С повышением частоты возрастают токи в корпусе, протекающие через емкости монтажа и деталей, увеличиваются активное и реактивное сопротивления.

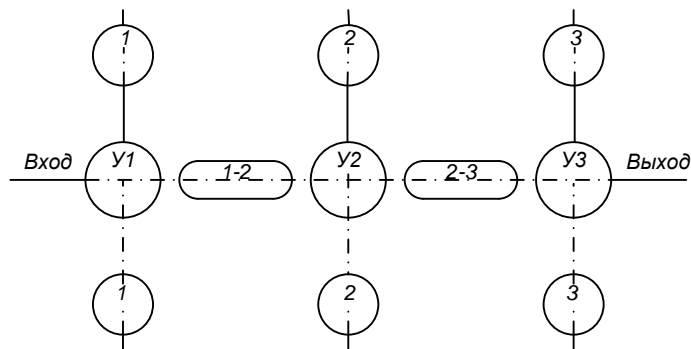


Рис. 4.5.16. Схема размещения элементов в широкополосном усилителе:  $Y_1 - Y_3$  — усилительные приборы каскадов; 1–3 — элементы соответствующих каскадов; 1–2, 2–3 — элементы межкаскадной связи

На частотах от килогерц до единиц мегагерц разности потенциалов между различными точками корпуса настолько малы, что его поверхность можно считать эквипотенциальной и, следовательно, не создающей паразитной связи.

В широкополосных усилителях высокой и промежуточной частоты, работающих на частотах в десятки мегагерц, протекающие в поверхностном слое корпуса токи могут быть причиной значительного ухудшения устойчивости усилителя.

Для устранения обратных связей по корпусу усилителя необходимо все элементы, провода и точки присоединения к нему, относящиеся к выходу и входу двух соседних активных приборов, размещать только в промежутке между ними, по возможности ближе к продольной осевой линии (рис. 4.5.16). Элементы связи и точки присоединения к корпусу, относящиеся к цепям одного усилительного прибора, следует размещать как можно ближе к его поперечной оси. Между усилительными приборами, даже на довольно большом расстоянии от продольной оси, недопустимо размещать детали, связи и точки присоединения к корпусу, относящиеся к другим каскадам данного усилителя. Все эти условия выполняются наилучшим образом, если каскады располагаются один за другим на одной линии. Такая конструкция называется линейной.

При автоматическом размещении элементов на плате аналогового узла запрещается улучшать размещение элементов путем перестановки их местами, допускаемой для элементов цифровых узлов. Для уменьшения переходного сопротивления контакта заземления и повышения его стабильности целесообразно выполнять его в виде монолитного (паяного или сварного), а не прижимного или разъемного соединения. Эффективным путем уменьшения длины общих участков является использование отдельной шины с нулевым потенциалом для каждой группы цепей: малосигнальных, с сигналами средней и большой мощности. Так, в радиотехническом устройстве шины с нулевым потенциалом (земляные шины) должны выполняться отдельно для входных цепей приемника, исполнительных цепей автоматики и выходных каскадов передатчиков (рис. 4.5.17).

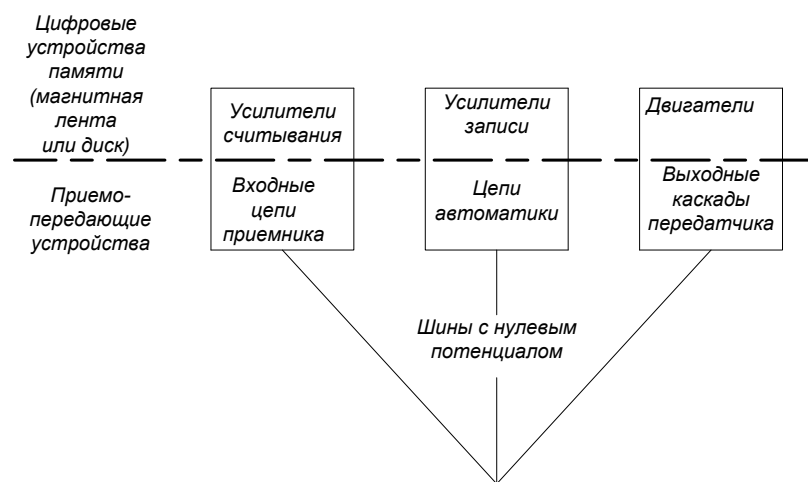


Рис. 4.5.17. Схема выполнения индивидуальных шин с нулевым потенциалом (земляных шин) для каждой группы устройств (цифровых, аналоговых)

Кондуктивная помеха может возникнуть, если, например, земляная шина выполнена (рис. 4.5.18) в виде замкнутого контура. В этом случае от по-

стороннего источника за счет индуктивной связи в ней может быть наведена ЭДС (В)  $E = 4,44 f H F \cdot 10^{-4}$ , где  $f$  — частота, Гц;  $H$  — средняя напряженность магнитного поля, А/м;  $F$  — площадь «петли» контура,  $см^2$ . Даже сравнительно небольшая ЭДС на малом сопротивлении шины может создать в контуре вполне ощутимый ток, который может привести к падению напряжения (кондуктивной помехе) на участке аб (рис. 4.5.18), равному примерно  $E/4$  (для данной конструкции). Для исключения подобной помехи необходимо разомкнуть контур. Индуктивную связь можно также ослабить, уменьшая площадь взаимосвязанных контуров в результате использования скрученных или бифилярных пар проводников (в том числе в экране), расположения объемных и печатных проводников вблизи плоскости с нулевым потенциалом. Так, замена одиночного проводника диаметром 0,5 мм и длиной 500 мм, отстоящего от плоскости с нулевым потенциалом на 100...200 мм, скруткой или бифиляром позволяет уменьшить индуктивность контура (а, следовательно, и помехи) с 800...900 до 180...320 нГн, т. е. в 3...4 раза. Обычно скрученные пары и бифиляры используют до частоты 100 кГц (на частоте 10 МГц велики потери); коаксиальные кабели — до частоты 100 МГц (на частоте 1 ГГц велики потери); полые волноводы — на более высоких частотах.

Если на оба входа дифференциального усилителя поступают одинаковые по полярности и амплитуде помехи (синфазные), то они подавляются усилителем. Если на оба входа дифференциального усилителя (рис. 4.5.19) поступают помехи одинаковые по амплитуде, но

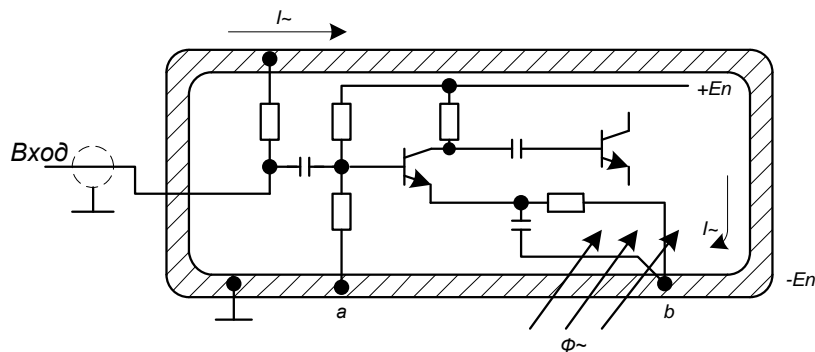


Рис. 4.5.18. Земляная печатная шина в виде замкнутого контура:  $\Phi_{\approx}$  — магнитный поток от поля рассеивания силового трансформатора



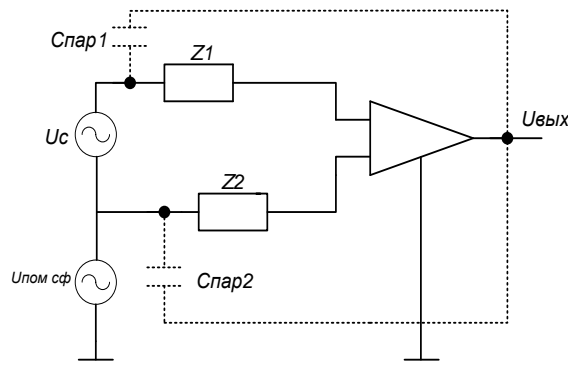


Рис. 4.5.19. Схема воздействия сигнала  $U_c$  и синфазной помехи  $U_{ном\ сф}$  на усилитель с двумя входами

противоположные по полярности или одинаковые по полярности, но разные по амплитуде (дифференциальные помехи), то они усиливаются. Дифференциальные помехи могут возникнуть из-за различной паразитной связи входов усилителя с источником помех ( $C_{пар1}$  и  $C_{пар2}$  на рис. 4.5.19).

Для аналоговых узлов шире, чем для цифровых, используют методы, позволяющие осуществить взаимную компенсацию помех одинаковой амплитуды и противоположной полярности: скрученные пары, дифференциальные усилители, режекторные фильтры (рис. 2.5.11).

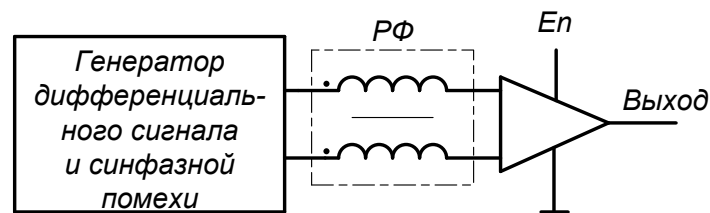


Рис. 4.5.20. Схема включения режекторного фильтра (РФ) на входе усилителя.

Использование режекторного фильтра основано на том, что он имеет малое сопротивление для тока дифференциального сигнала (имеющего разную полярность) на входе фильтра и большое сопротивление для тока синфазной помехи (в результате суммирования магнитных потоков обмоток). В качестве эффективных элементов гальванической развязки можно использовать оптроны.

В процессе работы электронные устройства подвергаются действию электромагнитных помех. В цепях с аналоговыми сигналами помехи искажают полезный сигнал, и приходится говорить о допустимом уровне искажений. Для цифровых и импульсных схем допустимый уровень помехи определяется порогом срабатывания элемента, на вход которого она поступает, помеха не

должна опрокидывать триггер, запускать ждущий мультивибратор и т.д. во всех случаях приходится оценивать отношение сигнал/помеха.

Источники внешних помех для электронной аппаратуры могут быть весьма разнообразны – радиотехнические связные и локационные комплексы, рентгеновские установки, мощные вещательные станции, силовое электрооборудование, сетевые провода, трансформаторы и т.п. электронная аппаратура подвергается действию не только техногенных, но и естественных электромагнитных помех. Естественные помехи обусловлены природными физическими процессами в виде электромагнитных излучений, электростатических помех вследствие электризации элементов конструкций, мощных электромагнитных импульсов. Электромагнитный импульс от близкого разряда молнии способен не только создать мощную помеху в широкой полосе частот, но и разрушить чувствительные цепи электронной аппаратуры.

*Среди помех техногенного происхождения обычно выделяют две группы электромагнитных помех:* первая – помехи, излучаемые радиопередающими устройствами в рабочей полосе частот и вне этой полосы; вторая – промышленные помехи, сопутствующие работе электротехнических и электронных устройств: электродвигателей, линий электропередач, контактной сети, электросварочных аппаратов, системы зажигания в двигателях внутреннего сгорания, средств вычислительной техники и т.п. промышленные помехи, как правило, имеют импульсный характер и могут проявляться в широком диапазоне частот – от десятков герц до единиц гигагерц.

Наиболее уязвимыми частями РЭА для электромагнитных помех являются проводные линии ввиду их протяженности. Помехи могут улавливаться и непосредственно электрорадиоэлементами, входящими в состав устройства.

Естественным приемом борьбы с магнитными помехами является экранирование проводов линий связи. Экранирование заключается в локализации электромагнитной энергии в определенной части пространства. Поглощая и отражая поток электромагнитной энергии, экран отводит его от защищаемой области. Эффективность экранирования определяется как отношение магнитных (или электрических) составляющих поля в защищаемой области и в отсутствии экрана к соответствующим величинам при наличии экрана.

В табл. 4.5.2 приведены различные схемы экранирования, свивки проводов и соответствующие им уровни подавления помех.

Приведенные данные относятся к ультразвуковым частотам (примерно от 30 до 100 кГц). Подавление указано в децибелах (взято отношение помехи в незащищенном проводе к уровню помех в данной схеме). Элементы  $e_T$  и  $R_T$  на схемах относятся к источнику сигнала,  $R_H$  – сопротивление нагрузки, подключенной к выходному концу линии.

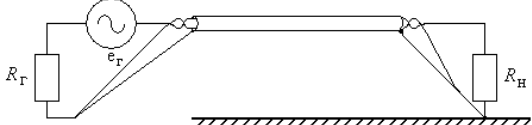
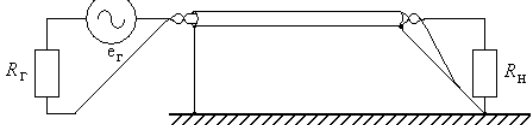
В схемах 1-6 табл. 4.5.2 цепи заземлены с двух сторон. Возвратные токи источников сигнала проходят через шину земли полностью или частично, поэтому площадь контура, пересекаемого магнитным полем, велика. В схемах

7-11 таблицы проводник возвратного тока источника сигнала расположен близко к сигнальному проводу, поэтому подавление магнитных наводок здесь принципиально выше. В схемах 1-2 таблицы магнитного экранирования нет, так как контур, пересекаемый магнитным потоком, не изменился по сравнению с простым проводником.

Заземление экрана с одной стороны обеспечивает экранирование только электрического поля. Заземление обоих концов экрана (схема 3) дает сравнительно малый эффект, поскольку значительная часть возвратного тока проходит по шине земли. Кроме того, экран образует с шиной земли контур, в котором в свою очередь появляется магнитная наводка.

Таблица 4.5.2

№ схемы	Схема соединения экрана и сигнальных проводов ( $R_{Г} < 1\text{кОм}$ , $R_{Н} < 1\text{МОм}$ )	Подавление помехи, дБ
1		0
2		0
3		27 (6-27)
4		13
5		13
6		28 (6-28)
7		80 (49-80)
8		55 (12-79)
9		70 (65-70)

10		77 (71-77)
11		83

Витая пара, заземленная с обоих концов (схема 4) обеспечивает некоторое подавление магнитной наводки, зависящее от распределения тока между возвратным проводом пары и шиной земли. Добавление экрана дает эффект только при заземлении экрана с обоих концов (схемы 5 и 6).

Среди схем с незаземленным источником сигнала наилучшей является схема 7, в которой площадь контура минимальна благодаря соосности экрана и центрального сигнального провода. Несколько хуже подавление в витой паре (схема 8) из-за влияния электрических полей и неправильной геометрии, что видно из сравнения со схемой 9. Схема 11 уступает другим, так как в ней магнитные наводки в контуре экран-земля могут проникать в сигнальную цепь. Для улучшения экранирования на низких частотах сопротивление экранирующей оплетки должно быть как можно меньше, при этом наилучшей схемой экранирования является схема 10, в которой сопротивление экрана играет меньшую роль. Экраны во всех случаях следует изолировать, чтобы не допустить их случайного замыкания. Дополнительное заземление или частичное замыкание оболочки может ухудшить экранирующий эффект, так как при этом часть обратного тока будет протекать минуя экран. Для защиты линий с слабыми сигналами в высокочастотном магнитном поле используются кабели парной скрутки с двойной экранировкой. Внешний экран заземляется у концов кабеля (при длине кабеля не более 0,2 длины волны), а внутренний у источника сигнала.

Приведённые схемы экранирования позволяют существенно снизить не только магнитную, но и электрическую «наводку». Однако здесь требуется правильно выбирать место подключения экрана: при присоединении экрана к точке схемы, в которой не обеспечивается постоянный нулевой потенциал, помеха может попадать в сигнальные цепи через большую емкость сигнальный провод – экран интенсивнее, чем в случае отсутствия экрана.

Частотные возможности той или иной схемы экранирования зависят от конструктивных параметров линии передачи и влияния на нее источника сигнала и нагрузки. Экранированные кабели парной скрутки обеспечивают хорошую защиту от электромагнитных помех вплоть до частоты 100 кГц и удовлетворительно функционируют до 10 МГц. Сигналы прямого и обратного тока распространяются по внутренним проводникам, а токи помех текут только в экране. Предельная рабочая частота витой пары проводников определяется равномерностью и величиной шага скрутки. С ростом частоты сигнала ухудшается помехозащищенность, и увеличиваются отражения от неоднородностей линии. Коаксиальные кабели обеспечивают удовлетворительную помехозащищенность вплоть до 100 МГц. На частотах выше 1 МГц благодаря скин-эффекту коаксиальный кабель начинает действовать как триаксиальный: обратные токи сигнала текут по внутренней стороне экрана, а помех по внешней. На более низких частотах для защиты слабых сигналов применяются специальные триаксиальные кабели.

#### 4.6. Особенности проектирования ЭС различного назначения. Перспективы развития конструкций РЭУ

Характер и интенсивность воздействия климатических (в меньшей степени), механических и радиационных (в большей степени) факторов зависят от тактики использования и объекта установки РЭУ. Классифицируя любую РЭУ по этому признаку, можно разделить их на стационарные и транспортируемые. Каждая из групп, в свою очередь, включает в себя РЭУ различных классов и назначения.

**Стационарные РЭУ.** Это машины, эксплуатируемые в отапливаемых и неотапливаемых помещениях, бункерах, подвалах, помещениях с повышенной влажностью, на открытом воздухе, производственных цехах. По тактико-техническим данным, это могут быть многомашинные вычислительные комплексы, большие универсальные, управляющие, настольные и встраиваемые вычислительные машины, микрокалькуляторы. Условия эксплуатации (и транспортировки в нерабочем состоянии до места эксплуатации) таких машин характеризуются весьма широким диапазоном рабочих (от  $-50$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ) и предельных (от  $-50$  до  $+65^{\circ}\text{C}$ ) температур, влажностью до 98%, вибрацией до 120 Гц при 4 — 6g, наличием многократных (до 5g) и одиночных (до 75g) ударов, воздействием дождя до 3 мм/мин и соляного тумана с дисперсностью капель до 10 мкм и содержанием воды до  $3 \text{ г/м}^3$ .

**Транспортируемые РЭУ.** Это машины, устанавливаемые и эксплуатируемые на автомобилях и автоприцепах, железнодорожном и гусеничном транспорте, морские и бортовые РЭУ. Специфика работы этого вида машин предопределяет повышенное воздействие механических факторов, в основном вибрации и ударов. Каждый вид транспорта имеет собственные вибрационные характеристики, характер изменения которых представлен на рис. 4.6.1

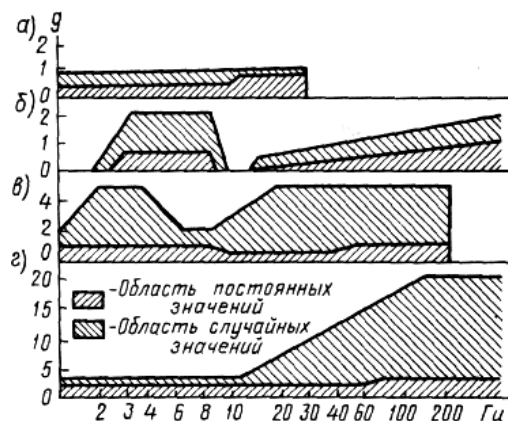


Рис. 4.6.1. Вибрационные характеристики различных видов транспорта: а — морской; б — железнодорожный; в — автомобильный; г — авиационный

Для предупреждения повреждений РЭУ необходимо, чтобы вся машина и отдельные ее части имели собственные резонансные частоты, лежащие вне диапазона, частот вибрации транспортного средства, на котором машина эксплуатируется или перевозится. На РЭУ, устанавливаемую на автомобилях и автоприцепах, могут воздействовать вибрация 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 40g). Биение колес о стыки рельсов вызывает вибрацию с частотой до 400 Гц при ускорении до 2g. Особо жесткие условия работы создаются для РЭУ, эксплуатируемой в гусеничном транспорте (танках, транспортерах и самоходной артиллерии). Здесь вследствие «стука» гусениц частота вибраций может достигать до 7000 Гц с амплитудой  $\pm 0,025$  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 РЭУ установлена непосредственно на оружейной площадке, на перевозочных средствах или в служебных помещениях, то наибольшую опасность для нее представляет ударная волна—главная причина толчков и вибраций. Величина вибраций и ударов, сообщаемых ударной волной, зависит от массы и площади поверхности РЭУ. Чем больше масса и меньше поверхность РЭУ, тем эффект действия ударной волны меньше, и, наоборот, чем меньше масса и больше площадь поверхности РЭУ, тем большим величинам вибрации и ударов она подвергается.

**Морские РЭУ.** Это РЭУ, устанавливаемые на больших, сравнительно тихоходных, и малых быстроходных судах и подводных лодках, а также на оружейных площадках береговой артиллерии. Характерные условия работы на таких объектах — наличие вибраций, ударных нагрузок и морской среды.

Вибрация на судне может быть вызвана работой винтов, гребного вала, главного и вспомогательных двигателей и гидродинамическими силами, возникающими при продвижении судов по беспокойному морю. На малых судах вибрация обусловлена главным образом работой двигателя и биением волн о борт корабля, а на больших судах — вращением винтов. Диапазон частот вибраций сравнительно невелик и обычно не превосходит 25 Гц. Амплитуда вибраций на кораблях также невелика и зависит от места на борту.

На рис. 4.6.2, *а*, *б* схематически представлены соответственно профили крейсера и быстроходного сторожевого катера, разделенные по степени вибрации на участки.

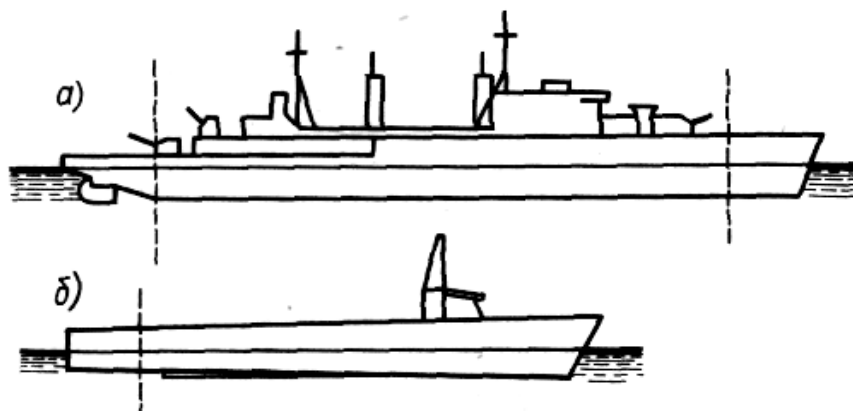


Рис. 4.6.2. Разделение контура корабля на участке с различными вибрационными характеристиками: *а* — корабль с большим водоизмещением (крейсер); *б* — быстроходный катер (сторожевой корабль)

На крейсере таких участков три: носовой, кормовой и основной. Кормовой участок ( $\frac{1}{8}$  длины корабля) подвергается вибрациям с частотой 0-25 Гц (максимальная амплитуда 25 мм на частоте 2 Гц); носовой участок — вибрациям с частотой, не превышающей 20 Гц (амплитуда 15 мм на частотах ниже 5 Гц); основной участок — вибрациям с частотой до 20 Гц (максимальная амплитуда 0,6 мм). Быстроходные сторожевые катера и другие мелкие суда этого класса кораблей подвержены вибрациям с большей частотой. Задний, кормовой, участок подвергается вибрациям с частотой 150 Гц (максимальная амплитуда 0,3 мм на частоте 10 Гц), остальная часть корабля — вибрациям с частотой до 1000 Гц (максимальная амплитуда 0,15 мм на частоте 10 Гц).

Морская среда, окружающая РЭУ, находящуюся на кораблях, содержит большое количество различных активных веществ, постоянно действующих на ее работоспособность. Поэтому РЭУ этого класса должны обладать высокой коррозионной стойкостью, плеснестойкостью, водо- и брызгозащищенностью.

На РЭУ, установленные на оружейных площадках береговой артиллерии, воздействуют такие же факторы, как и на РЭУ, находящиеся на сухопутных площадках. Дополнительный фактор — наличие агрессивной атмосферы, защита от которой обязательна для этого класса машин.

Бортовые РЭУ. Это РЭУ, устанавливаемые на борту самолетов, ракет различных классов, искусственных спутников Земли (ИСЗ), космических аппаратов. По общим характеристикам бортовые РЭУ в основном не отличаются от других типов машин, однако имеют особенности, определяемые спецификой требований к бортовой аппаратуре. По назначению бортовые РЭУ — машины управляющие, работающие в замкнутом контуре управления объектом. По виду использования их разделяют на машины, устанавливаемые в беспилотные (ракеты, ИСЗ) и пилотируемые объекты (самолеты, космические корабли, орбитальные станции).



Машины, устанавливаемые в беспилотные объекты, заменяют операторов на борту объекта и связаны со всем комплексом технических средств объекта через систему датчиков и исполнительных механизмов. Получая информацию от датчиков, они ее обрабатывают и выдают соответствующие команды исполнительным механизмам. Такие машины имеют небольшую оперативную память и большую постоянную память (память констант).

Машины, устанавливаемые в пилотируемые объекты, обладают характеристиками как управляющих (например, при работе в системе «автопилот»), так и универсальных РЭУ. Последнее необходимо для решения задач, возникающих в процессе полета объекта и требующих быстрого ответа.

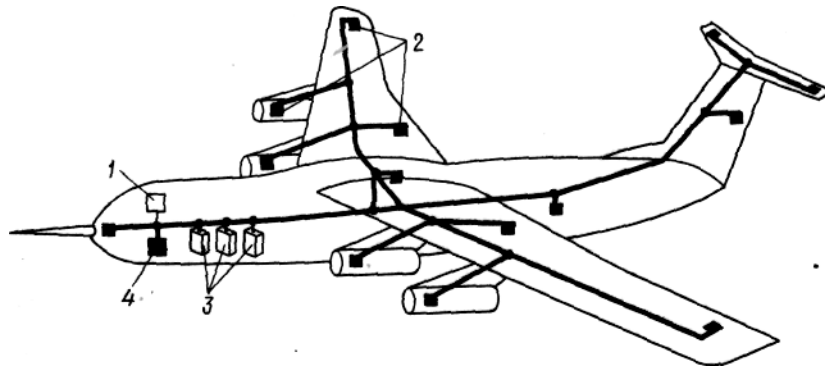


Рис. 4.6.3. Место вычислительной аппаратуры в общей системе управления самолетом:

1 — панель управления; 2 — датчики и исполнительные механизмы (все зачерненные на рисунке квадраты); 3 — РЭУ; 4 — аппаратура системы «автопилот»

Для машин второй группы характерно наличие пульта управления.

На рис. 4.6.3 схематически представлено расположение основных узлов бортовой системы управления самолетом, в состав которой входит управляющая вычислительная машина, оснащенная пультом управления. На самолетах вычислительная аппаратура, как правило, находится в фюзеляже. При этом на нее могут воздействовать вибрационные нагрузки с частотой до 200 Гц и ускорением до 10g. Амплитуда колебаний достигает 10 мм. Близость к фюзеляжу участка самолета, содержащего силовую установку (двигатели), увеличивает частоту вибраций до 500 Гц при амплитуде до 0,5 мм. Хвостовая часть самолета подвержена воздействию вибрации с частотой до 150 Гц (амплитудой до 2,5 мм). Аппаратура, установленная в самолетах, подвергается также интенсивному воздействию акустического шума и ударов. Величина шумов оценивается в 130—150 дБ при частоте 50-10000 Гц.

Вычислительная аппаратура, находящаяся на борту ИСЗ и космических аппаратов, является составной частью системы управления движением этих объектов. Такая система управления призвана решать в основном задачи ориентации и стабилизации объекта в пространстве и наведения (навигации) его при перемещении в космическом пространстве, выхода на околопланетные

орбиты, маневрирования с целью сближения с другим объектом или при посадке на поверхность планет.

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 вибрации 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 достигать 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 оказывают вибрации двигателей малых ракет на твердом топливе, а также больших двигателей на жидком топливе. Частота вибраций может достигать 2500 Гц при ускорениях до 20g. Характер вибраций синусоидальный.

В момент запуска ракеты и при ее полете на бортовую аппаратуру воздействует акустический шум, уровень которого достигает 150 дБ (уровень акустического шума тем больше, чем ближе аппаратура располагается к работающему двигателю), однако действие акустического шума на бортовую аппаратуру меньше, чем на аппаратуру, устанавливаемую, например, в колесном или железнодорожном транспорте. Акустический шум в малых ракетах в момент старта максимален.

Ускорение, развиваемое двигателем больших ракет на жидком топливе, обычно не превышает 15g. Максимальные ускорения ракет, находящихся на управляемой орбите, не превышают 10g, а малых ракет на твердом топливе — 50g. 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.

**Портативные РЭУ.** Группа РЭУ, занимающая промежуточное положение между транспортируемыми и стационарными РЭУ, — портативные РЭУ. Их транспортировку осуществляет человек. Появление этой группы РЭУ явилось результатом широкого внедрения больших интегральных схем (БИС) в аппаратуростроение.

Самым массовым представителем портативных РЭУ является микрокалькулятор. Небольшие габариты, малая мощность потребления, высокая надежность и сравнительно небольшая стоимость делают его незаменимым для проведения расчетов, не требующих программирования.

К портативным РЭУ следует отнести и «простейшие» по выполняемым функциям вычислители и контроллеры, управляющие работой бытовой техники, звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуры, различной степени сложности «интеллектуальных» игр.

Условия работы портативной РЭУ должны соответствовать зоне комфорта для человека, которая характеризуется температурой окружающей среды 18—24 °С (291—297 К), уровнем акустического шума 70—85 дБ, влажностью 20—90% и высотой над уровнем моря до 3000 м. Если температура становится меньше - 17°С (256 К) или больше 43,5°С (316,5 К), уровень шума 120 дБ, влажность 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 (до 147 Н и до 80 Н) и тяжелую (до 390 Н и до 216 Н).

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

*По совокупности значений климатических, механических и радиационных факторов стационарные и транспортируемые РЭУ делятся на следующие группы:*

группа 1 — стационарные РЭУ и системы, работающие в отапливаемых наземных и подземных сооружениях;

группа 2 — стационарные РЭУ и системы, работающие на открытом воздухе или в неотапливаемых наземных и подземных сооружениях;

группа 3 — транспортируемые (возимые), установленные в автомобилях, мотоциклах, в сельскохозяйственной, дорожной и строительной технике и работающие на ходу;

группа 4 — возимые, установленные во внутренних помещениях речных судов и работающие на ходу;

группа 5 — транспортируемые (возимые), установленные в подвижных железнодорожных объектах и работающие на ходу;

группа 6 — транспортируемые и портативные, предназначенные для длительной переноски людьми на открытом воздухе или в неотапливаемых наземных и подземных сооружениях; работающие и не работающие на ходу;

группа 7 — портативные, предназначенные для длительной переноски людьми на открытом воздухе или в отапливаемых наземных и подземных сооружениях, работающие на ходу. Каждой из групп аппаратуры соответствует совокупность климатических и механических факторов, которой она должна соответствовать.

Методология конструкторско-технологического проектирования РЭА продолжает совершенствоваться, и пути ее развития связаны, во-первых, с внедрением РЭА во все сферы человеческой деятельности, во-вторых, с рос-

том степени интеграции применяемой элементной базы и, прежде всего, микроэлектронной и, в-третьих, исчезновением четких границ между системотехническим, схемотехническим, конструкторским и технологическим проектированием РЭА. 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). Эти тенденции будут иметь место и всемерно совершенствоваться в дальнейшем развитии электронного аппаратустроения, 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 РЭА. Как показывает практика разработки РЭА, 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 РЭА снижает эффективность их применения: замедляет темпы разработки, производства и внедрения, снижает серийность и качество, повышает стоимость и т. д.

Ниже приведены примеры конструкций различного назначения.

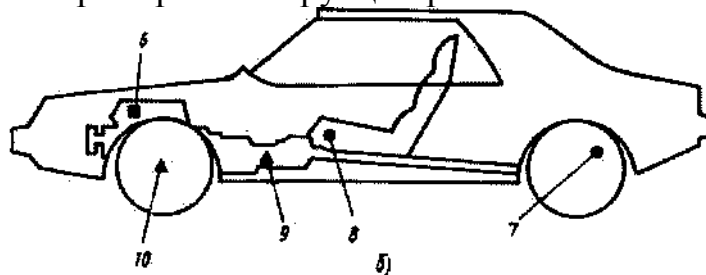


Рис. 4.6.4. Расположение микропроцессорной системы в автомобиле

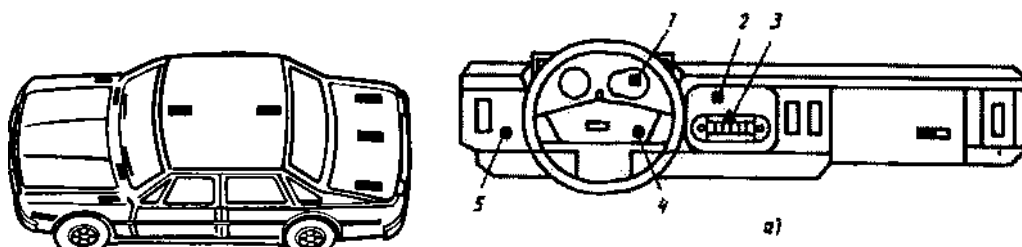


Рис. 4.6.5. Варианты размещения антенн системы предупреждения столкновений на легковом автомобиле

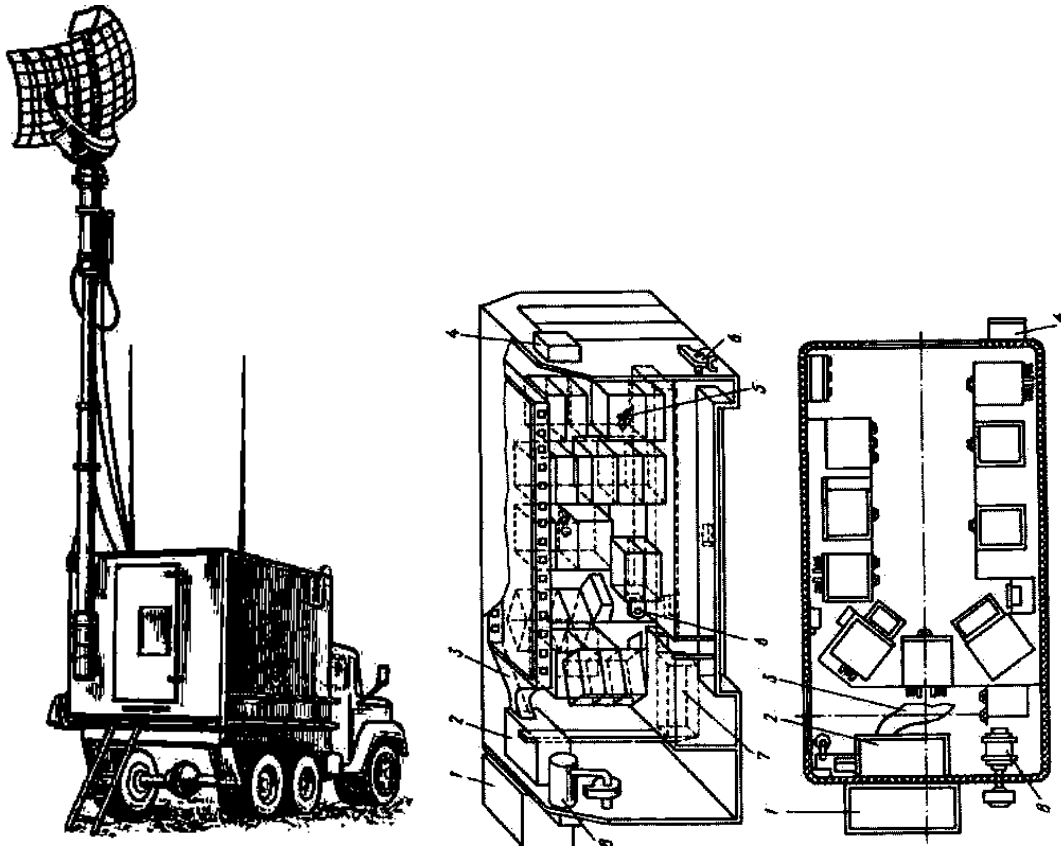


Рис. 4.6.6. Варианты РЭС, размещаемых внутри транспортного средства

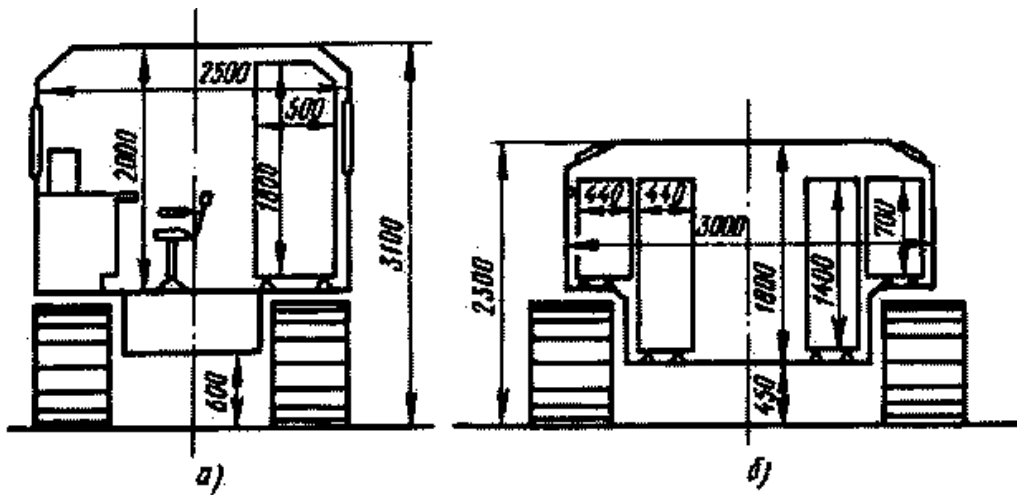
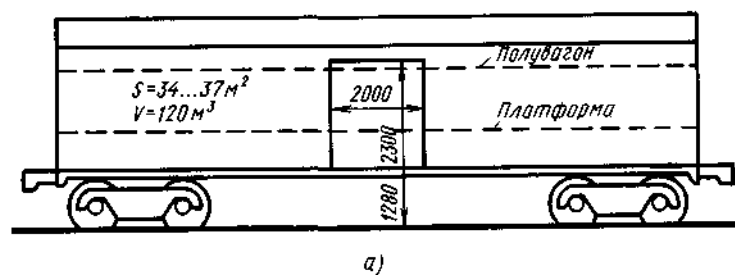


Рис. 4.6.7. Размещение РЭС в кузове обычной высоты (а) и низком кузове (б) для шасси на гусеничном ходу



а)

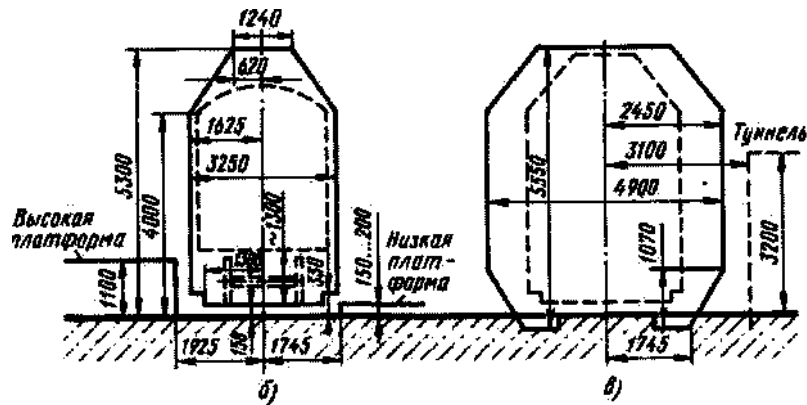


Рис. 4.6.8. Основные размеры четырехосных железнодорожных платформ, полувагонов, вагонов и дверных проемов в них (а); допустимые габариты подвижного состава железных дорог (б) и габариты расположения строений (в)

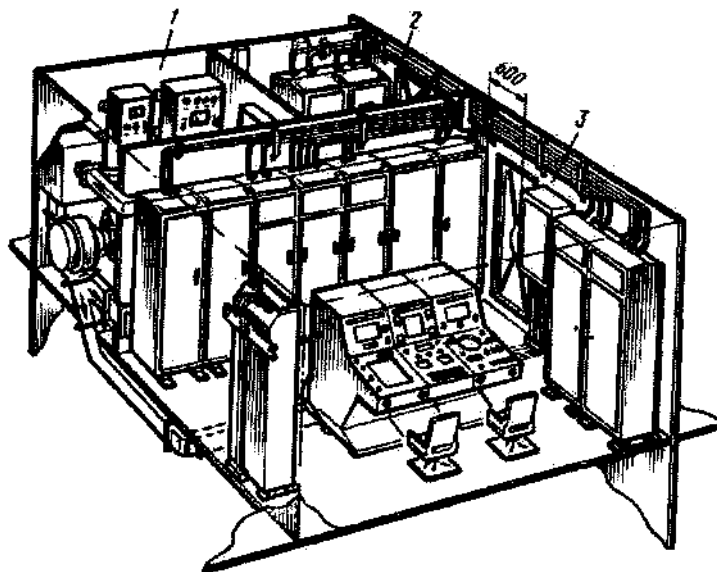


Рис. 4.6.9. Комплекс РЭС, размещенных в отсеке корабля: 1 — вентиляционная и помещение для запасного имущества; 2 — генераторная; 3 — помещение для размещения радиоэлектронных средств

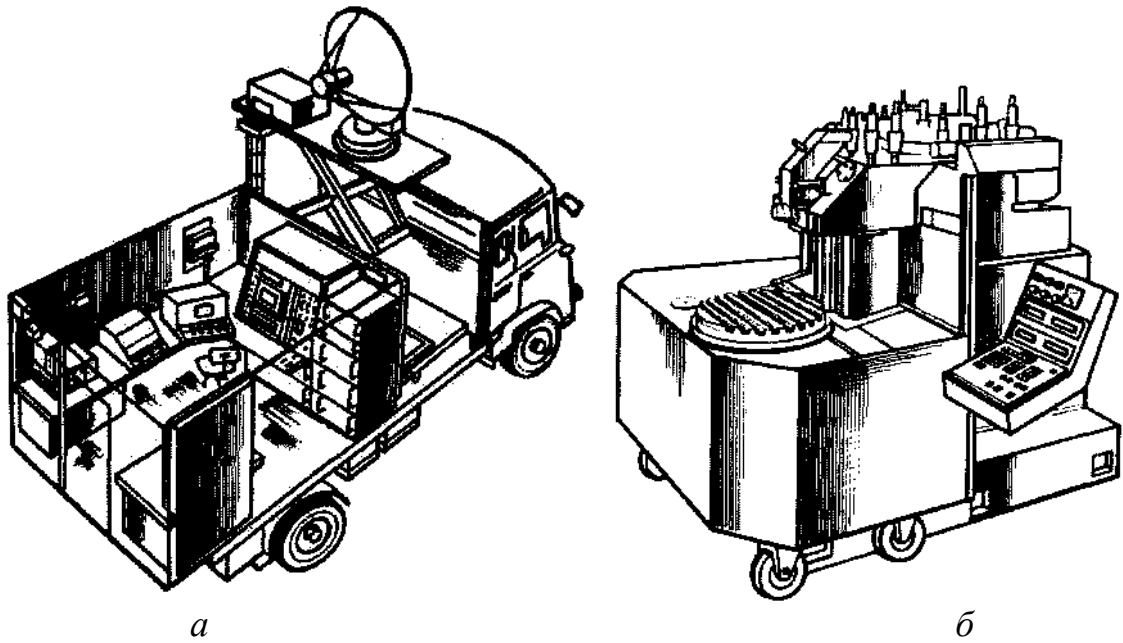


Рис. 4.6.10. Компонка подвижной станции радиопротиводействия (а) и расположение устройства числового программного управления на фрезерном станке (б)

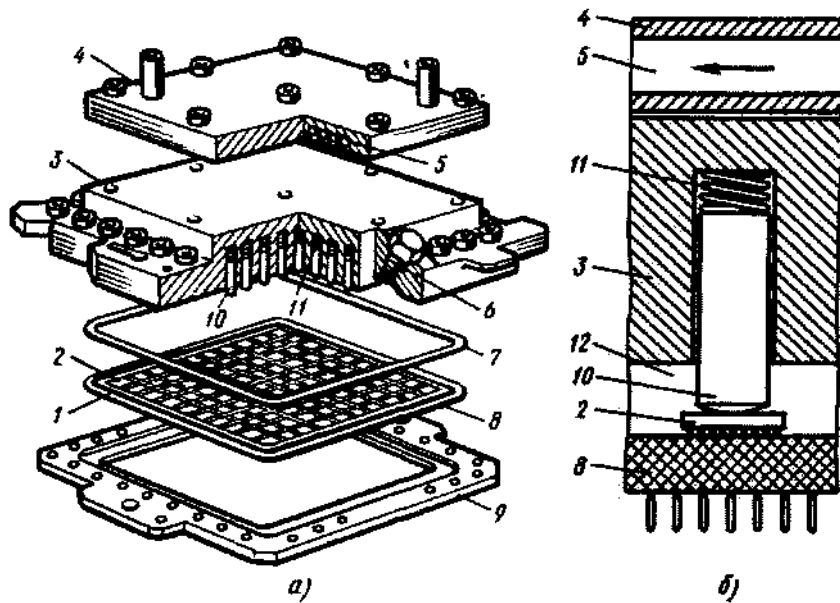


Рис. 4.6.11. Конструкция герметичного модуля стационарной быстродействующей ЭВМ фирмы «IBM»: а—теплоотводящий модуль; б—схема теплоотвода от кристалла через металлический плунжер и заполненный гелием внутренний объем; 1 — металлическое основание подложки; 2—кристалл ИС; 3 — крышка корпуса ЭВМ; 4 — панель охлаждения; J — каналы для воды; 6—пробка отверстия для заполнения гелием; 7 — уплотнительная прокладка; S — керамическая подложка; 9 — основание корпуса ЭВМ; 10—плунжер; 11—пружина; 12—гелий

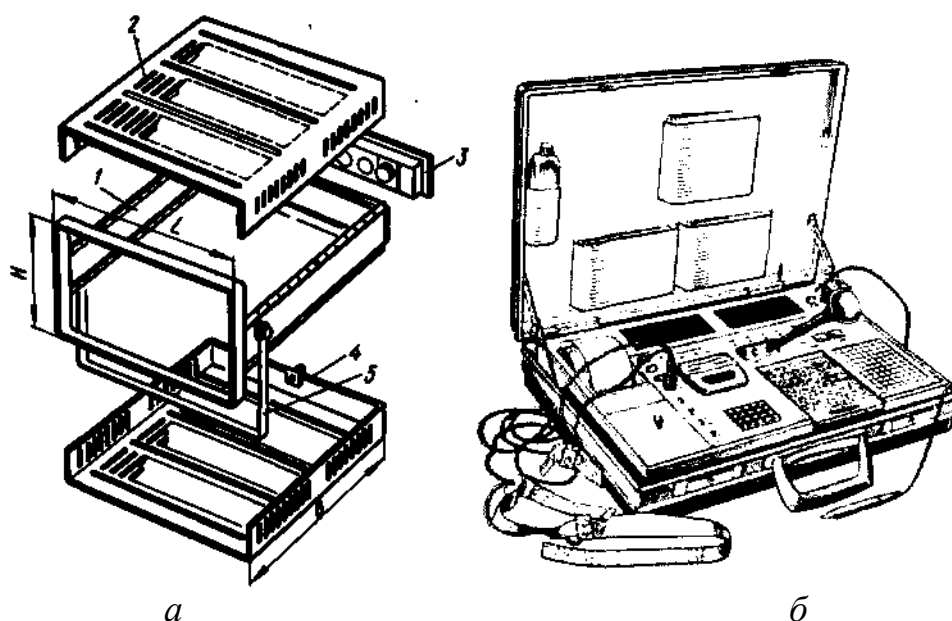


Рис. 4.6.12. Конструкция унифицированного корпуса настольного переносного измерительного прибора (*а*): 1 — каркас; 2 — верхняя крышка; 3 — задняя стенка; 4 — нижняя крышка; 5 — откидная ручка-подставка и общий вид переносного портативного комплекса (*б*)

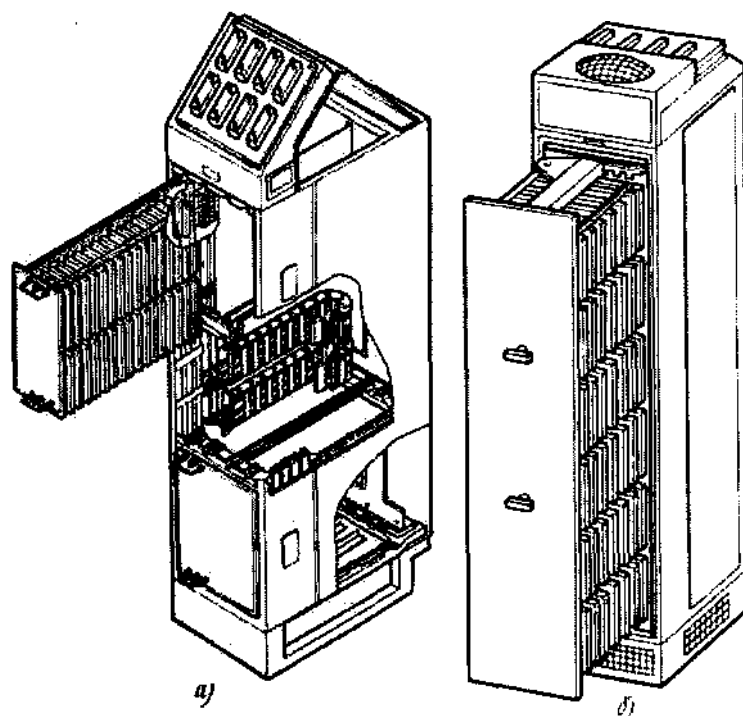
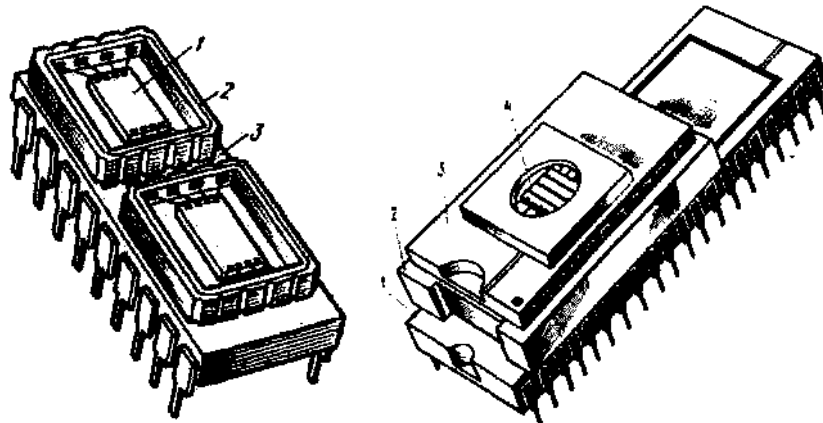


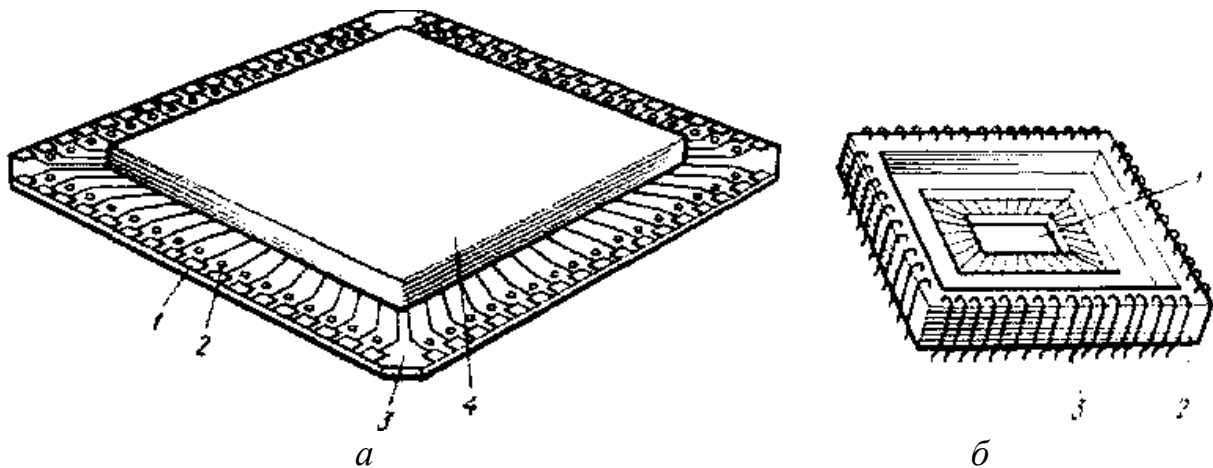
Рис. 4.6.13. Блочно-шкафная (*а*) и ячеечно-шкафная (*б*) конструкции транспортируемых РЭС





*а б*

Рис. 4.6.14. Размещение двух микрокорпусов на общем керамическом основании (*а*): 1- кристалл полупроводниковой ИС; 2— микрокорпус; 3— общее керамическое основание и конструкция микропроцессора с переходной колодкой для подключения ПЗУ (*б*): 1 — корпус микропроцессора; 2 — переходная колодка с разъемными контактами; 3— БИС ПЗУ; 4 — прозрачное окно для стирания информации



*а*

*б*

Рис. 4.6.15. Микрокорпус с двухрядными выводами и крышкой (*а*): 1 — первый ряд (контактные площадки); 2— второй ряд (контактные отверстия); 3— керамическая плата; 4 — крышка и пластмассовый кристаллодержатель с запрессованными гибкими выводами (*б*): 1 — ниша для размещения полупроводниковой ИС; 2— пластмассовая рамка; 3— запрессованные гибкие выводы

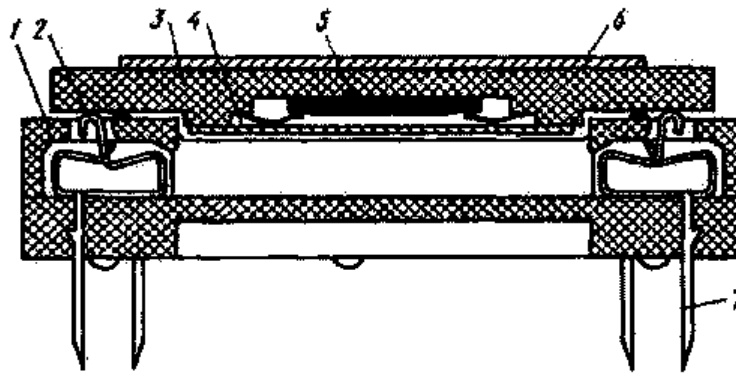


Рис. 4.6.16. Переходная колодка со сменным кристаллодержателем: 1 — переходная колодка; 2 — упругие контакты; 3 — микрокорпус; 4 — крышка; 5 — кристалл ИС; 6 — пружинный прижим; 7 — вывод, запаиваемый в печатную плату

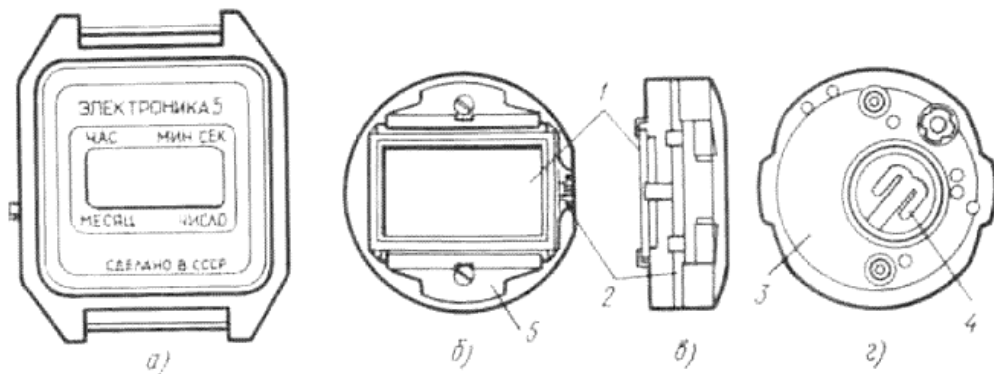


Рис. 4.6.17. Электронные наручные часы «Электроника-5»: а — общий вид; б — вид на электронный блок со стороны индикатора; в — вид сбоку; г — вид со стороны гнезда под батарейку; 1 — жидкокристаллический индикатор; 2 — печатная плата; 3 — пластмассовый корпус блока питания; 4 — пружинный контакт для подключения батареи питания; 5 — скобы для прижима индикатора к эластомерному соединителю типа «зебра»

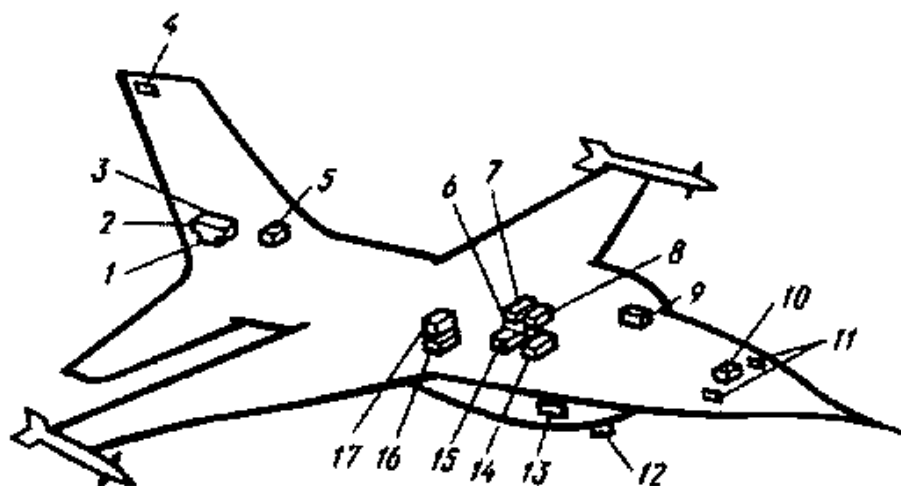


Рис. 4.6.18. Размещение системы «*Rapport-3*» на самолете *F-16*: 1 — антенны передатчика помех в хвостовом отсеке; 2—усилитель мощности; 3—передатчик имитационных помех в хвостовом отсеке; 4, 11— антенны, пеленгатора; 5, 10—приемники пеленгатора; 6 — усилитель мощности; 7— задающий генератор; 8 — передатчик имитационных помех в носовом отсеке; 9 — блок управления и индикации; 12—антенна приемника диапазона частот 0,5...2 ГГц; 13 — антенны передатчика помех в носовом отсеке; 14 — приемник диапазона частот 0,5...2 ГГц; 15 — процессор; 16 — блок управления приемником диапазона частот 2...8 ГГц; 17—приемник диапазона частот 2...8 ГГц

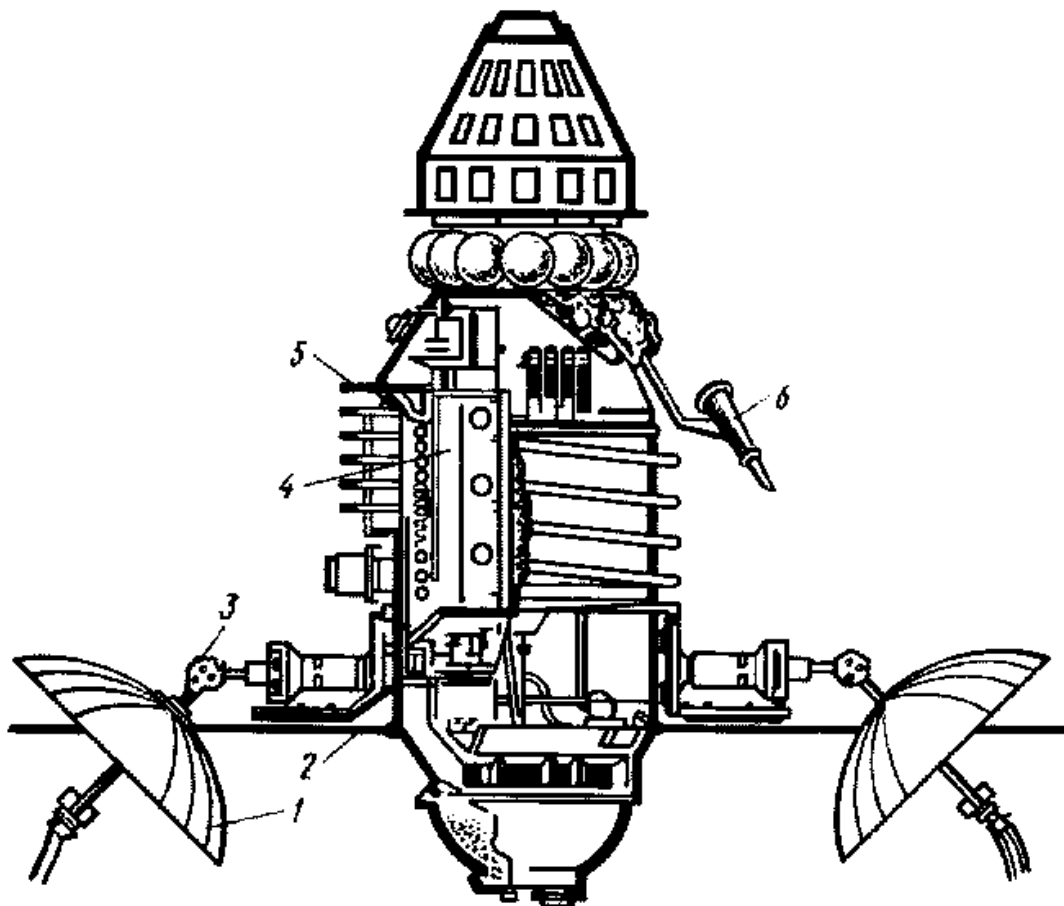


Рис. 4.6.19. Компоновка спутника «*Молния-1*»: 1 — антенны ретранслятора; 2—солнечные батареи; 3 — привод антенны; 4—блоки РЭС; 5 — корпус; 6 — телевизионная камера с системой самонаведения

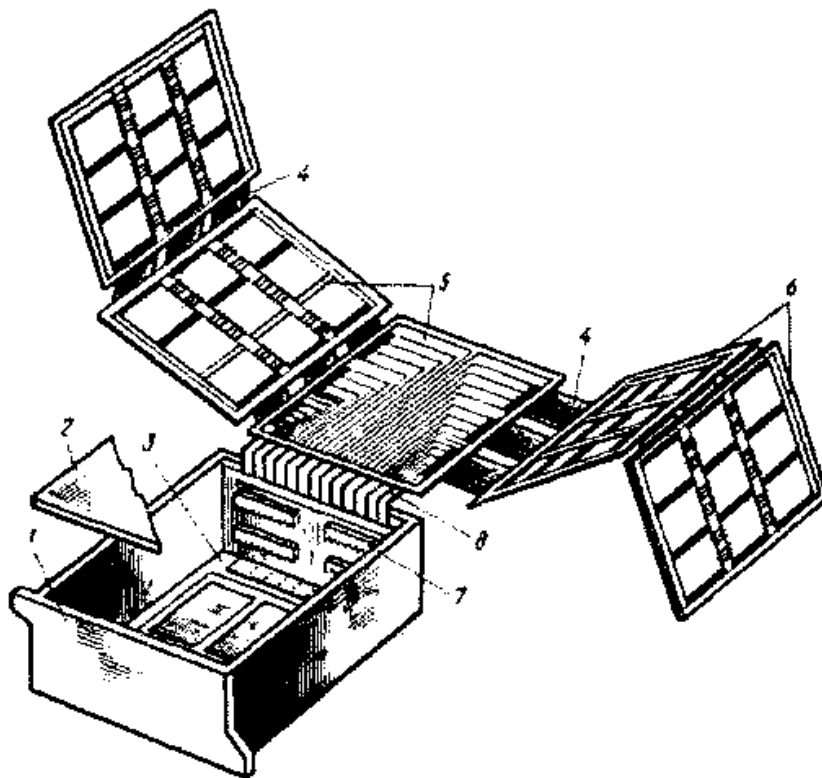


Рис. 4.6.20. Общий вид блока бортовой ЭВМ: 1 — гермокорпус; 2 — крышка; 5 — плата вторичного источника электропитания; 4 — печатный шлейф; 5 — коммутационная плата на основе полиимидной пленки; 6 — рамка ячейки; 7 — соединитель для внешних связей; 8 — плоский кабель

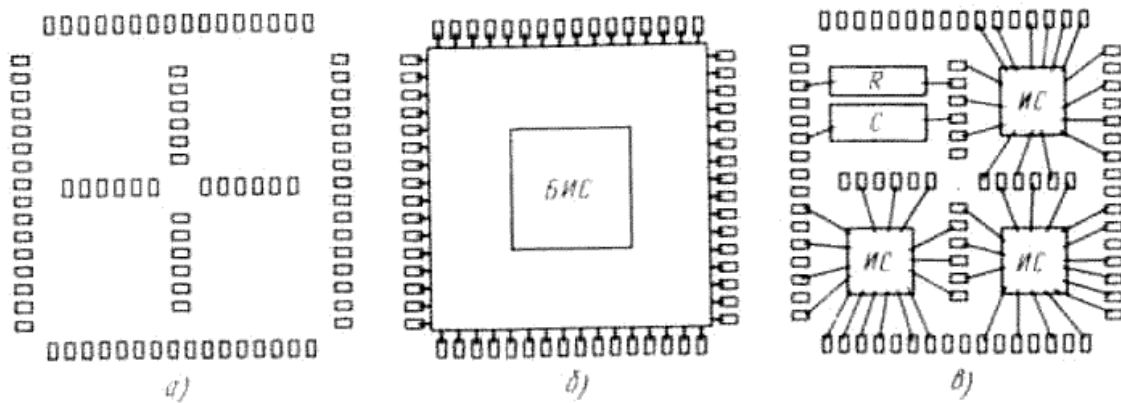


Рис. 4.6.21. Установка бескорпусных ЭРЭ на полиимидную печатную плату: а — знакоместо для установки разногабаритных ЭРЭ; б — знакоместо с установленной на нем БИС с 64 контактами на пленочном носителе; в — пример установки на знакоместо, на котором установлены ИС с гибкими выводами и дискретные электрорадиоэлементы

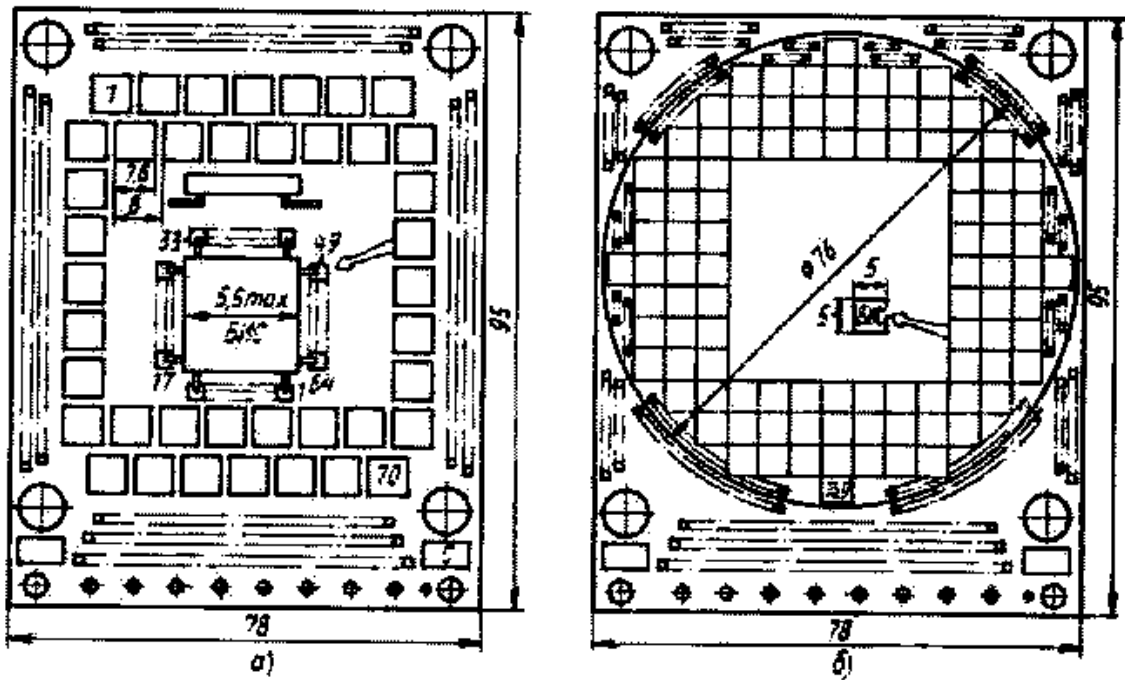


Рис. 4.6.22. Компоновка ячеек РЭС специального назначения на много-  
слойной полиимидной пленке (а) и на полупроводниковой пластине (б)

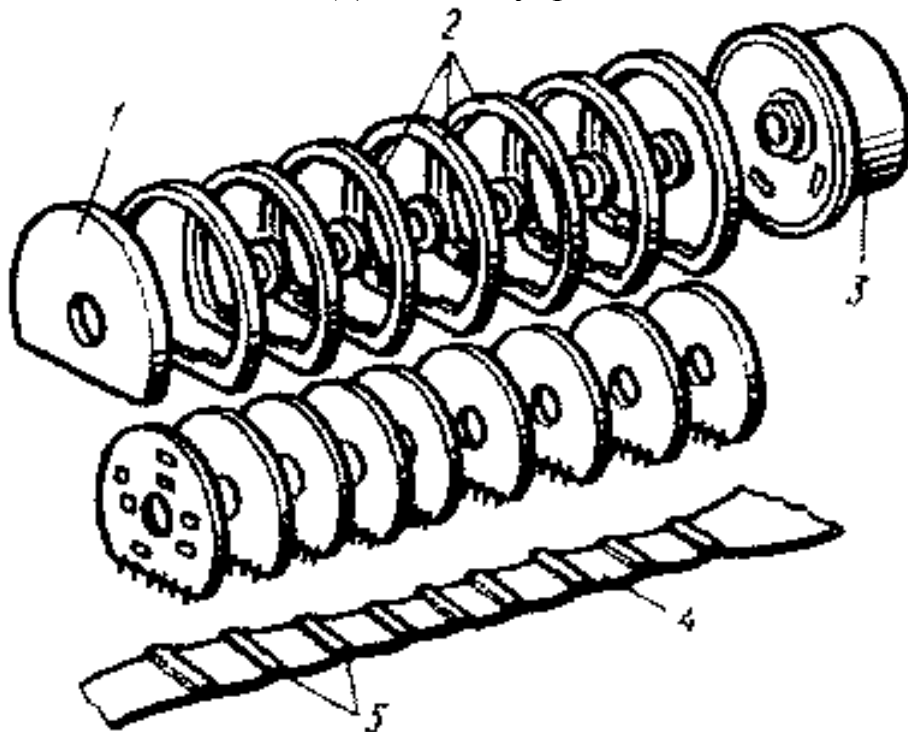


Рис 4.6.23. Конструкция РЭС головки самонаведения снаряда 155-мм  
гаубицы (США): 1 — верхняя крышка; 2—дистанционные кольца; 3—ниж-  
няя крышка; 4—соединительный шлейф, 5 — ответные части соединителей

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое надежность? Основные эксплуатационные свойства изделий. Работоспособность и отказы.
2. Количественные характеристики надежности? Как рассчитать интенсивность отказов?
3. Что такое структурная надежность аппаратуры?
4. Как защищают РЭА от воздействия окружающей среды?
5. Как защищают РЭА от тепловых воздействий?
6. Как защищают РЭА от механических воздействий?
7. Как защищают РЭА от воздействия электромагнитных помех?
8. Как рассчитывается электромагнитная совместимость узлов РЭА?
9. Каковы особенности проектирования ЭС различного назначения

## 5. Технология производства РЭС

### 5.1. Виды технологических процессов

*Технологические процессы (ТП) в зависимости от подробности их разработки, типизации, наличия оборудования и объема выпуска изделий классифицируются 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.

Маршрутнооперационная 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.

## **5.2. 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. 5.2.1 в качестве примера приведены этапы разработки ТП монтажа и сборки электронных узлов.



Таблица 5.2.1.

## 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 $K_{\text{зо}}$ и объему выпуска $N$ изделий. Выбор оборудования и средств технологического оснащения
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 $\Gamma_{шт}$ 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	Выбор и анализ требований по шуму, вибрациям, ради-

зрения техники безопасности	ации, 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.

**Выбор технологического процесса сборки электронного узла.** Для ТП сборки и монтажа конструктивных элементов первого уровня (модулей, ТЭЗ, узлов) типовые операции приведены в табл. 5.2.2.

Таблица 5.2.2.

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 плат, 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 исуш-

		ка 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 крупносерийном 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 осу-

ществляется 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 большую 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 типоминнала. 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.

**Разработка схемы сборки.** После выбора типовых операций и ТП сборки следует перейти к анализу сборочного состава изделия и разработке схемы сборки, которая, например применительно Ступени сборки РЭА, как правило, отражают модульное построение ее конструкции. ТЭЗ — первая ступень, блок — вторая и т. д. Схема сборочного состава, рис. 5.2.1., 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. 5.2.2, определяет последовательность установки деталей и сборочных единиц на базовую деталь (или сборочную единицу). На схеме должны быть указаны операции по получения механических соединений (свинчивание, расклепка, развальцовка, склеивание, сварка); операции электрического монтажа (пайка, сварка, накрутка, раскладка проводов); операция контроля и герметизации (промывка, сушка, лакирование, нанесение компаунда).

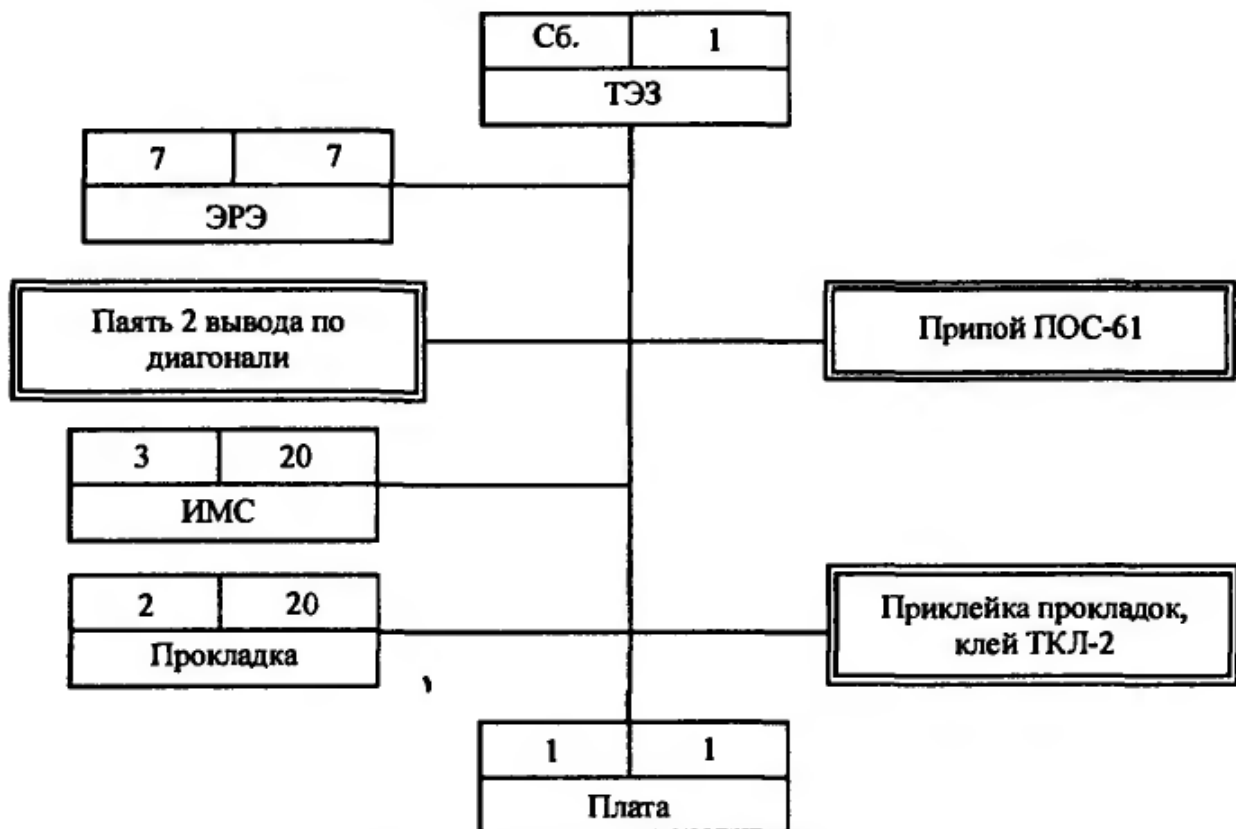


Рис 5.2.1. Схема сборочного состава

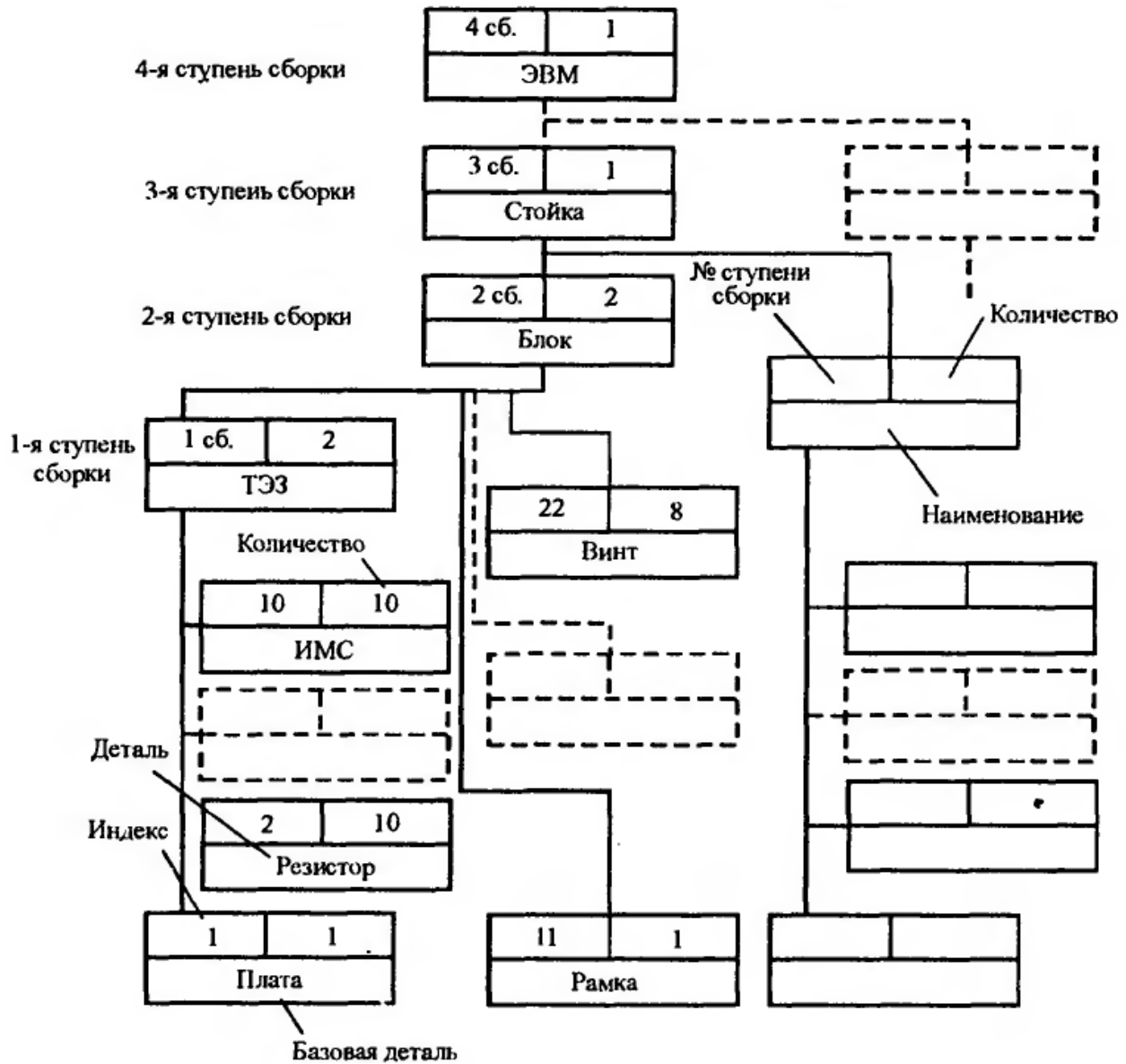


Рис. 5.2.2. Схема сборки ТЭЗ

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. 5.2.2), 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.

### 5.3. Технологические процессы и качество РЭС

Разработка ТП изготовления, сборки и наладки РЭС должна базироваться на двух основах: технической и экономической. Техническая основа — разрабатываемый ТП должен обеспечивать необходимое *качество* получаемой РЭС. Экономическая основа — разрабатываемый ТП должен обеспечить выпуск РЭС с минимальными затратами и с высокой производительностью труда.

Под **качеством** при этом понимается совокупность свойств РЭС, 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 РЭА. Точность** — степень соответствия действительного (полученного) параметра заданному ( $X$ ) номинальному.

*Эта степень соответствия устанавливается допуском ( $\delta$ ) 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, перпендикулярность 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 номером квалитета, например /772. Для физических параметров допуск может быть проставлен в процентах. Например, электрическое сопротивление

$$R_H \pm 5\%, R_H \pm 10\%, R_H \pm 20\%,$$

При любом производстве отдельный параметр имеет разброс из-за производственных погрешностей. 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*

$$\delta \geq \sum \Delta$$

где  $\delta$  — допуск на размер (параметр),  $\sum \Delta$  — производственные погрешности, присущие данному ТП;

*достаточное*

$$X_{min} \leq X \leq X_{max}$$



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. 5.3.1. 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. 5.3.1).

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: 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.



Рис. 5.3.2. Гистограмма и полигон распределения параметров

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. Затем строится гистограмма и полигон распределения параметров (рис. 5.3.2). 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:

$$N$$

$$L_{cp} = L_1 + L_2 + L_N / N = 1/N \times \sum_{i=1} L_i$$

где  $L_1 + L_2 + L_N$  - размеры отдельных деталей;  $N$  - общее количество деталей в партии.

Среднее квадратичное отклонение определяется выражением

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{(L_1 - L_{cp})^2 + (L_2 - L_{cp})^2 + \dots + (L_N - L_{cp})^2}{N}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}, \end{aligned}$$

где  $x_i = L_i - L_{cp}$ .

При вычислении значения  $L_{cp}$  и  $\delta$  в случаях большого числа размеров и партии удобнее группировать детали по интервалам размеров и проводить расчет по выражениям

$$L_{cp} = \frac{L_1 n_1 + L_2 n_2 + \dots + L_k n_k}{N}; \quad \sigma = \sqrt{\frac{x_1^2 n_1 + x_2^2 n_2 + \dots + x_k^2 n_k}{N}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k x_i^2 n_i},$$

где  $k$  — число интервалов;  $L_1, L_2, \dots, L_k$  — размеры, соответствующие каждому интервалу;  $n_1, n_2, \dots, n_k$  — количество деталей в каждом интервале;

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  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$  — ошибка в долях  $\sigma$

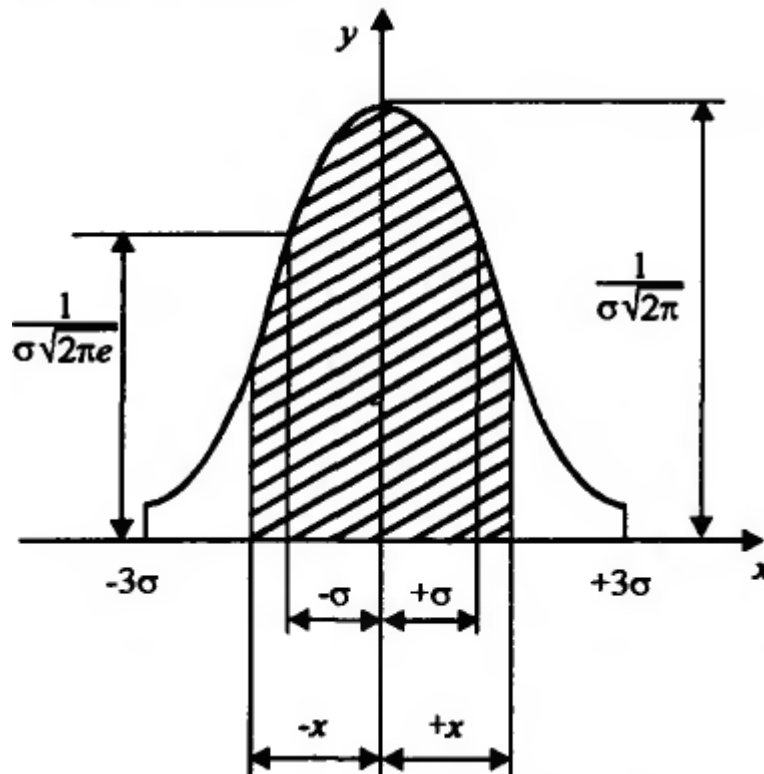


Рис. 5.3.3 Кривая распределения Гаусса в координатах с началом в центре группирования

Из этих же выражений можно определить  $N$ , удовлетворяющее заданной точности.

Уравнение распределения Гаусса (рис. 5.3.3) 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  $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение аргумента;  $e$  - основание натуральных логарифмов.

В зависимости от значения  $\sigma$  форма кривой нормального распределения меняется. Чем меньше  $\sigma$ , тем уже кривая и поле рассеивания меньше; чем больше  $\sigma$ , 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  $\pm 3\sigma$  она почти сливается с осью абсцисс, то с достаточной для практики точностью теоретическую кривую заменяют кривой с полем рассеивания:

$$V = \pm 3\sigma = \pm 6\sigma = L_{max} - L_{max}.$$

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  $\delta$ .

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  $\Phi(z)$ , 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  $\Phi(z)$ , называемая *интегралом вероятностей Лапласа*, для различных  $z$  приводится в справочной литературе.

Так как вся площадь, ограниченная кривой, равна единице, то значение  $\Phi(z)$  определяет вероятность получения размера в пределах  $\pm x$ . При симметричном расположении поля допуска относительно поля рассеивания процент брака  $P$  можно определить по формуле:

$$P = [1 - \Phi(z)] \times 100\%$$

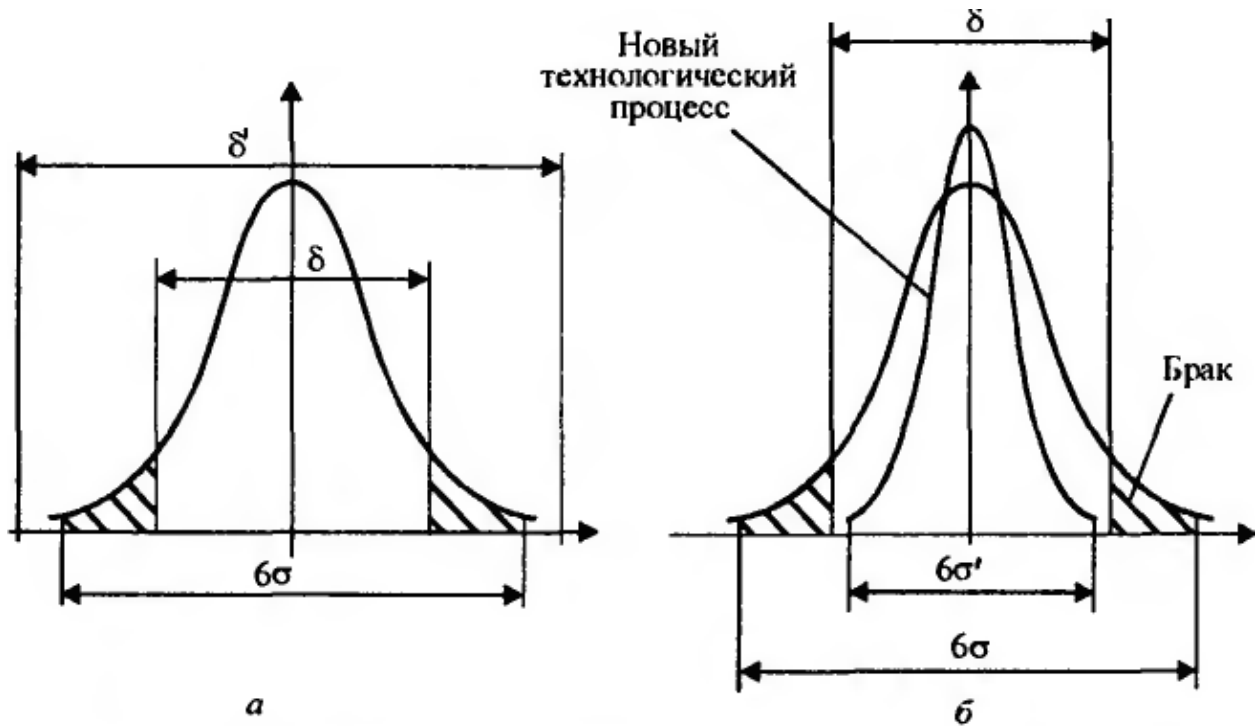


Рис. 5.3.4. Обеспечение работы без брака:

*a* — увеличением поля допуска; *б* — улучшением качества техпроцесса

Чтобы не было брака, следует либо увеличить допуск  $\delta$ , чтобы  $\delta' > \delta$  (рис. 5.3.4., *a*), либо изменить ТП и уменьшить разброс погрешностей  $6\sigma'$  (рис. 5.3.4., *б*).

Если имеет место систематическая постоянная погрешность, скажем, настройки оборудования Дн, то форма кривой распределения не меняется, а происходит ее смещение на величину данной погрешности (рис. 5.3.5., *a*). Если смешать две партии деталей, изготовленных при различных настройках оборудования, кривая распределения будет иметь вид, представленный на рис. 5.3.5., *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. 5.3.5., *в*.

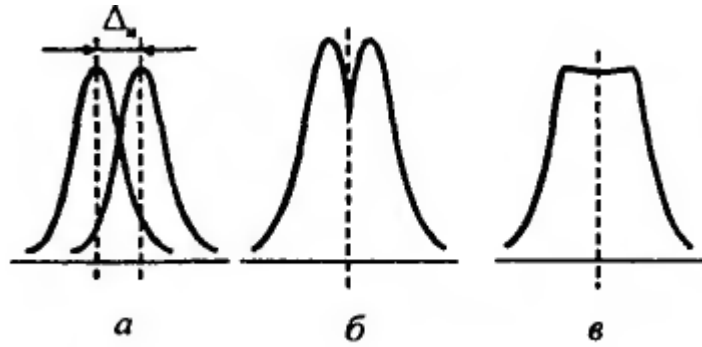


Рис. 5.3.5. Виды кривых распределения  
 $a$  – смещение кривой после поднастройки оборудования;  $b$  – случай смещения двух партий оборудования;  $в$  – вариант

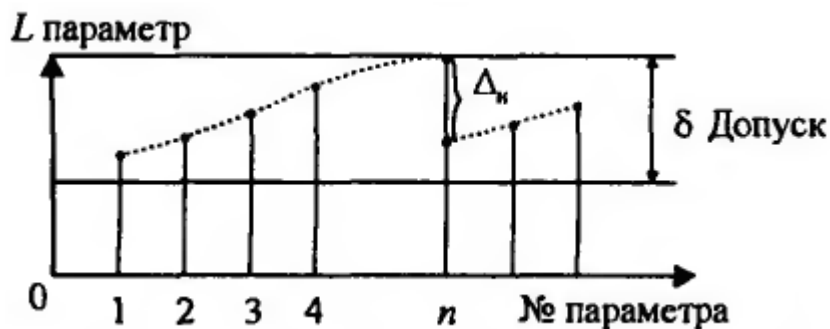


Рис. 5.3.6. Пример построения точечной диаграммы

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 удастся. Если это требуется и необходима большая наглядность в динамике погрешностей, используются *точечные диаграммы* (рис. 5.3.6.). 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. 5.3.7.).

Получаем диаграмму статистического контроля, которая дает возможность работать без брака, так как время появления параметров, выходя-

щих за контрольную зону  $A$ , видно по диаграмме. Контрольная зона  $A$  меньше поля допуска из-за малой величины выборки для определения сред-

ба него значения параметра на величину  $\frac{6\sigma}{\sqrt{m}}$  поля рассеивания средне групповых значений параметров, где  $m$  - величина выборки ( $m = 5 - 10$ ). Точностные диаграммы (рис. 5.3.8) - это дальнейшее развитие точечных диаграмм, которые дают более точную картину изменения погрешностей во времени и выявить закономерность изменения переменных систематических погрешностей.

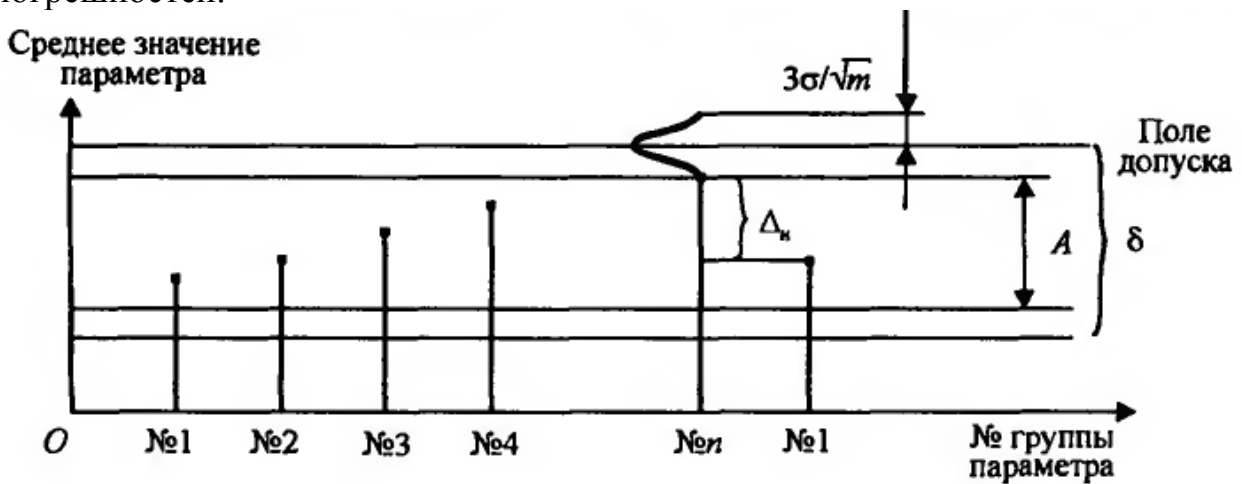


Рис. 5.3.7. Пример построения диаграммы статистического контроля параметра.

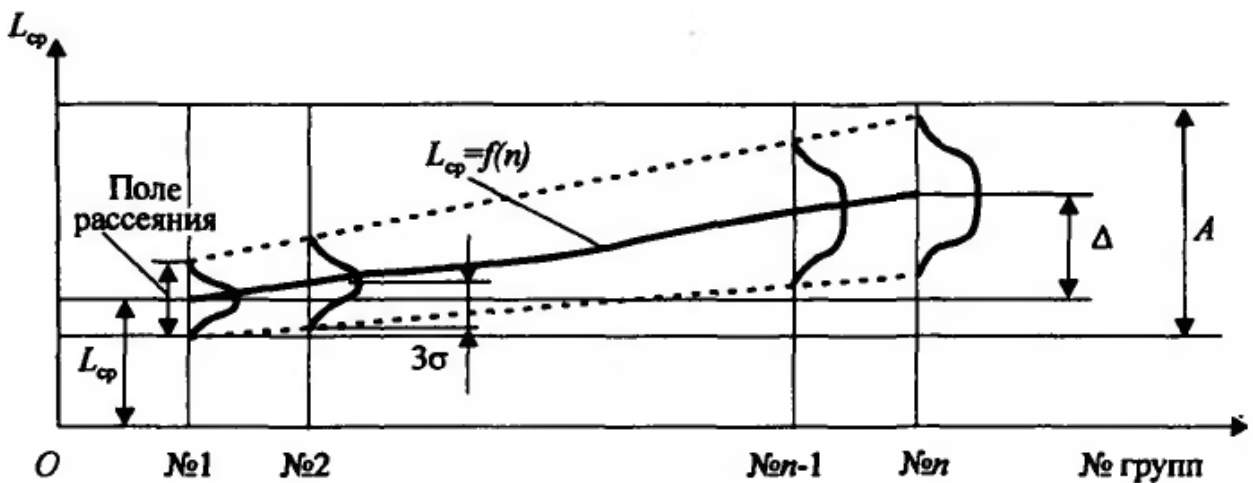


Рис. 5.3.8 Пример построения точностной диаграммы

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 распределе-



ния, 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,  $L_{cp} = f(n)$  – 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  $R \pm 5\%$ .

На намоточном станке после намотки  $W$  витков замеряют сопротивление, и, допустим, получили сопротивление больше указанного, тогда отмачисло  $n$  витков и снова замеряют сопротивление, и так продолжается до тех пор, пока не получают 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 ( $L_n$ ).

На рис. 5.3.9 приведен пример получения размера  $L_{\delta}$  автоматическим методом при шлифовании подложки. Необходимо определить величину настроечного параметра  $L_n$ .

Если принять за настроечный размер  $L_{min}$  (рис. 5.3.9), то при обработке партии деталей часть деталей, равная по количеству  $3\delta$ , уйдет в брак (заштрихованная часть). Следовательно, минимальный настроечный размер необходимо увеличить на  $3\delta$ :

$$L'_{n \min} = L_{\min} + 3\delta$$

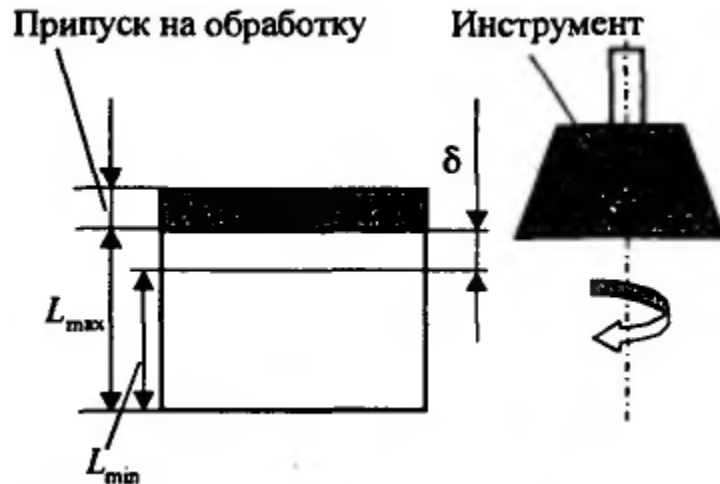


Рис. 5.3.9. Пример получения размера  $L$  автоматическим методом

Аналогично для определения максимальной границы настроечного размера будем иметь (рис. 5.3.10)  $V_{umax} = L_{max} - 3\delta$ . В этом случае допуск находится

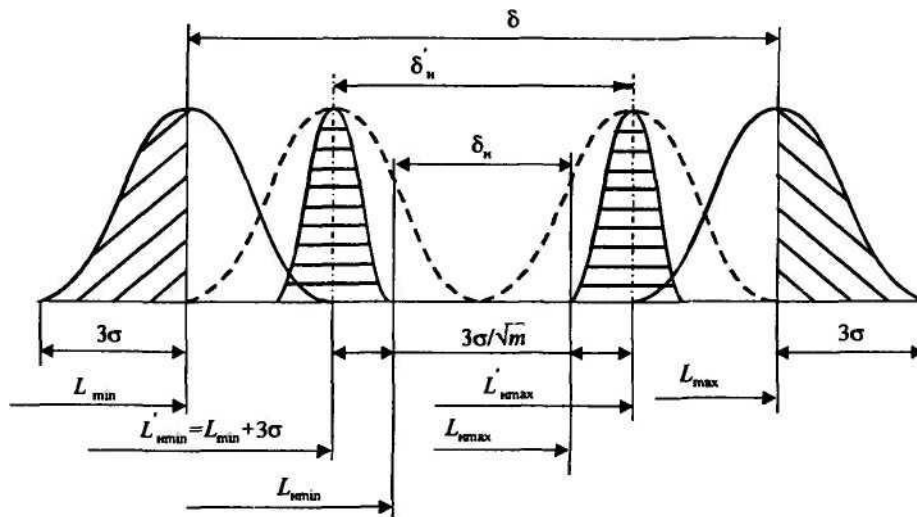


Рис. 5.3.10. К расчету настроечного размера

автоматически без участия рабочего, т. е. существует АСУ, обеспечивающая ведение ТП без брака. Такие системы удерживают ТП в определенном допуске, обеспечивая управляемый ТП.

**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. 5.3.11), 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. 5.3.11  $H$  — 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 слоя; химические явления, которые имеют место в зоне обработки: окисление, образование других химических соединений.

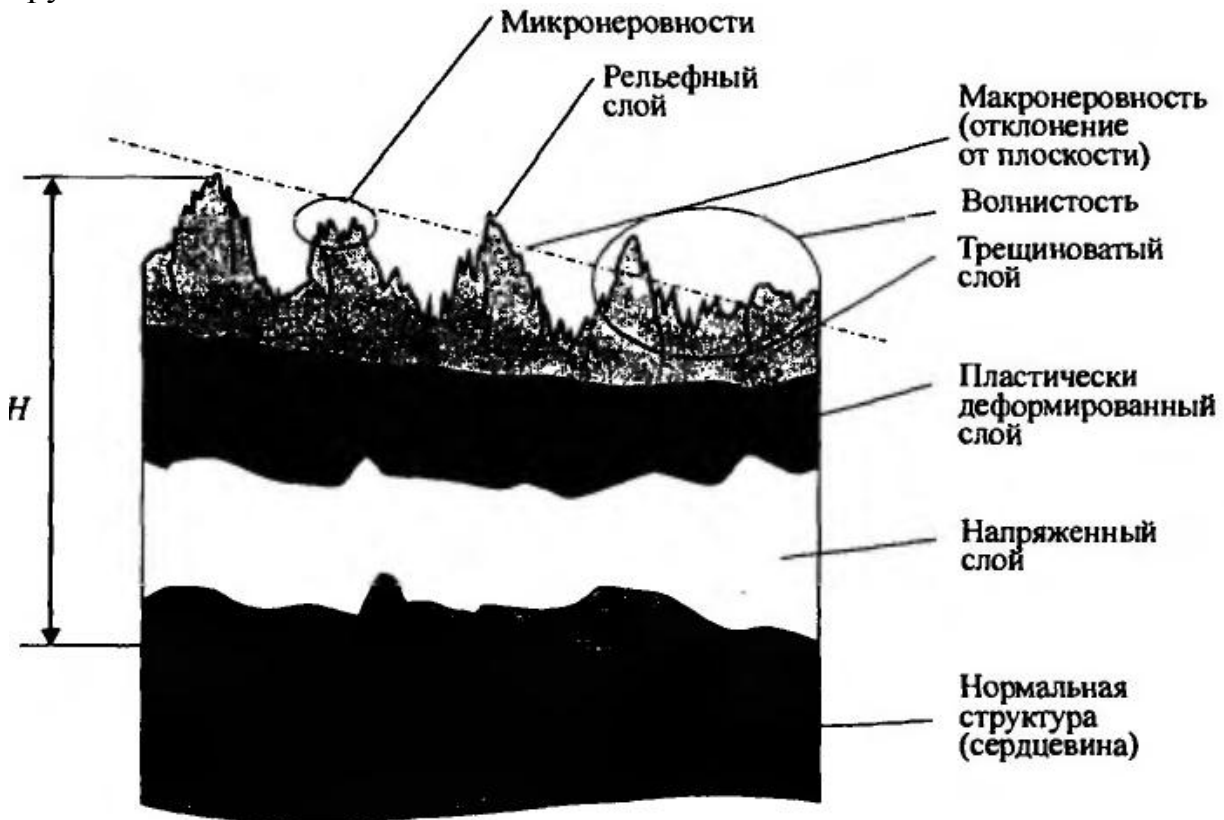


Рис. 5.3.11. Схема сечения детали после обработки

На поверхности после обработки образуется более прочный наклепаный 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. 5.3.11). 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,  $\sqrt{1,25}/(Ra = 1,25 \text{ мкм})$ ,

$Rz$  - с символом, например,  $Rz \ 3,2 \ \sqrt{\quad} \ (Rz = 3,2 \text{ мкм})$ .

Припуск  $\Delta$  на обработку — это слой материала, подлежащий удалению в процессе обработки (рис. 5.3.12). 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. Если припуск  $\Delta$  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 большим, чтобы 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  $\Delta$  равен сумме промежуточных припусков.

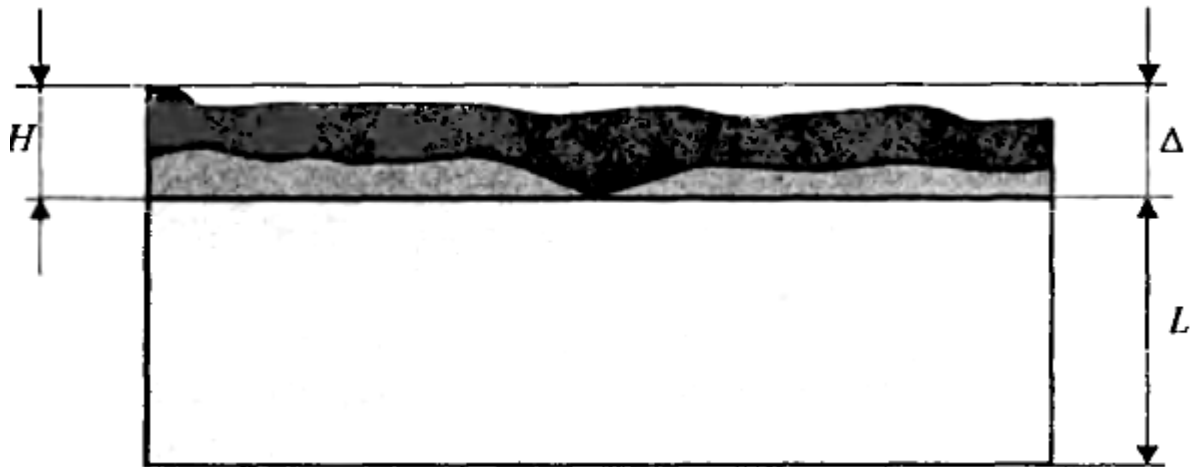


Рис. 5.3.12. Припуск на обработку детали  $\Delta$

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.

**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.):

$$Q = 1/T$$

Если, например, одна РЭА выпускается за 30 мин, то за 1 ч будет выпущено  $Q = 1/0.5$  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:

$$T_{шт} = t_o + t_g + t_{орг} + t_{тех} + t_{пер}$$

где  $t_o$  — время основное, время, затрачиваемое непосредственно на формообразование детали (деформирование, удаление стружки, нанесение материала, сборку, монтаж);  $t_g$  — 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 «О» на приборах; выключение оборудования и его уборку и т. п.;  $t_{\text{пер}}$  — время перерывов в работе, применительно к поточно-конвейерному производству.

Время, затрачиваемое на выполнение операции, называется *операционным временем*:

$$t_{\text{оп}} = t_o + t_g$$

Время на обслуживание рабочего места:

$$t_{\text{обс}} = t_{\text{оп2}} + t_{\text{мех}}$$

Ориентировочно можно считать  $t_{\text{обс}} = 0,2 t_{\text{оп}}$

Более точные значения составляющих  $T_m$  приводятся в справочной литературе по нормированию работ в приборостроении.

Расчет основного времени поясним на примере определения  $t_o$  при сверлении отверстия 0,1 мм в пакете печатных плат толщиной 3 мм (рис. 5.3.13).

Полная глубина сверления с учетом подхода  $\Delta_1$  к плате и выходу сверла  $\Delta_2$  из пакета составит:

$$L = \Delta_1 + l + \Delta_2$$

Обычно зазор  $\Delta$  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 глубины расстояния при подаче 5 = 0,05 мм/об и скорости резания  $V = 50$  м/мин составит

$$t_o = \frac{L \cdot \pi \cdot d}{S \cdot V \cdot 1000} = \frac{3,6 \cdot 3,14 \cdot 3}{0,05 \cdot 50000} \cong 0,014 \text{ мин.}$$

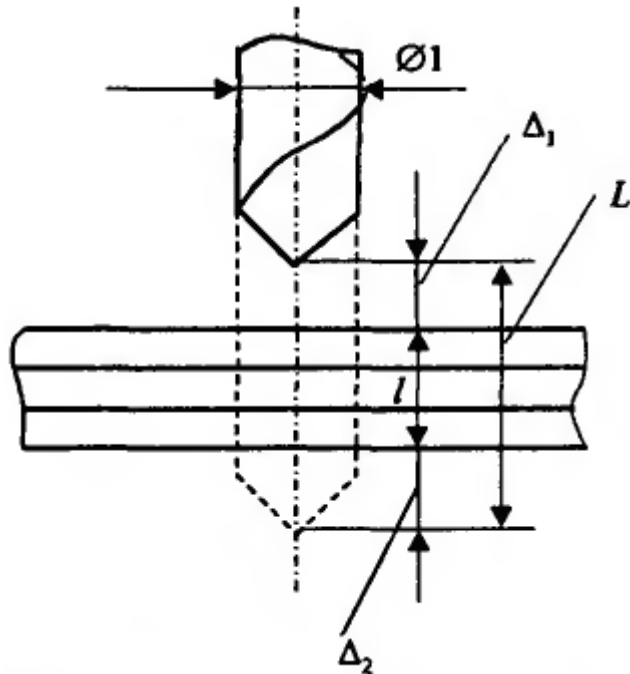


Рис. 5.3.13. Схема расчета глубины сверления

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  $t_o = 60/100 = 0.6$  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  $T_{пз}$ . При этом штучное калькуляционное время определится как:

$$T_{штк} = T_{шт} + (T_{пз}/N)$$

где  $T_{штк}$  – время штучное калькуляционное;  $N$  - количество изделий в партии.

Для автоматического оборудования время одной операции определяется по формуле:

$$T_u = t_{p.x} + t_{x.x}$$

где  $T_{ц}$  – время цикла автомата на одну операцию;  $t_{р.х}$  – время на выполнение рабочих ходов, аналог  $t_0$ ,  $t_{х.х}$  – 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:

$$T_{шт.к} = t_0 + t_в + t_{орг} + t_{мех} + t_{пер} + (T_{н.э} / N)$$

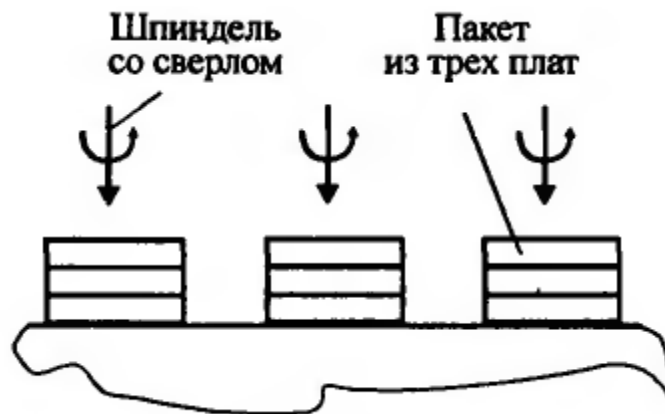


Рис. 5.3.14. Параллельная обработка печатных плат несколькими параллельными инструментами

Если бы  $T_{шт.к} = t_0$ , это было бы идеальное производство. В нем нет непроизводительных затрат.

Для уменьшения  $t_0$  применяют параллельную обработку. Например, многошпиндельное сверление печатных плат, одновременное сверление не одной, а нескольких плат в пакете (рис. 5.3.14).

При пайке погружением печатных плат сразу все соединения подвергаются пайке.

Для уменьшения  $t_в$  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 комплектами 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  $T_{\text{п.э}}$  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.

**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:

$$A = C_m + C_z + C_{н.р}$$

где  $C_m$  — затраты на материал;  $C_z$  — затраты на зарплату основных рабочих;  $C_{н.р}$  — накладные расходы на электроэнергию, воду, ремонт и т. п.:

$$C_m = mq - m_0q_0$$

где  $m$  — норма расхода материала на изделие (кг, м,  $\text{дм}^2$ );  $q$  — стоимость единицы материала;  $m_0$  — утилизированный остаток материала, руб;  $q_0$  — стоимость единицы утилизованного остатка материала;

$$C_3 = \sum_{i=1}^n \frac{T_{i,шт} \cdot l_i}{60} \left( 1 + \frac{12}{100} \right),$$

где  $T_{i,шт}$  – норм штучного времени на операцию, мин;  $l_i$  - тарифная ставка рабочего в единицу времени;  $C_{н,р}$  - накладные расходы, ориентировочно берется от зарплаты основных рабочих и составляет 70..300 %;

$$B = C_n + C_o$$

где  $C_n$  - зарплата наладчиков оборудования руб;  $C_o$  — стоимость запускаемого оборудования (оснастки) для производства новой серии (партии) изделий, руб:

$$C_n = T_n \times l_n ( 1 + 12/100 )$$

где  $T_n$  — время наладки оборудования, мин;  $l_n$  — тарифная ставка наладчика в единицу времени.

#### 5.4. 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. 5.4.1 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:

$$N = \frac{B_2 - B_1}{A_1 - A_2}.$$

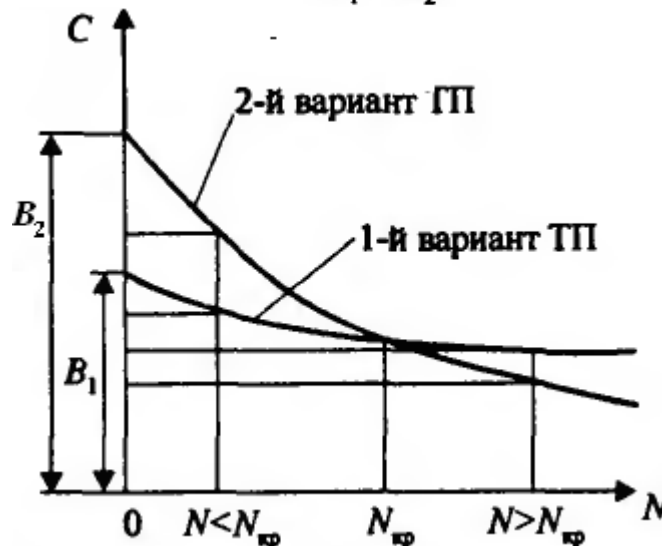


Рис. 5.4.1. График выбора экономического ТП по себестоимости

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.

Особенности технологии изготовления БНК из листовых материалов. Высокие требования, предъявляемые к БНК по качеству изготовления, климатическим, механическим воздействиям, спецстойкости, также технической эстетике, эргономике и безопасности ставят сложные задачи перед изготовителем этих изделий. У первых БНК значительное количество видов и методов обработки, применяемых материалов существенно усложняли и удорожали подготовку производства и производство изделий, снижали технологичность изделия. Для проведения технологических операций штамповки, гибки, сборки требовалось большое количество дорогостоящей специализированной

оснастки, инструмента и приспособлений. В конце 70-х годов была предпринята попытка решить эти проблемы путем применения в БНК пресованных алюминиевых каркасообразующих профилей. При существовавшей в то время низкой цене на алюминий, данное решение явилось прорывом в производстве БНК.

В настоящее время при резком повышении цен на цветные металлы и появлении на рынке высокопроизводительного оборудования, ранее применяемые технологии стали нерентабельными. Так, например, себестоимость БНК 3 (шкафа) на основе алюминиевых профилей в 1,5-2 раза выше, чем у аналогичного конструктива из листовой стали. Таким образом, традиционные технологии имеют ряд недостатков – сравнительно высокую стоимость оснастки, значительные расходы на подготовку производства. Основными путями решения этих проблем являются:

- специализация оборудования;
- унификация оснастки;
- внедрение современных технологий и методов обработки материалов;
- освоение и применение новых материалов.

Кардинальным стало решение провести технологическое перевооружение и реконструкцию производства, приобрести автоматизированное, высокопроизводительное оборудование японской фирмы *Amada*:

- координатно-револьверный пресс с ЧПУ модель «*Europe*» 245/27 (рис.5.4.2),

- листогибочный пресс с ЧПУ модель *HFE* 80-25 (рис.5.4.3);

- гильотинные ножницы с гидравлическим приводом *GS-630* (рис.5.4.4).

Это позволит увеличить мощности и технологические возможности производства, повысить качество, снизить трудоемкость изготовления, поднять профессиональный уровень технического персонала предприятия и внедрить новые и прогрессивные технологии.

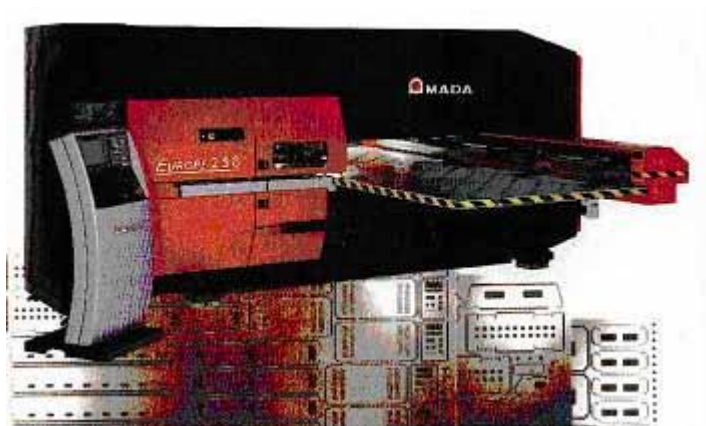


Рис. 5.4.2. Координатно-револьверного пресс (КРП) с ЧПУ модель «*Europe*» 245/27

*При изготовлении деталей (их разверток или заготовок) на координат-*

но-револьверном прессе выполняются следующие операции:

- штамповка;
- вырубка;
- формовка.

Внешний и внутренний контур детали или заготовки из листового материала обрабатывается на КРП с использованием операций штамповки и/или вырубки. Отверстия (круглые, овальные, квадратные, прямоугольные) соответствующие размеру пуансонов обрабатываются за один удар пресса. Отверстия не соответствующие размеру пуансонов и пазы (прямоугольные, скругленные, наклонные, дуговые) обрабатываются операцией вырубки за несколько ударов пресса. Контур детали образуется из отверстий, при ударах пресса пуансонами различной формы.

Существует возможность штамповки пуансонами специальной формы, что позволяет за один удар получить сложное отверстие. Операция формовки позволяет за один или несколько ударов пресса получить различные пуклевки (под резьбу или для ориентации деталей), разбортовки, отбортовки, зенковки, жалюзи (вентиляционные отверстия) и т.д.



Рис. 5.4.3. Листогибочный пресс *HFE 80-25*.



Рис. 5.4.4. Гидравлические гильотинные ножницы *GS-630*.

*Современное оборудование позволяет упростить технологический процесс:*

- при малом количестве операций получить детали сложной формы;
- повысить производительность и точность изготовления, обеспечив вза-

имозаменяемость деталей;

- реализовать многообразие конструктивных форм и размеров деталей;
- легко адаптировать оборудование к различным масштабам производства;

ния;

- полностью или почти полностью автоматизировать процесс изготовления;

- снизить трудоемкость заготовительных операций;
- повысить качество сборочных операций;
- сократить затраты на оснастку.

Структура технологии создания управляющих программ для станков с ЧПУ.

*Технология создания управляющих программ для станков с ЧПУ состоит из следующих этапов:*

- получение КД от разработчика, из архива или от стороннего заказчика;
- анализ возможности изготовления и контроль КД на технологичность;
- уточнение и корректировка КД при необходимости;
- подготовка разверток и геометрии деталей;
- подготовка технологии и подпрограмм;
- генерация управляющих программ;
- ввод управляющих программ в станки и отладка программ и режимов.

### **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.

## Заключение

Внедрение РЭА 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 РЭА 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.

Таблица 3.1

### Прогноз развития микроэлектронных технологий

Характеристика микроэлектронной технологии	Годы					
	1999	2001	2003	2006	2009	2012
Минимальный размер топологии,	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 <sup>2</sup>	400	450	560	790	1120	1560
Размер кристалла МП, мм <sup>2</sup>	340	380	430	520	620	750
Размер кристалла СПИС, мм <sup>2</sup>	800	850	900	1000	1100	1300

*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 взаимодействию, плотности компоновки ЭА в целом. Это ставит перед конструкторами и технологами качественно новые задачи по обеспечению надежной работы РЭА 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 РЭА, в том числе конструкторов и технологов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учеб. для вузов / К. И. Билибин, А. И. Власов, Л. В. Журавлева и др.; ред. В. А. Шахнов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.
2. Сарафанов, А. В. Основы проектирования электронных средств: Техническое задание. Формирование и анализ: учеб. пособие / А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов; Краснояр. гос. техн. ун-т. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – 140 с.
3. Кофанов, Ю. Н. Автоматизация проектирования РЭС. Топологическое проектирование печатных плат: учеб. пособие / Ю. Н. Кофанов, А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2001. – 220 с.
4. Пирогова, Е. В. Проектирование и технология печатных плат: учеб. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. – 560 с. (Высшее образование)
5. Ненашев, А. П. Конструирование радиоэлектронных средств: учеб. для радиотехнич. спец. вузов / А. П. Ненашев. – М.: Высш. шк., 1990. – 432 с.
6. Князев, А. Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л. Н. Кечнев, Б. В. Петров. – М.: Радио и связь, 1989. – 222 с.
7. Алдонин, Г. М. Радиоконструктору о дизайне / Г. М. Алдонин, И. Р. Аринкин. Красноярский политехнический ин-т. – Красноярск: 1991. – 116 с.