

1 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭС

1.1 Основные понятия и определения

Электронное средство (ЭС) – техническая система (техническое средство), в основу функционирования которой положены принципы радиотехники и электроники.

Из определения следует, что ЭС является одной из разновидностей технических систем (ТС).

Техническая система – наиболее общее понятие в технике.

Определение: **ТС** – система, искусственно созданная человеком для удовлетворения его потребностей, хотя бы некоторые элементы которой представляют собой материальные предметы. Это могут быть и очень простые и очень сложные предметы.

На практике широко используются термины «разработка», «конструирование», «проектирование». Дадим понятия этих терминов.

Разработка – процесс всестороннего исследования исходных условий и решения научных и технических задач, направленных на достижение заданных результатов (*общее определение*).

Разрабатываются: промышленная продукция, конструкторские документы, стандарты, технологические процессы, законы и т. д.

Разработка технических систем, к которым относится и ЭС, содержит:

- 1) исследование потребности в ТС;
- 2) определение потребительских и производственных характеристик;
- 3) разработку конструкции и конструкторской документации, необходимой для организации промышленного производства;
- 4) разработку и изготовление моделей, макетов, экспериментальных и опытных образцов, экспериментальную проверку конструктивных решений ТС.

Конструирование ТС – часть разработки ТС, включающая в себя решение задач под номерами 1, 2, 3.

В отличие от разработки ТС конструирование ТС не включает в себя работы, непосредственно связанные с изготовлением и испытаниями ТС.

Проектирование ТС – начальная фаза конструирования ТС, включающая в себя решение задач под номерами 1, 2, а также разработку конструкции и проектной КД на техническую систему.

Проектирование (в узком значении) – первая наиболее творческая и ответственная фаза конструирования.

Схема взаимосвязей между терминами, обозначающими основные процессы конструирования, представлена на рисунке 1.1 (РМ1.1).

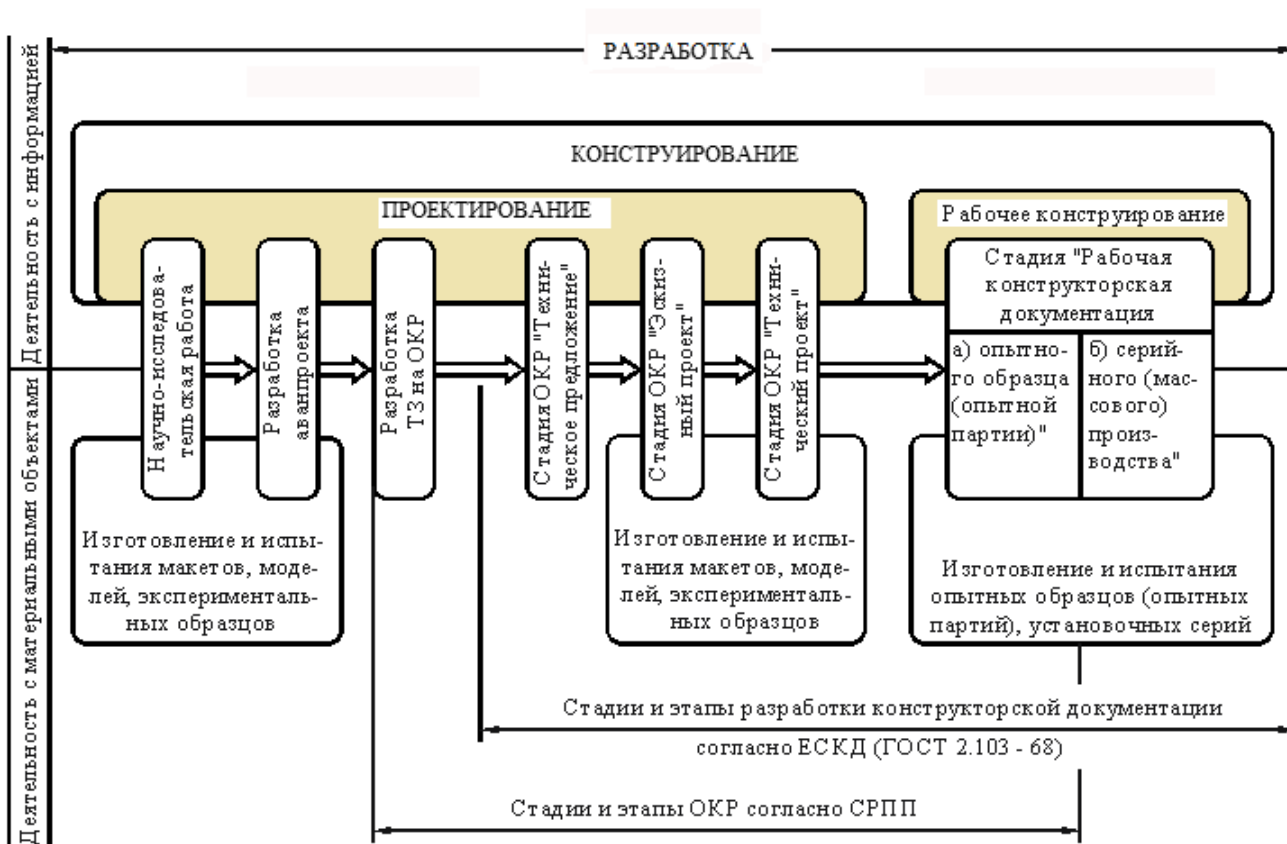


Рисунок 1.1 – Схема взаимосвязей между терминами, стадиями и этапами разработки ТС

В конструировании проект – это нечто предварительное, требующее рассмотрения и согласования со всеми участниками разработки (заказчиком, исполнителем, изготовителем и др.). Поэтому логично проектирование рассматривать как часть конструирования. На основании проектов выполняется второй вид КД – рабочая конструкторская документация.

Технические решения, принятые при проектировании, обеспечивают основные характеристики новой ТС. При качественном выполнении проектирования дальнейшее конструирование представляет собой менее творческий (по сравнению с проектированием) процесс разработки рабочей КД, который для относительно несложных изделий практически сводится к рутинному детализированию.

Каждая Т-система характеризуется конструкцией. Её определение, составленное на основе ГОСТ 14.004 - 74, формулируется следующим образом.

♠ **Конструкция Т-системы** – система заранее (до изготовления самой ТС) продуманных свойств ТС, характеризующая состав, назначение, взаимное расположение, форму, размеры, материалы и взаимосвязи ее элементов.

Конструкция по существу представляет собой созданную до изготовления ТС идеальную (т.е. мысленную, не материальную) ее модель. Знаковая форма этой модели, отраженная в КД, служит средством передачи информации о характеристиках ТС от ее разработчиков к ее изготовителям и эксплуатационникам.

Конструкция состоит из конструктивных решений.

♠ **Конструктивное решение** – любой элемент конструкции.

К конструктивным решениям должны относиться не сами материальные части (винты, панели, платы и др.), а свойства этих частей: форма детали, состав сборочной единицы, способ соединения двух деталей, материалы деталей и т. д. Например, вместо термина «несущая конструкция» для обозначения соответствующего понятия можно применять его эквивалент – «несущая система» (или «несущее средство»).

Частный случай Т-системы – **изделие**. Согласно ЕСКД изделием называется любой предмет или набор предметов производства данного предприятия.

Виды изделий (ГОСТ 2.101-68) приведены на рис. 1.2.

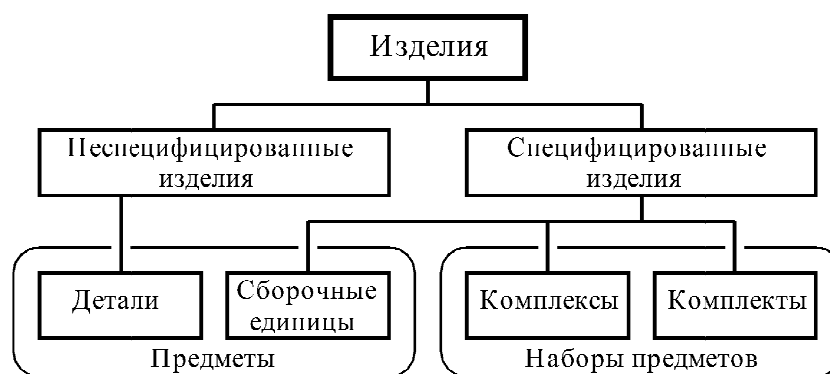


Рис. 1.2 – Виды изделий

Деталь – это единое изделие из однородного материала без применения сборочных операций.

Сборочная единица – это изделие из составных частей, соединенных между собой на предприятии сборочными операциями (свинчиванием, сваркой, пайкой и др.), например, плата с навесными элементами.

Комплекс – это два или более изделий, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций. В комплекс, кроме сборочных единиц, выполняющих основные функции, могут входить детали, сборочные единицы и комплекты, используемые для вспомогательных операций (монтаж, измерения и др.).

Комплект – это два или более изделий, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и имеющих общее эксплуатационное значение вспомогательного характера, например, комплект ЗИП, комплект инструмента, программатор для перезаписи программ в ПЗУ и др.

Электронные средства отличаются рядом особенностей, выделяющих их в отдельный класс среди других ТС:

1. Иерархическая структура, под которой подразумевается последовательное объединение более простых электронных узлов в более сложные узлы.

Иерархическая структура – один из видов структур сложных систем (видов структур всего 6). Отличается высокой устойчивостью, поэтому именно она используется для построения систем власти любых государств.

2. Наличие электрических, электромагнитных, магнитных связей и, в ряде случаев, оптических внешних и внутренних связей.

3. Наличие тепловых связей, что требует принятия мер защиты термочувствительных элементов.

4. Слабая связь внутренней структуры изделий с её внешним оформлением.

1.2 Иерархия конструкций ЭС

Конструкторская иерархия ЭС реализуется с помощью уровней разукрупнения, габаритные и присоединительные размеры которых стандартизованы. Типовая структура конструкции современного ЭС состоит из элементной базы и трех уровней разукрупнения (рисунок 1.3).

♠ Устройства, которые являются, не только конструктивно, но функционально законченными ЭС называются *модулями*.

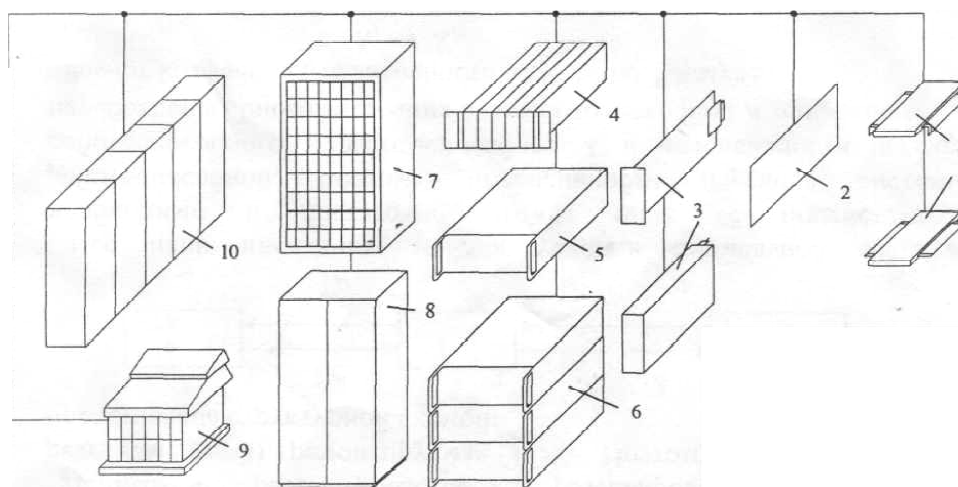


Рис. 1.3 – Схема унифицированной системы БНК РЭС различного назначения:
/ — изделие электронной техники; 2 — печатная плата; 3 — блок; 4 — вставной каркас с блоками; 5 — прибор; 6 — комплект приборов; 7 — стойка; 8 — шкаф; 9 — пульт; 10 — секция стоек

Радиоэлектронный модуль третьего уровня (РЭМ 3) представляет собой функционально законченное устройство, выполненное в виде шкафа, стойки или пульта **на основе базовой несущей конструкции** третьего уровня.

♠ Несущей конструкцией (НК) называют механическую основу для закрепления частей конструкции (несущую на себе эти части).

Современная система НК ЭС унифицирована и предусматривает последовательную входимость конструкций низших уровней в конструкции высших уровней, что обеспечивается требованиями размерной совместимости. Базовыми несущими конструкциями третьего уровня являются кожухи, каркасы, монтажные рамы, корпуса шкафов, стоек, панели и корпуса пультов.

Монтажной рамой называют несущую конструкцию открытого типа, содержащую элементы для электрического соединения и предназначенную для размещения нескольких элементов.

Стойка - монтажное устройство открытого типа для размещения блоков в несколько рядов, в котором в качестве несущей конструкции применена общая, вертикально расположенная рама.

Стеллаж в отличие от стойки предназначен для размещения блоков закрытого типа (приборов) в несколько рядов.

Шкаф подобен стойке, но является монтажным устройством закрытого типа и закрывается сплошной дверью.

Панель является частью пульта и служит для размещения органов управления, коммутации и индикации. Другой частью пульта является корпус – несущая конструкция, предназначенная для размещения средств отображения информации, органов управления и необходимых блоков, микроблоков, ячеек и ЭРЭ.

Модуль второго уровня (РЭМ 2) – это блок или рама. Блоком называют часть ЭС, которая выполняет сложную функцию, содержит несколько модулей первого уровня и имеет лицевую панель.

Модуль первого уровня (РЭМ 1) – функциональная ячейка (ФЯ) или печатный узел (ПУ).

Элементную базу относят к нулевому уровню (РЭМ 0).

Положительные стороны иерархии:

1) при разделении всей конструкции на отдельные конструктивно законченные части появляется возможность организовать одновременное изготовление отдельных частей и тем самым сократить длительность общего цикла изготовления;

2) возникает возможность разбраковки на уровне отдельных узлов;

3) облегчается доступ к отдельным частям конструкции и повышается ремонтпригодность.

Отрицательные стороны иерархии:

1) потеря плотности упаковки;

2) увеличение массы и габаритных размеров;

3) прибавка стоимости из-за необходимости выполнения дополнительных работ по сборке и монтажу.

1.3 Общие цели и задачи конструирования изделий

Задача конструктора любого изделия – создавать изделия, отвечающие требованиям заказчика, дающие наибольший экономический эффект и обладающие наиболее высокими технико-экономическими и эксплуатационными показателями.

При разработке изделия как говорится в крылатой фразе, конструктор должен: *"Смотреть вперед, оглядываться назад и озиаться по сторонам"*.

Имеется в виду:

Смотреть вперед – создавать изделие с учетом новейших достижений в данной области, чтобы оно достаточно длительное время оставалось востребованным и не уступало аналогам;

Оглядываться назад – новые продукты даже революционные по своим свойствам не могут появиться на пустом месте, они всегда создаются с учетом опыта предыдущих разработок;

Озираться по сторонам – имеется в виду необходимость учитывать достижения существующих и потенциальных конкурентов.

Конструктор в своей работе руководствуется определенными правилами. Эти правила формулируются с учетом:

- собственного опыта и знаний;
- опыта и знаний других;
- результатов научных исследований.

В конструировании, как и в других областях техники, существует "проблема правил", которую можно сформулировать следующим образом: "Чем больше вы их имеете, тем сложнее выполнить их все". Исходя из этого, для качественного выполнения любой разработки **необходима расстановка приоритетов**, отвечающая на вопрос: "Какие требования к разрабатываемому изделию наиболее важны, какие менее важны, а какие можно учитывать в последнюю очередь".

1.4 Жизненный цикл изделий

Жизненный цикл изделия – время от начала оформления идеи изделия до окончания физического существования последнего экземпляра этого изделия.

Основные этапы "жизни" изделий представлены на рисунке 1.5.

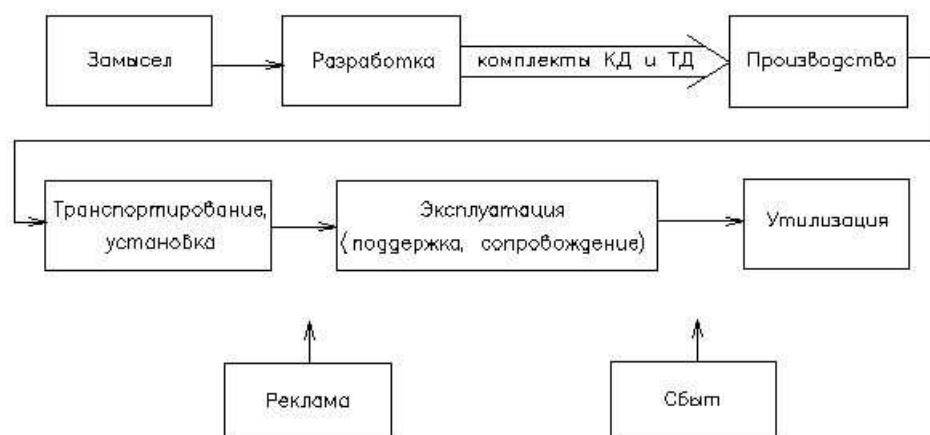


Рисунок 1.5 – Жизненный цикл изделия

1.5 Виды разработки изделий

Виды разработки изделий:

- разработка нового изделия;
- модернизация изделия;
- модифицирование изделия;
- совершенствование изделия.

Последние три вида разработки заключаются в ограниченном изменении структуры и (или) состава выпускаемых изделий, при котором сохраняется основная часть технической документации, и используются основные результаты выполненной разработки исходной продукции и постановки ее на производство.

Модернизация – создание продукции с улучшенными свойствами, при постановке на производство которой исходную продукцию считают устаревшей и снимают с производства на всех выпускающих ее предприятиях.

Модифицирование – создание продукции, однородной с исходной, но с другой областью применения. Продукцию, полученную в результате модифицирования, называют *модификацией*.

Пример. Самолет ТУ-204 первоначально создавался для перевозки пассажиров. Однако со временем на его базе был создан грузовой самолет – ТУ204С, который можно назвать модификацией самолета ТУ-204.

Совершенствование продукции – изменение продукции, повышающее эффективность ее производства или применения без существенного изменения основных показателей выпускаемой продукции.

Как правило, совершенствование продукции происходит систематически путем замены материалов и комплектующих, унификации составных частей, технологических процессов и средств производства, применения прогрессивной технологии, внедрения изобретений и рационализаторских предложений, устранения недостатков, выявившихся в процессе производства и эксплуатации.

Качественные признаки модернизации, модифицирования и совершенствования приведены в таблице 1.1 (в ней выделены главные признаки).

Таблица 1.1

Признак	Изменение признака при		
	модернизации	модифицирова- нии	совершенствова- нии
1. Область приме- нения	Сохраняется или расширяется	Изменяется	Сохраняется
2. Технический уро- вень	Повышается	Сохраняется	Сохраняется
3. Производство ис- ходной продукции	Прекращается	Продолжается	Продолжается с внесенными изменениями
4. Взаимозаменяе- мость основных со- ставных частей	Нарушается	Нарушается	Сохраняется
5. Технические ус- ловия	Заменяются	Дополняются	Остаются без из- менения
6. Оптовая цена	Может изме- няться	Может изменять- ся	Остается без изме- нения
7. Обозначение из- делия	Присваивает- ся новое	Присваивается новое	Остается без изме- нения

2 Организация процесса разработки ЭС

2.1 Участники процесса разработки и изготовления ЭС

Организации, участвующие в разработке ЭС, принято делить на *заказчика*, *исполнителя (разработчика)*, *созразработчика (субподрядчика)* (рисунок 2.1).

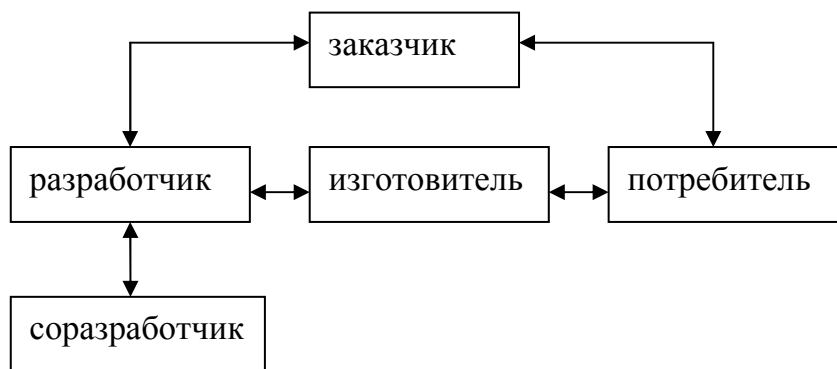


Рисунок 2.1 – Схема взаимодействия участников разработки

Заказчик разрабатывает технические требования (ТТ) к ЭС, осуществляет финансирование и приемку разработанного изделия.

Разработчик на основе ТТ разрабатывает техническое задание (ТЗ), в котором содержатся экономические, производственные и другие требования, определяется порядок разработки и приемки изделия. ТЗ – самый важный технический и юридический документ в разработке нового изделия.

Созразработчики решают для исполнителя частные задачи: разработку и поставку новых материалов, элементов, узлов, технологических процессов, методов измерений, проведение испытания, отработку на соответствие требованиям эргономики и т.д. Для каждой задачи составляют частное техническое задание (ЧТЗ).

В разработке ЭС в той или иной степени на разных стадиях участвуют различные подразделения предприятия:

- Основные – системотехнические, схемотехнические, конструкторские и технологические отделы;
- Вспомогательные – отделы надежности, патентные, автоматизированного проектирования и др.

Координация работы предприятий, подразделений и специалистов, участвующих в разработке проводится с помощью согласованных календарных планов или сетевых графиков

2.2 Стадии и этапы разработки изделий

Для уменьшения возможности принятия неправильных решений, совершения различного рода ошибок разработка ЭС проводят в несколько стадий и этапов.

Выделяют две основные стадии разработки: **НИР** (Научно-исследовательская работа) и **ОКР** (Опытно-конструкторская работа).

Основными для НИР являются следующие этапы:

- Патентный поиск;
- Разработка и согласование с заказчиком технического задания, государственная регистрация НИР;
- Подготовительный этап - выбор направлений исследования, разработка, согласование и утверждение частных технических заданий на основные части НИР;
- Основной этап - теоретические и экспериментальные исследования (выполнение теоретических изысканий, расчетов, математическое моделирование), обработка их результатов, составление и оформление технической документации;
- Заключительный этап - обобщение результатов и оценка выполненной НИР;
- Приемка НИР, обсуждение и согласование задания на проведение ОКР, государственный учет НИР.

Последовательность выполнения и содержание этапов ОКР регламентируется государственными стандартами ЕСКД («Единая система конструкторской документации») и СРПП («Система разработки и постановки продукции на производство»). Они приведены на рис. РМ1.1.

Техническое задание (ТЗ) составляется исполнителем на основе технических требований заказчика. На основе общего ТЗ могут быть составлены частные ТЗ для субподрядчиков. Объем экономических и производственных требований в них меньше, а технические требования, наоборот, расписаны более подробно.

Техническое предложение – этап разработки, на котором исполнителем обосновывается принципиальная возможность создания РЭС с заданными в ТЗ характеристиками, и намечаются основные технические и организационные решения по выполнению ТЗ, составляются частные ТЗ для различных подразделений предприятия. По результатам работы составляется технический отчет.

Эскизный проект – совокупность конструкторских документов, содержащих проработанные конструкторско-технологические решения, дающие общее представление об изделии, а также данные, определяющие возможность использования по назначению и основные параметры разрабатываемого изделия.

Технический проект – совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и технические данные для разработки рабочей документации. На этом этапе проводятся различные конструкторские расчеты и обоснования.

Этап «Рабочая конструкторская документация»

Последовательно разрабатывается конструкторская документация, предназначенная для изготовления и испытания опытного образца, установочной серии, серийного образца.

2.4 Методология анализа и синтеза конструкций

Творческую часть разработки изделия в общем виде можно разбить на два этапа:

- 1) Генерация возможных вариантов конструкции;
- 2) Анализ и оценка вариантов, выбор наилучшего среди них.

Генерация вариантов конструкции чаще всего осуществляется с помощью набора эвристических приемов, которые имеет каждый конструктор. На этом этапе наиболее полно проявляются интуиция, опыт и творческие способности конструктора, часто усиленные благодаря коллективному творчеству и использованию диалогового режима между человеком и ЭВМ.

В целях повышения эффективности этого этапа желательно:

- стимулировать процесс поиска новых вариантов;
- организовать учет вариантов и создать условия для их анализа.

Методы организации генерации:

- мозгового штурма;
- синектики;
- морфологический анализ и др.

В процессе генерации идей используются следующие принципы:

- ассоциаций;

- инверсии;
- аналогий;
- перевода системы и др.

Метод мозгового штурма, предложенный А.Осборном в 40-х годах прошлого столетия, исходит из того, что одни люди больше склонны к генерированию идей, а другие – к их критическому анализу. При обычных обсуждениях «генераторы» и «критики» оказываются вместе и мешают друг другу. Осборн впервые предложил разделить этапы генерации и анализа идей.

За 20-30 минут группа «генераторов» выдвигает несколько десятков идей. Главное правило – запрещена критика. После проведения штурма производится анализ идей и отбор наилучших группой «критиков».

Метод синектики, предложенный У.Гордоном в 1960 году, основан на идее мозгового штурма. Его отличия: во-первых, предусматривается широкое использование принципа аналогий, а, во-вторых, допускаются элементы критики.

Пример 1. Использование аналогии в протекании процессов в электрических и тепловых цепях для создания твердотельного выпрямителя переменного тока.

Пример 2. Использование аналогии с традиционным генератором электрической энергии с целью создания генератора для питания электронной схемы пушечного снаряда.

Принцип инверсии – метод получения нового решения путем отказа от традиционного решения. Новое решение является обычно диаметрально противоположным. В случае если речь идет о составных элементах объекта, то они обычно меняются местами.

Варианты инверсии:

- снаружи – внутри;
- вертикально – горизонтально;
- с лицевой стороны – с обратной стороны;
- симметрично – асимметрично;
- ведущее – ведомое и др.

Анализ варианта конструкции осуществляется следующими методами: логико-расчетным, моделированием, эвристическим.

Метод моделирования характеризуется тем, что анализ ведут не самих объектах, а на их моделях, чаще всего математических (иногда физических).

Логико-расчетные методы используют на завершающих этапах конструирования и основаны на использовании формализованных процессов, повторное применение которых дает сравнимые результаты (расчет надежности, прочности конструкции и др.).

Эвристический – примером может служить метод экспертных оценок.

3 Общие требования к конструкциям ЭС

3.1 Классификация ЭС

По области применения: средства связи, радиолокация, вычислительная техника, навигация, медицинская электроника и др.

По назначению согласно ГОСТ Р МЭК61191-1–2010, ГОСТ Р МЭК61192-1–2010 ЭС делятся на три класса.

Класс А: Электронные изделия общего назначения.

Включает товары широкого потребления, персональные компьютеры, и периферийные устройства, электронные модули и блоки, функционирующие в составе общих комплексов.

Класс В: Специализированная электронная аппаратура.

Включает коммуникационную аппаратуру, сложные вычислительные средства и электронную аппаратуру, для которых требуется высокое качество и длительный срок службы и для которых желательна, но не обязательна, бесперебойная эксплуатация. Эксплуатация в условиях внешних воздействий, определенных заказчиком, не должна приводить к отказам.

Класс С: Электронная аппаратура ответственного назначения.

Включает в себя все виды аппаратуры, для которых требования к надежности функционирования являются обязательными. Отказ аппаратуры недопустим, условия эксплуатации, заданные заказчиком, могут быть исключительно жесткими, аппаратура должна функционировать в любое время включения. К таким, например, относятся системы жизнеобеспечения или другие ответственные системы.

В зависимости от глобальной зоны использования (суша, океан, воздушное и космическое пространство) ЭС подразделяются на три класса (рис. 3.1). Внутри классов в зависимости от объекта установки ЭС делятся на группы. При этом учитывается назначение и тактика использования, требования к надежности, к защите от внешних воздействий и т.д.

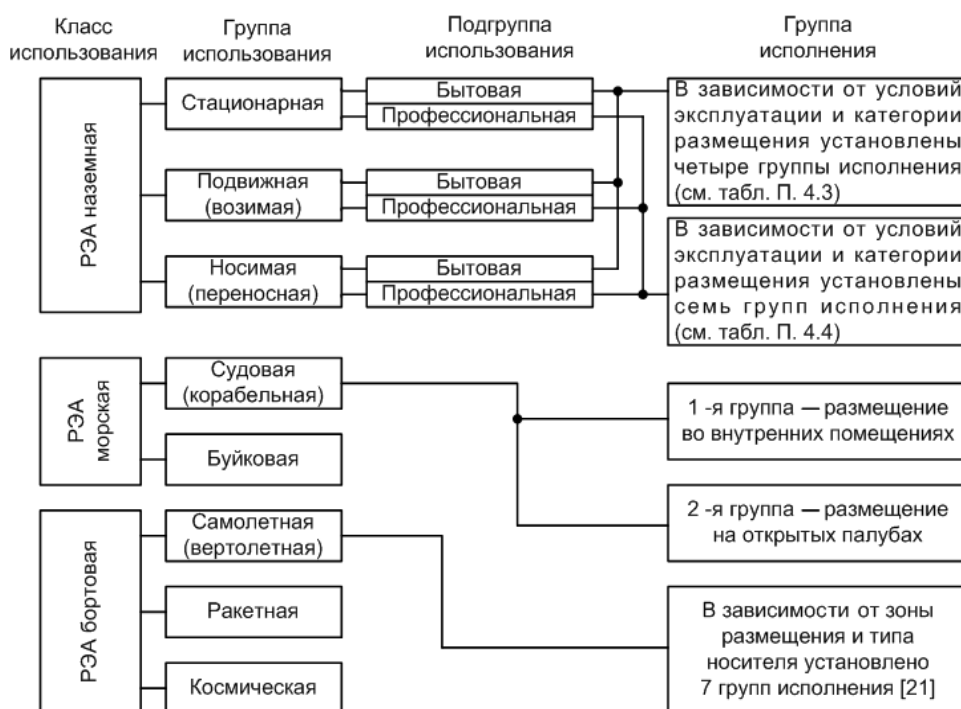


Рис. 3.1 – Классы и группы использования ЭС

В зависимости от требуемого уровня подготовки пользователя ЭС делят на две категории:

- *бытовые ЭС*;
- *профессиональные ЭС*.

Необходимо отметить, что наблюдается тенденция к исчезновению четких границ между областями использования этих категорий ЭС. Например, приемники системы навигации GPS раньше были доступны только военным и спецслужбам в США, а сейчас они во многих странах мира доступны рядовым гражданам. Кроме этого, параметры и функциональные возможности многих видов бытовой и профессиональной аппаратуры практически сравнялись.

В зависимости от диапазона рабочих частот устройства ЭС делят на следующие виды:

- низкочастотные (НЧ);
- высокочастотные (ВЧ);
- сверхвысокочастотные (СВЧ).

По режимам применения (функционирования) ЭС подразделяются на:

- изделия непрерывного длительного применения (радиомаяки, телевизионная и радиовещательная аппаратура, аппаратура сотовой связи, компьютерные серверы и др.);
- изделия многократного циклического применения (бытовая аппаратура и др.);
- изделия однократного применения (ракеты одноразового применения и др.).

По принципу действия ЭС подразделяют на *аналоговую, цифровую и цифроаналоговую*. Аналоговая и цифровая аппаратура использует соответственно схемотехнические принципы аналоговой и цифровой техники, цифроаналоговая – комбинацию этих принципов.

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

По элементной базе и структуре конструкции различают РЭС шести поколений.

По функциональной сложности ЭС подразделяют на: *радиотехнические системы, радиоэлектронные комплексы, блоки, функциональные узлы*.

Радиотехническая система – совокупность сигналов в пространстве, операторов и радиоэлектронной аппаратуры, размещённых на объектах в определённых точках на поверхности или в пространстве, действующих в условиях помех и внешних возмущений. Пример: система посадки самолётов.

Комплекс радиоэлектронных устройств – совокупность РЭУ, объединённых, как правило, на одном объекте и являющихся законченной частью системы. Пример: бортовой комплекс радиосвязи самолёта с землёй.

Радиоэлектронное устройство (РЭУ) – часть комплекса, решающая конкретную основную целевую функцию, функционально и конструктивно законченная и, главное, автономно эксплуатационная. Пример: TV-приёмник с антенной.

Блок – часть РЭУ, выполняющая частную целевую функцию, функционально законченная, но автономно не эксплуатационная. Блок может быть конст-

руктивно законченным или входить в устройство как часть конструкции. Пример: блок питания.

Субблок – часть блока, выполняющая функцию его отдельного тракта. Пример: субблок УПЧ приёмника.

Функциональный узел – единица функциональной сложности ЭС на уровне отдельного каскада электрической схемы.

3.2 Факторы, дестабилизирующие работу ЭС

Все внешние воздействующие факторы (ВВФ) определены в ГОСТ 26883 - 86. Основные из них представлены на рис. 3.2.

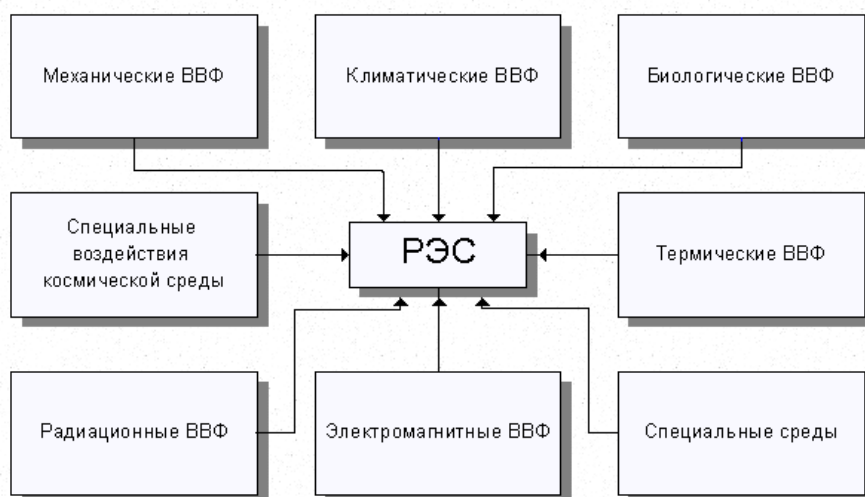


Рис. 3.2 – Основные группы ВВФ

Основные **климатические факторы**: температура, влажность, давление, пыль и песок.

Повышенная температура приводит к пересыханию защитных покрытий с деформацией или растрескиванием; миграции примесей в полупроводниках; изменению электрических характеристик; деформации сопрягаемых деталей с различными температурными коэффициентами расширения. Изменение размеров деталей происходит в соответствии с формулой

$$\Delta l = TKLP \cdot \Delta T \cdot L ,$$

где $TKLP$ - температурный коэффициент линейного расширения материала детали;

ΔT - величина изменения температуры;

L - размер детали.

Например, печатная плата с размерами 300×200 мм выполненная из стеклотекстолита ($TKLP = 7,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$) при изменении температуры на 85 град изменит длину примерно на 0,15 мм. Чтобы избежать термомеханических напряжений в ее конструкции суммарные зазоры в креплениях должны превышать эту величину. На практике зазоры обычно выбираются 0,3...0,5 мм.

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

Повышенная влажность - один из наиболее распространенных и опасных факторов для ЭС. При понижении температуры, когда достигается точка росы, происходит конденсация влаги на поверхностях изделия.

В молекуле воды атомы водорода и кислорода образуют равнобедренный треугольник. Длина связи $O-H$ равна 0,0957 нм – она может служить оценкой величины молекулы H_2O . Это очень маленький размер, поэтому молекула воды может проникать в практически любые поры и трещины.

Поскольку химические связи $O-H$ расположены под углом ($104,5^\circ$), молекула воды полярная (диполь). Кроме того, вода поляризуема. Эти свойства определяют поведение H_2O при взаимодействии с другими веществами.

Вода обладает очень большой диэлектрической проницаемостью $\epsilon \approx 78$.

С водой связаны понятия *гидрофильность* и *гидрофобность*.

Вода прекрасный растворитель для многих веществ и образует растворы электролитов, действие которых приводит к коррозии.

В целом негативное действие влаги приводит к снижению сопротивления изоляции между электрическими цепями, к возникновению коррозии, к усилению паразитных емкостных связей между проводниками.

Пониженное давление приводит к снижению пробивного напряжения, ухудшению теплоотдачи.

Воздействие пыли и песка в основном сводится к абразивному действию их частиц.

Тепловой удар (термический фактор) – воздействие резкого изменения температуры окружающей среды на изделие. Вызывает механические напряжения в местах пайки и подвижных соединениях; растрескивание металлических и неметаллических покрытий.

Биологические факторы – это воздействие плесени, микроорганизмов, насекомых, грызунов. Может приводить к разложению и уничтожению элементов конструкции из органических материалов.

Специальные среды. В атмосфере могут содержаться вещества, которые приводят к коррозии или к разрушению материалов, используемых в конструкциях ЭС. В таблице 3.1 приведены сведения о негативном влиянии на конструкции наиболее часто встречающихся в атмосфере хим. соединений.

Радиационные факторы (космическая радиация и облучение ядерными частицами) приводят к возникновению процесса ионизации в материалах, следствием чего являются обратимые, полуобратимые и необратимые изменения свойств материалов. К необратимым изменениям относятся нарушение структуры полупроводниковых переходов, остаточная ионизация и соответствующее снижение изоляционных свойств диэлектриков.

Поскольку дестабилизирующие факторы внешней среды могут привести к выходу из строя аппаратуры, процесс разработки и конструирования ЭС должен быть направлен на выбор таких ЭРЭ и материалов, схемотехнических и конструкторских решений, которые бы в совокупности обеспечили стойкость аппаратуры к внешним воздействующим факторам заданной интенсивности.

3.3 Климатическое исполнение ЭС

Условия эксплуатации накладывают ряд дополнительных ограничений на конструкцию изделия. ГОСТ 15150-69 определяет исполнения машин, приборов и других технических изделий для различных климатических районов, устанавливает категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования с учетом воздействия климатических факторов внешней среды. Стандартом предусмотрено одиннадцать вариантов климатических исполнений, обозначаемых русскими или латинскими буквами (цифрами):

- **У** (N или 0) — макроклиматический район с умеренным климатом;
- **УХЛ** (NF или 1) — макроклиматический район с умеренным и холодным климатом;
- **ХЛ** (F) — макроклиматический район с холодным климатом;
- **ТВ** (TH или 2) — макроклиматический район с тропическим влажным климатом;
- **ТС** (TA или 3) — макроклиматический район с тропическим сухим климатом;
- **Т** (T или 4) — макроклиматический район как с влажным, так и с сухим тропическим климатом;
- **О** (U или 5) — общеклиматическое исполнение для макроклиматических районов суши, кроме районов с очень холодным климатом;
- **М** (M или 6) — макроклиматический район с умеренно-холодным морским климатом;
- **ТМ** (MT или 7) — макроклиматический район с тропическим морским климатом;
- **ОМ** (MU или 8) — макроклиматический район с умеренно-холодным и тропическим морским климатом;
- **В** (W или 9) — всеклиматическое исполнение для всех макроклиматических районов суши и моря, кроме районов с очень холодным климатом.

Стандартом устанавливаются границы макроклиматических районов земного шара, а также характеристики типов климата по температуре и влажности.

3.4 Показатели качества ЭС

Для оценки свойств конструкции её характеризуют количественными и качественными показателями. Показатели качества изделия принято делить следующим образом:

- ♦ в системном аспекте: *внешние* и *внутренние*;
- ♦ по физическому содержанию: *функциональные* и *материальные*;
- ♦ по числу отражённых свойств в конструкции: *абсолютные, удельные, относительные и комплексные*.

Внешние параметры определяют тактико-технические возможности изделия (что может изделие, какие функции оно выполняет).

Внутренние параметры характеризуют средства, с помощью которых обеспечиваются внешние параметры (как обеспечено выполнение функций изделием). Например, РЛС характеризуется внешними параметрами (дальность действия, точностью определения координат, массой, надёжностью) и внутренними параметрами (мощностью передатчика, чувствительностью приёмника и др.). Сравнение параметров показывает, что внутренние параметры системы верхнего ранга (РЛС) являются внешними для системы более низкого ранга (приёмника РЛС).

К **функциональным (энергоинформационным)** относятся все электрические параметры: чувствительность, избирательность, выходная мощность, дальность и т.д.

К **материальным параметрам** относятся масса, габариты, стоимость, надёжность и производные от этих параметров.

Между функциональными и материальными параметрами существует тесная взаимосвязь.

Абсолютные показатели (исчисляются в абсолютных величинах):

- масса m , [кг];
- объём V , [дм³];
- мощность потребления $P_{\text{п}}$, [Вт];
- частота отказов λ , [1/час];
- стоимость C [руб] и срок разработки T [год].

Удельные показатели качества конструкции:

- удельные коэффициенты конструкций k_0 ;
- удельная масса (плотность) конструкции $m_0 = \frac{m}{V}$, [кг/дм³]

($m_0 \leq 1$ - «плавающая РЭА», $m_0 > 1$ - «тонущая РЭА»);

- удельную мощность $P_{0V} = P_{\text{п}}/V$, [Вт/дм³];
- удельную стоимость $C_0 = C/V$, [руб/дм³];
- плотности упаковки элементов на площади и в объёме $\gamma_s = N/S$ и $\gamma_v = N/V$

соответственно, где N – количество элементов.

Плотность упаковки является главным показателем уровня интеграции конструктивов того или иного уровня, однако, его нельзя использовать для оценки качества компоновки конструкций при использовании элементной базы разных поколений.

Плотность упаковки меняется при переходе с уровня на уровень. Так, если для ИС с объёмом кристалла 1 мм^3 $N=40$, $\gamma_{\text{ис}}=40 \cdot 10^3 \text{ эл/см}^3$, то на уровне блока РЭС $\gamma_{\text{б}} = 40 \text{ эл/см}^3$. Иначе говоря, при переходе с одного компоновки на другой происходит потеря (дезинтеграция) полезного объёма.

Относительные параметры, называемые коэффициентами дезинтеграции, определяются по формулам:

- для объёма $q_v = V_{\text{б}}/V_{\text{эл}}$, где $V_{\text{б}}$ – объём блока, $V_{\text{эл}}$ – суммарный объём элементов;
- для массы $q_m = m_{\text{б}}/m_{\text{эл}}$, где $m_{\text{б}}$ – масса блока, $m_{\text{эл}}$ – суммарная (полезная) масса элементов;
- по площади $q_s = S/S_{\text{эл}}$.

Пример: Бескорпусная ИС малой степени интеграции характеризуется $\gamma_v=40000 \text{ эл/см}^3$. При её установке в корпус четвёртого типа происходит увеличение объёма в 200 раз, а при установке корпусированных ИС на плату и далее в корпус блока – ещё в 5 раз. Таким образом, суммарный коэффициент дезинтеграции $q_v \approx 10^3$.

Среднестатистические значения q_m , q_v , и m_0 для различных вариантов конструкций приведены в [пособие для курсового и дипломного проект-я].

Комплексная оценка качества ЭС. При сравнении качества конструкции по отдельным показателям (параметрам), как правило, не удаётся получить объективной оценки качества конструкции. Кроме того, формальное использование параметров при сравнении может создать неверное представление о качестве конструкции. Например, разница только в стоимости не позволяет судить о качестве изделий без анализа их функциональных характеристик. Проблему можно решить путём комплексной оценки качества по всем основным параметрам. Комплексный показатель качества образуется суммированием произведений нормированных частных показателей на свои весовые коэффициенты:

$$K = \sum_{i=1}^n \varphi_i \alpha_i^*,$$

где φ_i – весовые коэффициенты, определяющие значимость параметров конструкции (0...1),

α_i^* – нормированные значения параметров конструкции,

n – количество параметров конструкции, входящих в номинальный показатель.

На практике используют разные способы определения α_i^* . Самым простым из них является подсчет по формуле:

$$\alpha_i^* = P_i / P_{ЭТ},$$

где $P_{ЭТ}$ – наилучшее (эталонное) значение параметра для сравниваемых изделий, либо заданное в ТЗ;

P_i – значение i -го параметра.

Очевидно, что корректность оценки показателя качества K будет зависеть от правильности выбора φ_i . Для выбора весовых коэффициентов может использоваться один из следующих методов:

1. директивный;
2. статистический;
3. стоимостной;
4. аналитический;
5. эвристический.

В настоящее время наибольшее распространение нашли эвристические методы. Они связаны с учётом мнений групп экспертов, то есть это способы принятия решений, использующие обобщённый человеческий опыт.

3.5 Взаимосвязь между функциональными и материальными показателями ЭС

В процессе своей деятельности конструктор опирается на исходные данные, в числе которых находятся и функциональные и материальные параметры. Ввиду тесной их взаимосвязи важно определить возможность удовлетворения требований к материальным параметрам конструкции при заданных значениях функциональных параметров.

В общем случае взаимосвязь между функциональными и материальными параметрами устанавливается с помощью некоторой Функции, связывающей эти параметры.

Если для конструкции установлены значения материальных параметров $M_1, M_2, \dots, M_i$ и совокупность функциональных параметров $F_1, F_2, \dots, F_j$, то справедливо следующее соотношение:

$$M_i = f_i(F_1, F_2, \dots, F_j)$$

где f_i – функции, связывающие функциональные и материальные параметры.

На практике для целого ряда конструкций различного функционального назначения трудно определить вклад каждого функционального параметра в материальный параметр, т.е. определить f_i бывает сложно или невозможно. Поэтому используются точечные оценки этих функций, которые называют удельными коэффициентами конструкции (коэффициентами связи между F и M параметрами) - K_0 .

По удельным коэффициентам оценивают прогресс развития новых конструкций по сравнению с предыдущими аналогами и прототипами. В общем виде они определяются по формуле:

$$K_0 = M / F ,$$

где M – материальные показатели (масса, объем, стоимость, интенсивность отказов и др.)

F – функциональные показатели

Для аппаратуры различного класса на корпусированных ИС характерны следующие значения m_0 и K_{ov} (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Тип ЭС	$m_0, \text{г/см}^3$	$K_{ov}, \text{см}^3/\text{эл.}$
Передатчик	0,6-0,8	0,3-0,4
ВИП	0,7-0,9	0,5-0,7
Устройство индикации	0,5-0,7	0,2-0,4
Вычислительное устройство	0,4-0,6	0,3-0,5

3.6 Проектная оценка массогабаритных показателей конструкции

Исходными данными являются состав элементной базы и значения функциональных показателей, обоснованных при разработке ТЗ. Для решения задачи используется два подхода:

1. Расчет объема и массы будущей конструкции через относительные показатели качества, в частности через коэффициенты дезинтеграции.

2. Использование для этой цели удельных коэффициентов, связывающих материальные и функциональные параметры.

Примеры для первого варианта.

а) Если известны сведения о массе используемой в конструкции элементной базы:

- определим массу элементов: $m_{ЭЛ} = \sum_{i=1}^n m_i$,
- определим массу конструкции: $m_{БЛ} = q_m \cdot m_{ЭЛ}$,
- определим объем конструкции: $V_{БЛ} = m_{БЛ} / m_0$.

б) Если известны сведения об объеме элементов, то:

$$V_{ЭЛ} = \sum_{i=1}^n V_i,$$

$$V_{БЛ} = q_v \cdot V_{ЭЛ},$$

$$m_{БЛ} = m_0 \cdot V_{БЛ}.$$

Примеры для второго варианта:

а) Если можно выделить главный функциональный показатель F:

$$m_{БЛ} = K_{0_m} \cdot F,$$

$$V_{БЛ} = m_{БЛ} / m_0 \text{ или}$$

$$V_{БЛ} = K_{0_v} \cdot F.$$

б) Если нельзя выделить главный функциональный показатель F:

$$V_{БЛ} = N_{ЭЛ} / \gamma_v, \text{ а масса } m_{БЛ} = m_0 \cdot V_{БЛ}.$$

3.7 Наиболее важные требования к ЭС различного назначения

Бытовые ЭС:

- особое значение внешнего вида (конструктору необходимо учитывать моду, вкусы людей, требования технической эстетики, быстрое моральное старение по внешнему виду);

- приспособленность к эксплуатации совершенно не подготовленным человеком («защита от дурака»);
- долговечность (никто не покупает телевизор на один год);
- очень важна стоимость (иначе мало кто купит)
- производство массовое или крупносерийное (для обеспечения низкой стоимости);
- в конструкцию должна быть заложена невысокая стоимость ремонта.

Наземная стационарная аппаратура (СА).

Выполняется в виде настольных и настенных аппаратов, в виде стоек, пультов и шкафов. Характеризуется следующими особенностями:

- значительная продолжительность эксплуатации, поэтому пригодность для модернизаций;
- как правило, эксплуатация в помещении с нормальным климатом при отсутствии механических нагрузок;
- высокая ремонтпригодность на месте эксплуатации.

Другим видом стационарной ЭС является *переносная аппаратура* (лабораторные и медицинские приборы). Эта аппаратура не работает во время переноски. Ее особенностями являются:

- ограниченные веса и габариты;
- удобство перемещения с места на место (наличие ручек, ремней и др.);

Наземные ЭС, установленные на подвижных объектах:

- защищенность от пыли;
- защищенность от вибраций, ударов и ускорений.

Носимая аппаратура

Носимая аппаратура должна нормально функционировать на ходу, поэтому ее конструкция должна отвечать следующим требованиям:

- иметь в своем составе автономный источник питания (батарея, аккумулятор);
- допускать работу на ходу, включая темное время суток
- иметь малый вес (предельные значения: при переноске за плечами – 10 кг, на ремне через плечо – 3 кг, в кармане – 0,7 кг);
- защищенность от ударов и стойкость к циклическим сменам температуры;
- корпус должен быть достаточно герметичным (защита от пыли и влаги) и устойчивым к воздействиям прямых солнечных лучей;

Бортвые ЭС:

- минимальные веса и габаритные размеры, высокая надежность;
- относительная кратковременность непрерывной работы;
- высокая ремонтпригодность в смысле минимума временных затрат перед стартом;
- температурная устойчивость;
- устойчивость к вибрациям, ударам и перегрузкам.

Морские ЭС.

Для этого вида ЭС важно обеспечить:

- повышенную коррозионную стойкость (высокая влажность, соль);
- плеснестойкость;
- водо- и брызгозащищенность;
- вибростойкость.

Космическая аппаратура.

Этот вид ЭС отличает:

- очень жесткие требования к массе и объему;
- чрезвычайно высокая безотказность (наработка на отказ для элементной базы не менее 150000 час);
- при старте имеет место значительное действие вибрации и линейных перегрузок;
- жесткие условия при эксплуатации: широкий диапазон температур (от минус 60 до +125 °С), высокий уровень радиации, ультрафиолетовое излучение, невесомость, вакуум.
- особая продолжительность эксплуатации без обслуживания (искусственные спутники).

Медицинская техника:

- пригодность к проведению частой дезинфекции жидкими средствами (могут содержать хлор и др. активные вещества) и ультрафиолетовым излучением;
- безопасность для пациента, надежность;
- дизайн максимально успокаивающий, не пугающий;
- безболезненность;
- удобство работы;
- минимизация времени работы с пациентом;

4 Электрические соединения в ЭС

4.1 Классификация, параметры электрических соединений

Классификация электрических соединений (ЭЛС) производится по конструктивно-технологическому исполнению (методу выполнения) и по уровням. Основные методы выполнения ЭС приведены на схеме (рисунок 4.1)

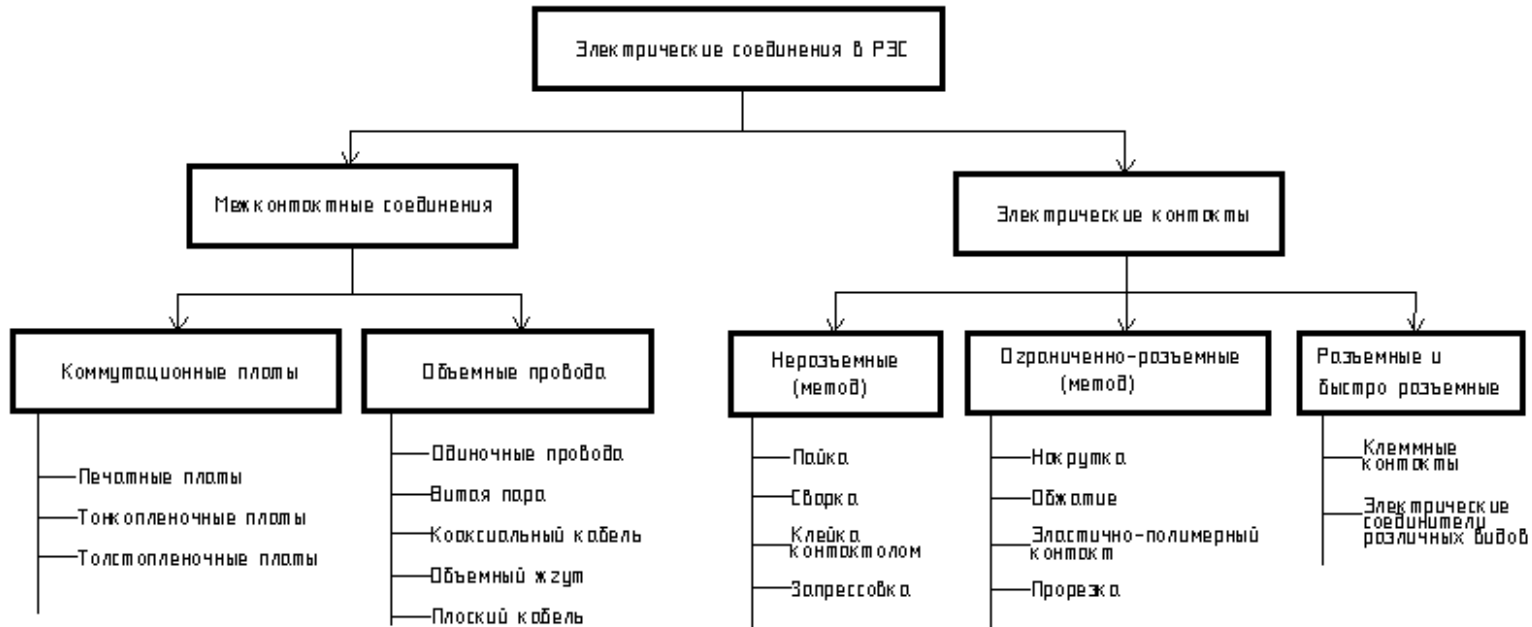


Рис. 4.1 – Методы выполнения электрических соединений в ЭС

Классификация по уровням связана с тем, что на различных структурных уровнях конструкций ЭС используются свои методы выполнения ЭС (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Уровни электрических соединений

Уровень электрических соединений	Структурный уровень конструкции	Основные способы выполнения электрических соединений
0	интегральные схемы	тонко- и толстопленочные проводники
1	микросборки	тонко- и толстопленочные проводники
2	функциональные ячейки, модули	печатные, тонко- и толстопленочные проводники
3	блоки	печатные проводники, объемный проводной монтаж
4	шкафы, стойки	печатные проводники, объемный проводной монтаж

Параметры ЭлС можно подразделить на функциональные и материальные. Материальные параметры ЭлС – это масса, объем, занимаемая площадь, стоимость, интенсивность отказов и др. Функциональные параметры ЭлС – это электрические параметры такие, как омическое сопротивление, волновое сопротивление, собственные индуктивность и емкость и др.

4.2 Начальные сведения о печатных платах

Основные отечественные стандарты по печатным платам:

ГОСТ Р 53386-2009. Платы печатные. Термины и определения

ГОСТ Р 534529-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции.

Платы бывают: жесткие, гибкие и гибко-жесткие.

Материалы для изготовления оснований печатных плат можно условно разделить на два больших класса:

- органические – гетинаксы, стеклотекстолиты и др.,
- неорганические – керамика, оксидированные или эмалированные металлы и др.

Органические материалы для печатных плат дешевы, технологичны и широко используются большинством производителей во всем мире.

Неорганические материалы используют в специальных случаях, когда требуется получить какие-либо свойства или характеристики, обычно недоступные для органических материалов. Например, высокую теплопроводность, прочность или стойкость к высоким температурам.

Гетинакс имеет многослойную бумажную основу, пропитанную фенольной либо эпоксидной смолой. Этот материал легко обрабатывается и имеет относительно низкую стоимость. С другой стороны, он заметно уступает стеклотекстолиту по механической прочности и влагостойкости. Основная область применения гетинакса – это бытовая электроника и электротехника.

Стеклотекстолит для жестких печатных плат представляют собой несколько спрессованных слоев стекловолокна (обычно 8 слоев), покрытых медной фольгой (рисунок 4.2). Пространство между слоями заполнено наполнителем, в качестве которого используются фенольная смола, эпоксидная смола, полиэстер, полиимидная смола и др. материалы.

Материалы этого типа широко используются для изготовления односторонних, двусторонних и многослойных плат, так как в отличие от гетинакса он может легко металлизироваться химическим способом.

Наиболее массовые в применении типы печатных плат (ПП) представлены на рисунках:

- односторонние печатные платы (ОПП) – рис. 4.3;
- двусторонние печатные платы (ДПП) – рис. 4.4;
- многослойные печатные платы (МПП) – рис. 4.5.

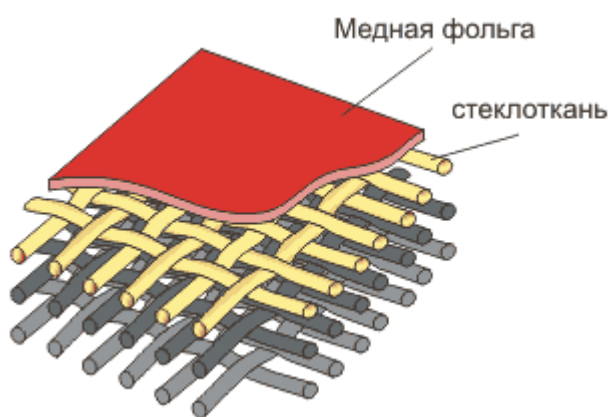


Рис. 4.2 – Структура стеклотекстолита

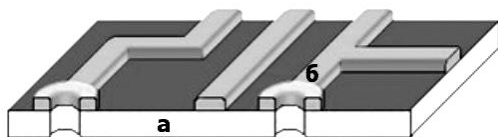


Рис. 4.3

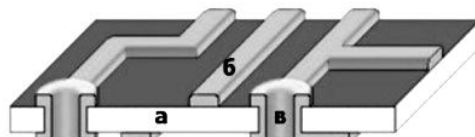


Рис. 4.4

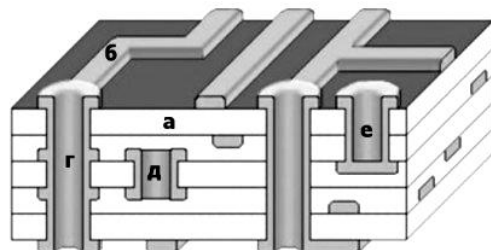


Рис. 4.5

На рисунках обозначены элементы печатных плат:

а – материал основания

б – проводящий рисунок

в – монтажное или переходное металлизированное отверстие

г – сквозное монтажное или переходное металлизированное отверстие

д – скрытое переходное металлизированное отверстие

е – глухое монтажное или переходное металлизированное отверстие

Односторонние печатные платы характеризуются:

- возможностью обеспечения повышенных требований к точности выполнения проводящего рисунка;
- простотой технологического процесса изготовления ПП;
- возможностью установки РЭ на плату в основном со стороны, противоположной стороне пайки, без дополнительного изоляционного покрытия;
- самой низкой себестоимостью*.

Основными областями применения ОПП являются: бытовая техника, источники питания и средства связи.

Двусторонние печатные платы могут выполняться с металлизированными и, значительно реже, с неметаллизированными переходными отверстиями.

В последнем случае электрические соединения между сторонами платы осуществляются с помощью объемных металлических элементов (штырей, отрезков проволоки, арматуры переходов по ГОСТ 22318 и т.д.). Данный вид плат характеризуется:

- возможностью обеспечения высоких требований к точности выполнения проводящего рисунка;

- необходимостью применения дополнительных монтажных элементов – арматуры переходов;
- низкой себестоимостью.

Двусторонние платы с металлизированными отверстиями (рис. 4.4) характеризуются:

- высокими коммутационными свойствами;
- повышенной прочностью сцепления выводов РЭ с проводящим рисунком платы;
- более высокой себестоимостью (таблица 4.2).

Кроме того, ДПП значительно меньше коробятся, т.к. проводящие металлические слои, расположенные на противоположных сторонах основания, компенсируют деформацию диэлектрика.

Двусторонние ПП используются в сложной бытовой электронике, где необходимо плотное размещение РЭ на плате, в системах управления промышленным оборудованием, в измерительной технике, в бортовых ЭС и др.

Многослойные печатные платы обладают самыми высокими коммутационными свойствами, возможностью обеспечения высокой помехозащищенности цепей, однако себестоимость таких плат существенно более высокая. Эти платы в основном используются в тех случаях, когда требуется очень высокая плотность межсоединений (например, в конструкциях с применением многовыводных БИС и СБИС) и/или высокая скорость передачи данных. Конструктивно-технологические разновидности МПП, их характеристики описаны в [].

Таблица 4.2 – Себестоимость ПП (данные 2010 г.), \$/дм²

Виды плат	Россия	Европа	Китай
Односторонние	0,56	–	0,55
Двухсторонние	0,95	2,4	0,9
Многослойные (6 слоев)	2,6	8,6	1,9

4.3 Объемный “жгутовой” монтаж

☺ Электрический жгут представляет собой параллельно идущие провода, связанные и уложенные в определенном порядке.

Раскладка и обвязка жгутов производятся на заранее изготовленном шаблоне, плоском или объемном. Для этого используются монтажные провода МГШВ, МГТФ, ГФ-100 и др. Минимально допустимый диаметр провода при выборе для жгута определяется не ограничением на плотность тока, а опасностью растяжения при вязке, например, для медных проводов он составляет 0,6 мм. При необходимости весь жгут или отдельные провода в его составе экранируются.

Для того чтобы жгут сохранял круглую форму, его обвязывают нитками или клейкой лентой. Обвязка ниткой производится так, чтобы при ее протергивании образовывались самозатягивающиеся петли.

Современным материалом для обмотки жгутов является самослипающиеся ленты ЛЭТСАР и резиностеклоткань РЭТСАР. Они выполняются в виде пленки, одна сторона которой покрыта специальным слабосклеиваемым составом. Она слипается "намертво" при вытяжке материала на 1/3 длины и температуре (15-35) °С в течение 48 часов. Ленты ЛЭТСАР и РЭТСАР отличаются тремя основными достоинствами:

- широкий интервал рабочих температур – от минус 50 до +(200...250) °С;
- высокая электрическая прочность (до 20 кВ/мм);
- высокая устойчивость к воздействию ультрафиолетового излучения, бензина и др. агрессивных сред;
- отсутствие токсичности.

Жгутовой монтаж (ЖМ) используется для соединений внутри блоков и пультов. Его недостатками являются: большие габариты, высокая трудоемкость изготовления, необходимость разработки и выпуска КД на жгут. ЖМ рекомендуется использовать только в обоснованных случаях. Например, при сильной разветвленности соединений.

Программное обеспечение "ЖГУТ" (ВНИИЭФ, г. Саров) существенно облегчает разработку жгутов. Оно позволяет:

- ввести исходные данные для проектирования (описание конструкции и схемы соединений);
- выбрать из базы данных необходимые соединители, провода, кабели, трубки, плетенки и т.д.;
- выполнить расчет жгута, включающий определение диаметров, длин и масс проводов, трубок и плетенок, расчет сопротивления электрических цепей, содержание драгметаллов и цветных металлов;
- выполнить полный комплект КД.

4.4 Плоские кабели

Плоские кабели (ПК) используются для внутриблочных и межблочных соединений. Основные особенности ПК – размещение проводников в одной плоскости, высокая гибкость. ПК можно разделить на *ленточные кабели* и *шлейфы*. Применение ПК вместо жгутов позволяет:

- снизить массу и объем внутриблочных соединений на 40-60 %;
- подсоединять провода к контактам соединителей групповым способом и снизить трудоемкость монтажа;
- повысить стабильность и помехозащищенность соединений;
- повысить прочность соединений на разрыв.

Для повышения помехозащищенности проводники в кабеле подсоединяют по принципу «земля-сигнал-земля». В случае необходимости

применяют многослойные конструкции, в которых внешние слои представляют заземлённые проводники и играют роль экрана.

4.4.1 Ленточные кабели

Ленточные кабели (ЛК) имеют следующие конструктивно-технологические исполнения: *клееные, опрессованные, плетеные и тканые*. Наибольшее применение в настоящее время находят опрессованные и тканые ЛК (рис. 4.6).

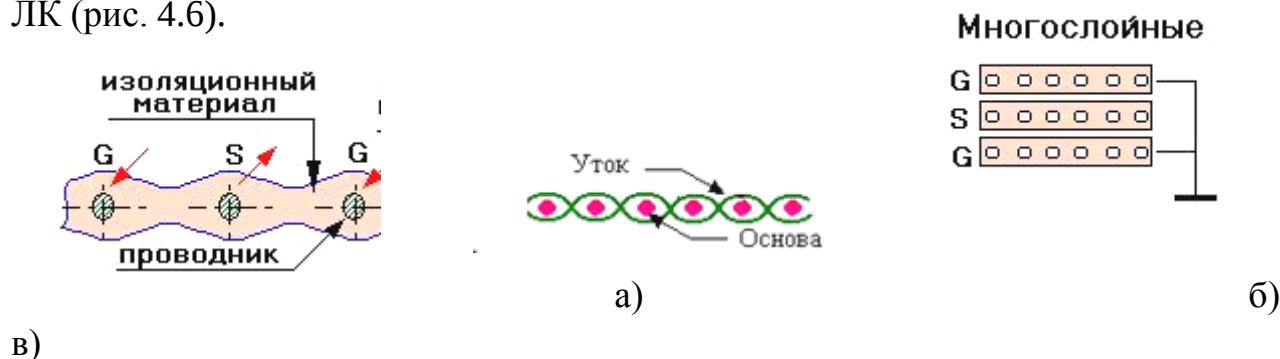


Рисунок 4.6 - Разновидности ленточных кабелей:

а) — опрессованный ЛК; б) — тканый ЛК; в) — экранированный многослойный ЛК

Опрессованные ЛК являются самыми технологичными и дешевыми. Недостаток ЛК: они не могут эксплуатироваться при повышенных температурах и в агрессивных средах.

Тканые кабели получают переплетением проводов высокопрочной нитью, например, лавсановой. В состав этих кабелей могут включаться провода различных сечений и типов — витые пары, одножильные и многожильные, экранированные и неэкранированные, коаксиальные и др. провода.

Главные особенности тканых кабелей — высокая термостойкость и большая стоимость.

Основная область применения — бортовые ЭС.

4.4.2 Гибкие шлейфы (ГШ).

Основным способом получения ГШ является печатная технология (субтрактивная или полуаддитивная). В качестве гибкой основы используются пленки из полиимида, лавсана или фторопласта. Шлейфы выполняются односторонними, двухсторонними и многослойными, с экранированием и без него. На концах у ГШ обычно имеются контактные площадки или металлизированные отверстия. Данные по некоторым типам ГШ приводятся в таблице 4.3.

Общие достоинства ГШ по сравнению с ЛК: наиболее плотное размещение проводников, минимальные габариты и масса, широкополосность.

Недостатки по сравнению с ЛК и объемными проводами: высокое погонное сопротивление проводников, поэтому длина ГШ обычно не превышает 30-40 см (в межблочных соединениях практически не применяются).

Таблица 4.3 – Параметры ГШ

Параметр	Полиимидные ГШ		Лавсановые ГШ
	односторонние	двухсторонние	
1. Мин. ширина проводников и расстояния между ними, мкм	200 ... 400	30 ... 50	200 ... 400
2. Диамет. переходных отверстий, мкм	-	50 ... 70	-
3. Температурный диапазон, °С	-60 ... +220	-196 ... +300	-40 ... +150
4. Относительная стоимость	1,5	2 ... 3	1,0

4.5 Витая пара (ВП)

Витая пара выполняется либо самостоятельно, либо входит в состав других кабелей. В зависимости от способов подключения обратный проводник заземляется с одного или с двух концов.

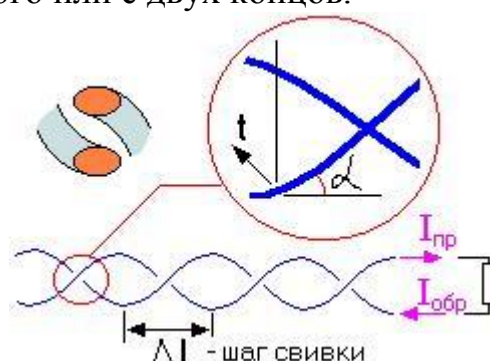


Рис. 4.7 – Витая пара

Витая пара отличается минимальной восприимчивостью к внешним магнитным полям. Это объясняется следующим.

При воздействии внешнего магнитного поля на витую пару в каждом витке индуцируется ток, значение которого пропорционально площади витка. Поскольку площади витков практически одинаковы, то и наведенный ток в витках одинаков по амплитуде и по направлению. За счет изменения направления проводов от витка к витку при свивке наведенные токи в паре витков компенсируют друг друга. Таким образом, при четном количестве витков суммарный наведенный ток будет равен нулю, а при нечетном - равен наведенному току в одном витке.

Витая пара дешевле коаксиального кабеля. Все это определяет широкое применение витой пары для создания компьютерных сетей.

4.6 Коаксиальный кабель

Коаксиальный кабель (от лат. – соосный; разговорное "коаксиал" от англ. coaxial) – электрический кабель, состоящий из центрального проводника и экрана, расположенных соосно и разделённых изоляционным материалом или воздушным промежутком. Используется для передачи высокочастотных

сигналов в системах связи, компьютерных сетях, вещательных сетях и в др. технике.

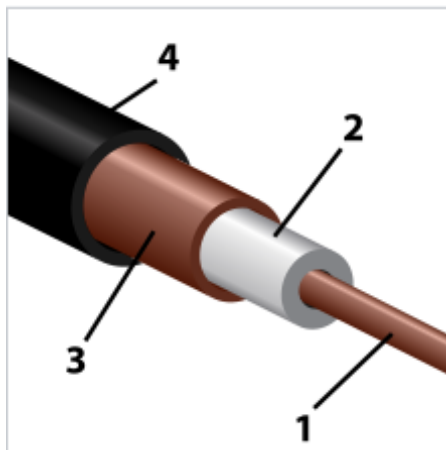


Рис. – Устройство коаксиального кабеля

1 – внутренний сплошной или свитой из проволочек проводник, 2 – изоляция (полиэтилен, вспененный полиэтилен, фторопласт и др.), 3 – проводочная оплетка или сплошной проводник (экран), 4 – защитная оболочка.

Коаксиальный кабель – полностью экранированная линия. Качество экранирования в случае использования оплётки зависит от плотности переплетения медной проволоки. Этот параметр определяет процент площади вокруг сигнального проводника, занятой проволокой оплётки. Например, значение плотности $S=90\%$ означает, что 90 процентов плоскости оплётки занято проволокой, а 10 процентов – это зазоры. Диапазон плотности оплетки обычно составляет 80-90 процентов. Для высокостабильных кабелей вместо оплётки применяется сплошной (как правило, медный) трубчатый проводник. Очевидно, что плотность оплетки в этом случае – 100%.

Основные электрические параметры коаксиального кабеля:

- волновое сопротивление (основные значения: 50, 75 Ом);
- погонное ослабление задается на разных частотах, дБ/м;
- погонные значения индуктивности и емкости;
- коэффициент укорочения (показывает во сколько раз скорость волны в кабеле меньше скорости света в вакууме) – *необходим для расчета антенно-фидерных устройств.*

Пример обозначения отечественного кабеля:

РК 50-4-11 – радиочастотный кабель, 50 Ом, диаметр по изоляции 4,6 мм.

Примеры обозначения зарубежных кабелей:

RG-11 и **RG-8** – «толстый Ethernet», 75 Ом и 50 Ом соответственно;

RG-58 – «тонкий Ethernet», 50 Ом;

RG-59 – телевизионный кабель, 75 Ом. Российский аналог **РК-75-х-х**;

4.7 Электрические контакты

Пайка и сварка для выполнения электрических соединений в ЭС

По распространенности применения в ЭС пайка и сварка опережают все остальные методы контактирования, причем пайка по этому показателю значительно опережает сварку. Главное достоинство пайки состоит в относительной простоте процесса и возможности реализации групповых методов присоединения. Недостатками пайки является значительное термическое воздействие на соединяемые элементы и необходимость применения флюса и припоя, что негативно влияет на экологию окружающей среды. Фактор давления на изделие в процессе пайки незначителен.

Сравнение методов контактирования по переходному электрическому сопротивлению, механической прочности, надежности и тепловому сопротивлению приведено в таблице 4.3. Из нее следует, что по этим показателям сварка имеет существенные преимущества по сравнению с пайкой.

Табл. 4.3 – Характеристики основных методов контактирования

Вид соединения	Переходное сопротивление $\times 10^{-3}$, Ом	Механическая прочность, МПа	Интенсивность отказов $\times 10^{-9}$, 1/час	Тепловое сопротивление, К/Вт
Сварка	0,01...1	100...500	0,1...2,0	0,001
Пайка	2...3	10...40	1...10	0,002
Накрутка	1...2	60...80	0,2...0,5	0,0005
Обжимка	1...10	20...50	2...5	0,0008...0,001
Соединение токопроводящим клеем	1...10 Ом·м*	5...10	10...50	5

*Удельное объемное сопротивление

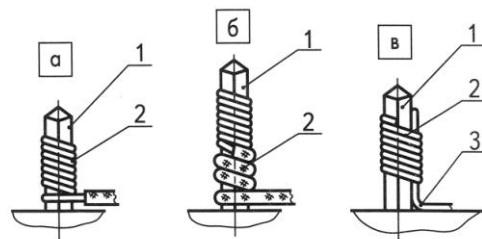
Сварка осуществляется только на открытых поверхностях, например, в отличие от пайки присоединение вывода сваркой внутри металлизированного отверстия практически невозможно. С другой стороны, сварка характеризуется большей избирательностью: для подсоединения проволоки к плоской контактной площадке для неё потребуется меньше места, чем для припайки этой проволоки.

Пайка является основным методом контактирования при печатном монтаже, а сварка – при монтаже кристаллов ИС и изделий микросистемной техники.

Рассмотрим другие перспективные методы контактирования, которые объединяет одно очень важное преимущество – отсутствие необходимости в нагреве для образования соединения.

Контактирование способом накрутки.

В данном случае контакты выполняются путем накрутки с большим натягом нескольких витков оголенного провода на жесткий штыревой вывод, имеющий острые грани. Варианты выполнения контактов накруткой изображены на рис. 4.9. Среднее давление в точках контактирования порядка $17 \cdot 10^3$ Па. Получаемый таким образом контакт имеет низкое переходное сопротивление и высокую надежность (табл. 4.3).



Виды присоединения монтажных проводов к выводам контактов методом накрутки:

- а) немодифицированное;
- б) модифицированное;
- в) бандажное:
 - 1 — вывод хвостовика электрического контакта;
 - 2 — проводник;
 - 3 — бандажируемый элемент

Рис. 4.9 – Накрутка провода на штыревой вывод

Главный недостаток: очень низкая плотность выполняемых соединений.

Основное применение: выполнение крупноформатных коммутационных (объединительных) панелей (АТС, крупные ЭВМ и др.).

Эластичные полимерные контакты (ЭПК).

ЭПК образуется между токопроводящим эластиком и контактной площадкой, покрытой никелем, золотом или графитом. Используются преимущественно в изделиях бытового назначения.

Токопроводящий эластик получают одним из двух способов:

- 1) нанесением на силиконовую резину проводящего слоя (металл или графит);
- 2) введением в эластомер наполнителя, в качестве которого используется порошок серебра, меди, никеля, графита.

Примеры применения ЭПК: кнопки или клавиатур, соединители типа "Зебра" для соединения ЖКИ с печатным узлом и др.

Переходное сопротивление ЭПК кнопок, если контакты покрыты золотом, составляет 0,003 Ом, число циклов контактирования – не менее $10^6 - 10^7$.

В соединителях типа "Зебра" переходное сопротивление в зависимости от материала проводящего объема – от 0,1 Ом до 1000 Ом.

Пример использования "Зебры" в качестве межплатных соединителей (рис. РМ.4.5).

Выполнение контактов методом прорезки. Этот метод широко используется для подсоединения ЛК к электрическим соединителям (СНП46, СНП66 и др.). Принцип подсоединения показан на рис. 4.10.

Преимущество метода: ЛК подсоединяется к электрическому соединителю одновременно всеми жилами без предварительного снятия изоляции и без применения пайки.

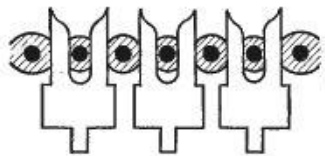


Рис. 4.10 – Метод прорезки

Если бы не изобрели этот метод или что-то подобное ему, то соединительные кабели для персональных компьютеров стоили бы настолько дорого, что многим людям ПК был бы не по карману.

Запрессованный контакт — это непаяное соединение, получаемое запрессовкой особым образом спрофилированного контактного штыря (рис. 4.11, а) в сквозное металлизированное отверстие в печатной плате. Высокие механические и электрические характеристики контакта достигаются за счет возникающих в ходе запрессовки радиальных усилий F_n , воздействующих со стороны запрессовываемой части контакта на боковые стенки сквозного металлизированного отверстия (рис. 4.11, б).

Соединения данного вида пользуются высокой популярностью в электротехнической и электронной промышленности многих стран благодаря следующим преимуществам:

- высокая механическая прочность и виброустойчивость;
- коррозионная стойкость за счет герметичности контакта;
- экологичность производства (не используются флюсы и припой)
- высокая надежность соединений.
- В печатных узлах метод используется в основном при монтаже электрических соединителей на плату. При этом впрессовывание разъемов с десятками и сотнями штырей ускоряет процесс монтажа (по сравнению с пайкой) в 3–4 раза.

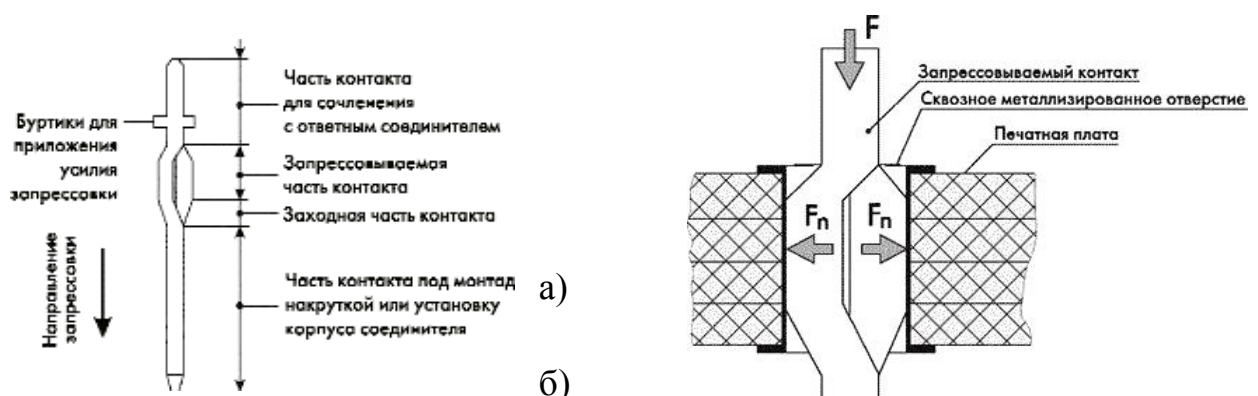


Рис. 4.11 – Контактный штырь (а); силы, действующие при запрессовке (б)

5 Основы электромагнитной совместимости ЭС

ЛИТЕРАТУРА по разделу "Основы ЭМС"/2018

1. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л.Н.Кечиев - М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. - 616 с: ил. - (Библиотека ЭМС). - **В электронном виде**
2. Электромагнитная совместимость. Гончаренко И. В., Купин М.Н. Радиософт. М., 2018. Тир. 500 экз., (Только покупать ≈ 900 руб).
3. Барнс Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами. М.: Мир, 1990. - **В электронном виде**

5 Основы электромагнитной совместимости ЭС

5.1 Введение, основные понятия

В словаре, выпущенном МЭК электромагнитная совместимость (ЭМС) определяется как «способность сигналов и помех существовать без потери информации в полезном сигнале».

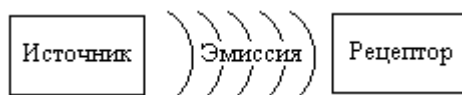
Нарушение ЭМС может привести к частичной или полной потере работоспособности ЭС.

Пример. В 1982 году во время войны за Фолклендские о-ва аргентинская авиация на устаревших самолетах легко потопила новейший английский эсминец «Шефилд». Это произошло из-за того, что противоракетная оборона судна не смогла обнаружить ракеты, выпущенные с аргентинского самолета, так как в это время на корабле работала спутниковая система связи, которая создавала для РЛС сильную помеху. Налицо грубая ошибка разработчиков, которые создавали радиосистемы корабля.

Проблемы обеспечения ЭМС на практике постоянно усложняются по следующим причинам:

- наблюдается непрерывный рост числа ЭС и электротехнических устройств, используемых в современном мире;
- происходит уменьшение числа свободных каналов во всех освоенных диапазонах связи;
- аппаратура миниатюризируется, что сопровождается снижением энергии полезных сигналов и, как следствие, уменьшением отношения сигнал-помеха;
- происходит рост быстродействия ЭС, что усугубляет проблему целостности сигналов.

В наиболее общей модели для анализа ЭМС имеется **источник помех**, **рецептор** и процесс переноса электромагнитной помехи от источника к рецептору:



Рецептор – устройство, подвергающееся негативному воздействию электромагнитных помех. Рецептором может выступать любой элемент кон-

струкции, начиная от корпуса изделия и заканчивая выводами радиоэлементов, которые обладают хотя бы минимальным антенным эффектом.

Электромагнитная помеха (ЭМП) – электромагнитная энергия, излучаемая одним устройством, которая может приводить к нарушению качественных характеристик другого устройства.

5.1.1 Источники помех

Источники помех разделяют на источники *естественного* и *искусственного* происхождения.

Основные источники естественного происхождения это:

- различные природные явления (атмосферные шумы, грозовые разряды и пр.);
- электростатический разряд;
- солнечная активность и др.

Источники ЭМП искусственного происхождения могут находиться как внутри самого устройства, так и вне него. Примерами внешних источников могут служить:

- мощные передатчики, РЛС, системы навигации;
- радиослужбы в условиях ограниченного объёма – корабельные радиослужбы, ВМФ – на одном корабле несколько сот радиостанций;
- ЛЭП и электропередача в зданиях;
- мобильная связь и др.

Внутри устройства источниками помех могут быть:

- изделия, содержащие индуктивности (трансформаторы, дроссели, катушки индуктивности);
- генераторы, усилители и им подобные узлы большой мощности, выходные каскады устройств большой мощности;
- узлы, блоки и элементы, работающие в ключевом режиме – возникают новые спектральные составляющие, расширяющие спектр помех;

5.1.2 Степень влияния ЭМП на рецептор

Воздействие ЭМП на рецептор определяется различными факторами, основными из которых являются:

- уровень помех в источнике;
- степень восприимчивости (устойчивости) рецептора – эта характеристика рецептора называется *электромагнитной помехоустойчивостью*;
- механизм воздействия источника на рецептор.

5.1.3 Классификация помех

Наука об ЭМС изучает только **непреднамеренные помехи**, которые чаще всего классифицируют по пути распространения и природе возникновения.

Помеха, созданная в пространстве, называется **излучаемой**, а созданная в проводящей среде – **кондуктивной**.

По природе возникновения непреднамеренные ЭМП принято делить на 4 класса.

Первый класс – **стационарные ЭМП**. Они производятся антеннами радиопередающих устройств и являются излучаемыми.

Второй класс – **индустриальные ЭМП**. Основными источниками этих помех являются электротехнические и радиоэлектронные средства, применяемые в промышленности, быту, медицине и т.д. Индустриальные ЭМП распространяются путём излучения или по проводам.

Пример. В сети 220В происходят скачкообразное изменение тока при включении ёмкостных нагрузок, люминесцентных ламп и электродвигателей и скачкообразное изменение напряжения при выключении индуктивных нагрузок (причина – возникновение э.д.с. самоиндукции). Например, при выключении кофемолки на контактах сетевой розетки наблюдаются перенапряжения с размахом около ± 1500 В (рис. 5.1).

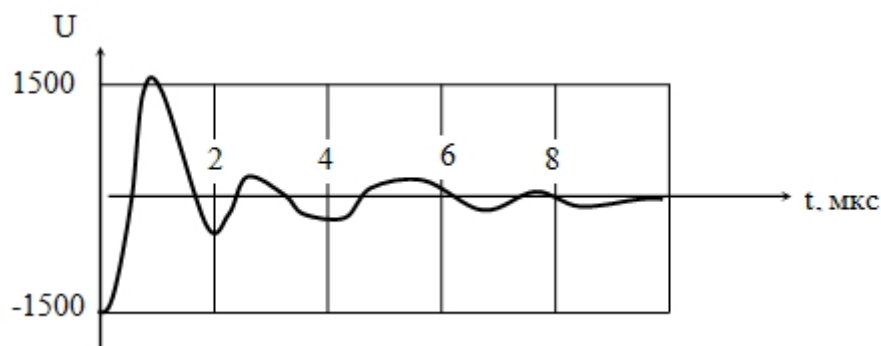


Рис. 5.1

Третий класс – **естественные помехи**, которые являются только излучаемыми. К ним относятся атмосферные помехи (частоты от единиц Гц до 10 МГц), космические шумы (частоты более 1 МГц), электростатические помехи в результате электризации различных тел (от Гц до 1 ГГц).

Четвёртый класс – **контактные помехи**. Создаются переизлучением токопроводящих механических контактов с нелинейной токовой проводимостью при их облучении полем достаточно мощного радиопередающего устройства. Эти помехи характерны для подвижных объектов, подкласс только один – излучаемые.

5.2 Уровни обеспечения ЭМС

На разных иерархических уровнях конструкций ЭС задачи обеспечения ЭМС по разному формулируются и решаются, поэтому их разделяют на следующие группы:

- *межсистемная ЭМС* – совместимость между отдельными автономными системами (например, между системой связи и РЛС);
- *внутрисистемная ЭМС* – совместимость между отдельными средствами (например, между блоками), входящими в состав системы;
- *внутриаппаратная ЭМС* – совместимость между отдельными элементами или КТЕ отдельного прибора, блока.

В компетенции конструктора ЭС находится решение задач обеспечения ЭМС только для двух последних уровней (на первом уровне этими вопросами занимаются в основном «системщики»).

Вопросы обеспечения ЭМС должны решаться на всех стадиях конструирования изделия, а также при его производстве и эксплуатации. Требования к ЭМС изделия излагаются в ТЗ согласно ГОСТ 28934 – 91 («Совместимость ТС электромагнитная. Содержание раздела технического задания в части ЭМС»). Параметры ЭМС разработанной конструкции должны быть записаны в ТУ на изделие.

Для подтверждения того, что изделие отвечает требованиям стандартов по ЭМС оно должно проходить процедуру сертификации в специальных государственных или международных центрах. Если изделие отвечает всем требованиям «Закона об электромагнитной совместимости Европейской МЭК», то после его сертификации, ему присваивается знак СЕ.

5.3 Средства обеспечения ЭМС на этапе конструирования

Основными средствами обеспечения ЭМС при конструировании ЭС согласно ГОСТ Р 52317.1.2-2007 "Методология обеспечения функциональной безопасности технических средств в отношении электромагнитных помех" являются:

- 1) рациональная компоновка изделия – пространственное размещение и ориентация электронных компонентов в изделии с учетом требований ЭМС;
- 2) использование экранирования (всего изделия, отдельных узлов и компонентов, соединительных проводов);
- 3) группирование проводников (прокладка проводов и кабелей с учетом обеспечения ЭМС);

- 4) выполнение цепей питания в изделии, включая "заземление", обеспечивающее минимизацию помех в них;
 - 5) обеспечение целостности сигналов при проектировании коммутационных плат;
 - 6) фильтрация помех;
 - 7) ограничение перенапряжений в электрических цепях;
- Задачи 1-5 решает конструктор, задачи 6, 7 – схемотехник с участием конструктора.

5.4 Выполнение возвратных цепей питания в ЭС (заземления)

Для обозначения возвратных цепей питания в ЭС используются термины: "общий провод", "нулевой провод", "земляной провод" и др. Далее в лекции с целью упрощения используется термин "заземление".

Под **заземлением** будем понимать обладающую низким импедансом цепь возврата тока в электрической схеме.

Функции заземления в ЭС:

- служит общей базой, относительно которой отсчитываются все потенциалы электрической схемы;
- обеспечивает сигнальные и силовые цепи возврата;
- снимает электростатические заряды;
- обеспечивает защиту обслуживающего персонала от поражения электротоком.

Возвратные токи, протекающие по общему проводу, создают на нём падение напряжения, которое может являться кондуктивной помехой. Поэтому основной задачей при разработке системы заземления является минимизация её импеданса.

Различают два основных типа систем заземления: **одноточечное** (Рис. 5.2, а, б) и **многоточечное** (Рис. 5.2, в).

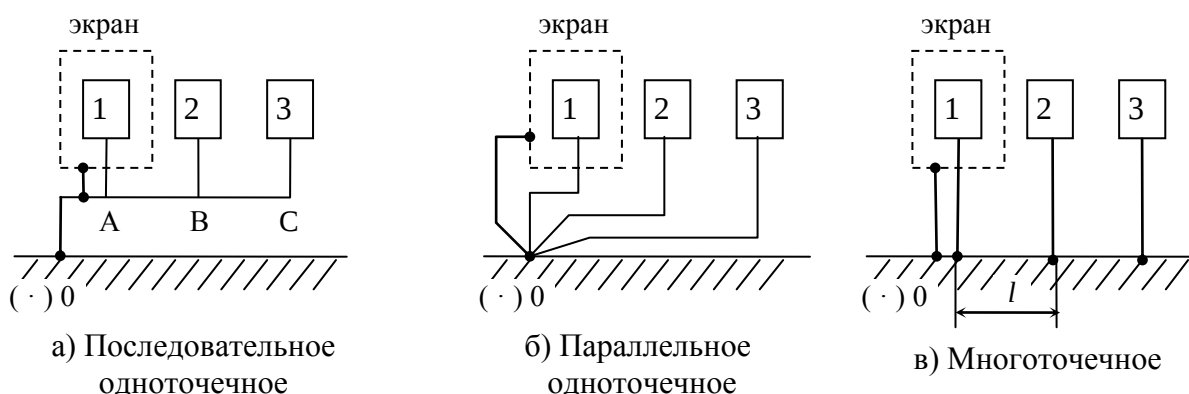


Рис. 5.2

С точки зрения возникновения помех наиболее нежелательной является схема, изображенная на рис. 5.2, а. Тем не менее, её широко используют на практике для изделий не критичных к помехам, т.к. она наиболее проста в исполнении. Эту схему категорически нельзя использовать для цепей с очень большим разбросом потребляемой мощности. Наибольшее отклонение от потенциала земли будет наблюдаться в точке “С”, поэтому наиболее критичный каскад системы следует подключать как можно ближе к точке “0”.

В параллельной одноточечной схеме (Рис. 5.2, б) заземляющая шина сведена в точку, поэтому кондуктивные помехи в ней отсутствуют. Однако в этой схеме заземляющие проводники обладают высокими значениями индуктивностей, взаимных индуктивностей и ёмкостей, поэтому она неэффективна на частотах выше нескольких МГц. Эта схема хороша для низкочастотных силовых устройств.

Многоточечная схема заземления (Рисунок 5.2, в) используется в ВЧ-аппаратуре, где в качестве опорной земли обычно используются металлический лист (шасси), слой в многослойных коммутационных платах и т.д. Соединения с ней осуществляются короткими отрезками проводников.

В сложных ЭС с целью оптимизации системы заземления её выполняют в виде нескольких разомкнутых контуров, соединённых между собой в одной точке. Типичными видами контуров являются:

- ◆ сигнальная (схемная) земля – для сигнальных цепей с низкими уровнями токов и напряжения;
- ◆ силовая земля – для цепей с высокими уровнями потребляемой мощности;
- ◆ корпусная земля – для корпусных цепей (шасси, экранов, слоёв металлизации).

Пример выполнения системы заземления сложного устройства (профессионального магнитофона) представлен на рисунке 5.6.

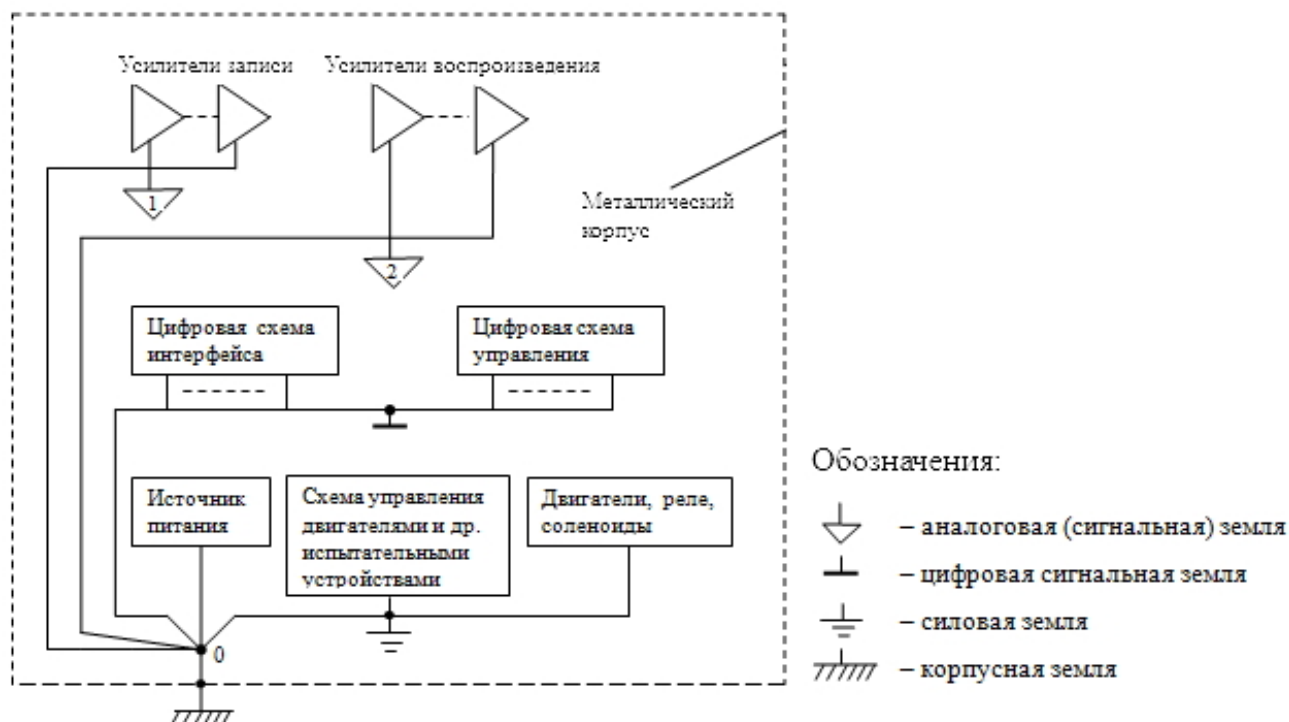


Рис. 5.6 – Организация системы заземления в сложном изделии

Наиболее восприимчивые к помехам аналоговые узлы (усилители) заземлены с помощью двух отдельных сигнальных земель. Заземление цифровых ИС выделено в отдельный контур, т.к. они генерируют широкополосные помехи значительного уровня. В силовом контуре заземления наиболее восприимчивая к помехам схема управления подключена ближе других к опорной точке системы. Сигнальная, силовая и корпусная земли соединяются вместе в одной точке в источнике питания. При проектировании сложных ЭС требуется разработка структурных монтажных схем заземления, которые должны входить в состав комплекта КД.

5.5 Гальваническая развязка

Гальваническая развязка (ГР) позволяет:

- ♦ разрывать пути распространения кондуктивных помех между отдельными каскадами, узлами, блоками и тем самым исключать их взаимное влияние;
- ♦ обеспечивать электробезопасность при работе с изделием;

♦ при определенных условиях подавлять помехи, проходящие через схему развязки.

Устройства ГР имеют особенно широкое применение в медицинской технике, источниках питания, в измерительных приборах и системах, в системах передачи данных (как в гражданских, так и в военных).

Виды гальванической изоляции:

- электромагнитная с помощью дискретных трансформаторов,
- электромагнитная с помощью интегральных трансформаторов (технология iCoupler, фирма Analog Devices);
- оптическая;
- магниторезистивная.

На рис. 5.7 показаны устройства трансформаторной и оптронной развязок, выполненные с помощью интегральной технологии.

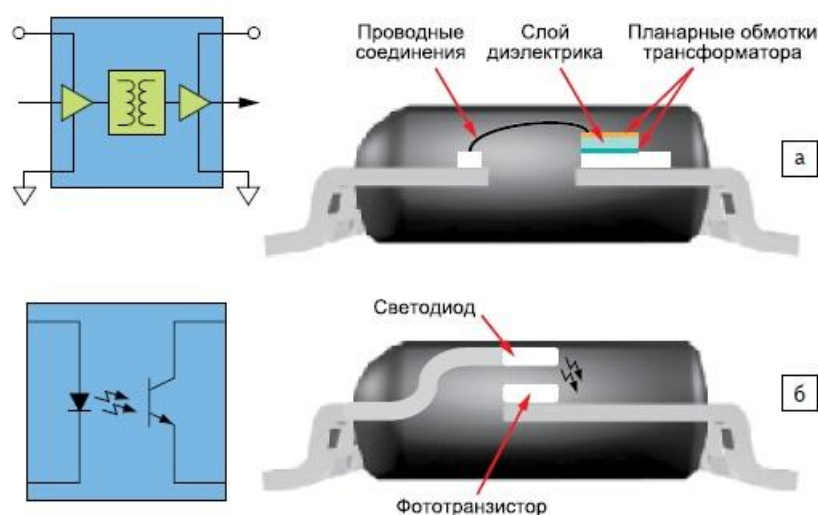


Рис. 5.7 – Интегральные устройства развязки с помощью трансформатора (а) и с помощью оптрона (б).

Преимущества развязки с помощью трансформатора по сравнению с оптической развязкой:

- более высокая скорость передачи сигналов;
- меньшее потребление энергии.

Преимущества оптронной развязки:

- меньшие габариты особенно для многоканальных устройств;

– небольшое преимущество по стоимости.

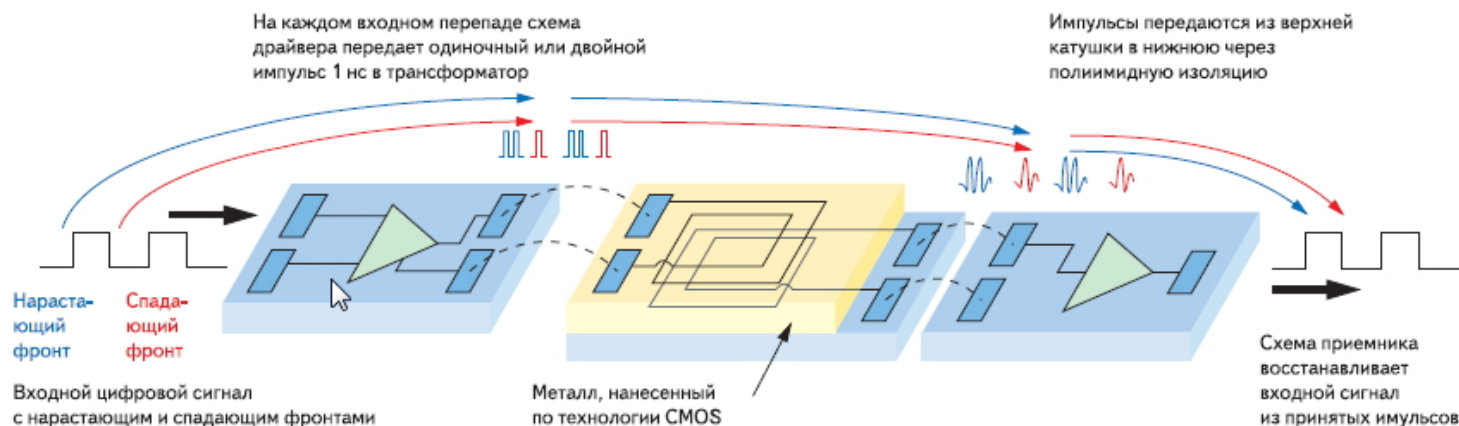


Рис. 5.8 – Принцип iCoupler

В настоящее время наиболее распространена оптическая изоляция, которая реализуется с помощью приборов, называемых **оптронами**. Самый простой оптрон содержит светоизлучающий диод и фотодиод в качестве приемника сигнала. Вместо фотодиодов также используются фототранзисторы, фототиристоры и др. Более сложные оптроны могут иметь в своем составе много каналов, различные усилители, формирователи, коммутаторы и др.

Оптрон практически нечувствителен к внешним полям, имеет малые габариты. Характеристики изоляции: $C_{\Pi} = 0,5 \div 2$ пФ, $U_{пр} \approx 1 - 10$ кВ. Время задержки оптрона – порядка 50-80 нс.

Собственная емкость светодиода вместе с ограничительным резистором образуют фильтр нижних частот, который ослабляет ВЧ помехи, проходящие через оптрон (рис. 5.8).

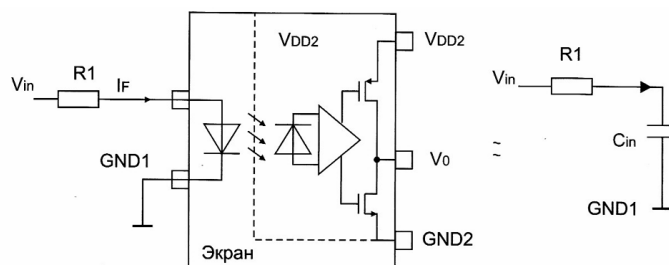


Рис. 5.8 – Функциональная схема оптрона и эквивалентная схема входной цепи

Фирма NVE (США) предлагает развязывающие микросхемы, в которых используется магниторезистивный эффект, возникающий в GMR материалах («Инженерная микроэлектроника» №2, №3 2003 г.). Такие устройства по быст-

родействию (задержка порядка 30 нс), потреблению и габаритам превосходят оптоизоляторы.

Пример развязки цепей питания в измерительном устройстве показан на рисунке 5.9.

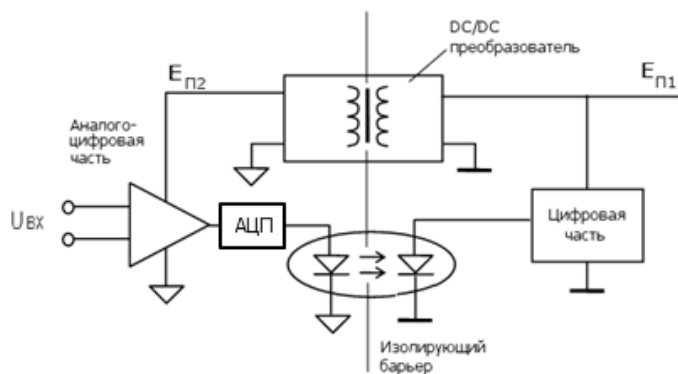


Рис. 5.9 – Опторазвязка в измерительном устройстве

5.6 Электрическая фильтрация

Фильтрация является основным средством ослабления кондуктивных помех, которые считаются наиболее опасными из всех видов ЭМП. По области применения помехоподавляющие фильтры делятся на *сетевые и информационные*. Сетевые фильтры используются в цепях питания, а информационные – в цифровых и аналоговых устройствах передачи и обработки информации.

По виду частотной характеристики различают 4 основных вида фильтров: *ФНЧ, ФВЧ, полосовой и режекторный* фильтры.

5.6.1 Параметры фильтров

Фильтр выделяет из сложного электромагнитного колебания, подаваемого на его вход, частотные составляющие, находящиеся в заданной полосе пропускания, и подавляет частотные составляющие в заданной полосе задержания (подавления). Большинство применяемых фильтров относится к ФНЧ, которые пропускают низкочастотный полезный сигнал и ослабляют ВЧ сигнал помехи (рисунок 5.10), поэтому ниже рассматриваются только фильтры этого типа.

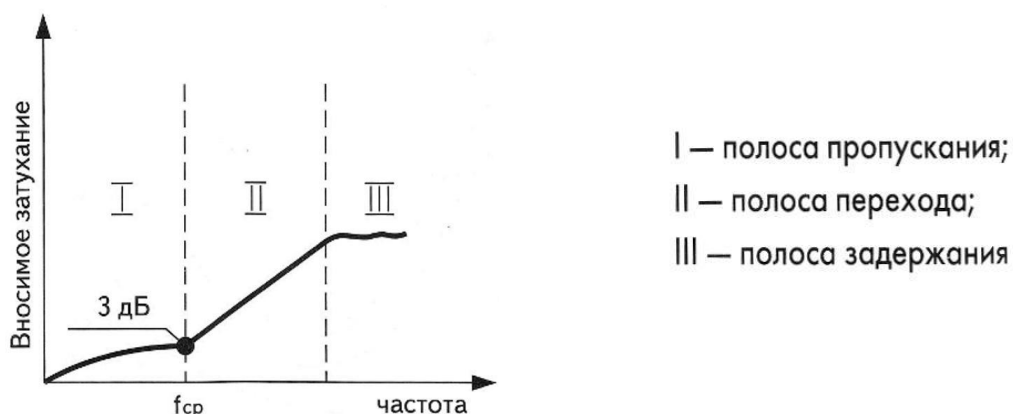


Рисунок 5.10 – Вид АЧХ ФНЧ

Частота среза $f_{ср}$ является частотой начала фильтрации. Её практические значения находятся в диапазоне от очень низких частот (менее 1 кГц) для сетевых фильтров, и до частот СВЧ-диапазона в информационных фильтрах. В последнем случае частота $f_{ср}$ обычно выбирается примерно на октаву выше частоты полезного сигнала (чтобы сохранить форму полезного сигнала).

Основными показателями эффективности фильтра является уровень вносимых потерь в полосе задержания (измеряется в дБ) и крутизной АЧХ в полосе перехода (измеряется в дБ на декаду или на октаву). Чем больше эти показатели, тем выше эффективность подавления ЭМП.

Вносимые потери выражаются в дБ следующим образом:

$$S = 20\lg |U_1/U_2| \quad \text{или} \quad S = 20\lg |I_1/I_2|, [\text{дБ}]$$

где **U₁, I₁** – напряжение и ток нагрузки без фильтра;

U₂, I₂ – напряжение и ток помех на нагрузке, если фильтр включён.

Для некоторых применений для фильтра актуальны фазочастотная и переходная характеристика.

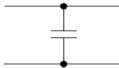
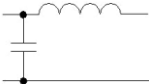
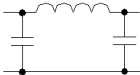
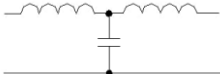
Как и любой другой электрорадиоэлемент фильтр характеризуется электрическими параметрами (допустимые напряжения и токи), массогабаритными характеристиками, надёжностью, стоимостью, особенностями монтажа в изделии и др.

5.6.2 Конфигурации и применение ФНЧ

В общем случае действие ФНЧ основано на отражении и частичном поглощении ЭМП в индуктивности и емкости. Для эффективного отражения ВЧ-составляющих напряжения необходимо, чтобы емкостное сопротивление фильтра было минимальным. Поглощение ЭМП в фильтре происходит за счет магнитных потерь в индуктивности и диэлектрических потерь в конденсаторе.

Наиболее простыми конфигурациями ФНЧ являются фильтры следующих типов: «С», «Г», «П» и «Т». В таблице 5.1 приведены их схемы, требования к источнику сигнала и к нагрузке, достижимые значения наклона АЧХ.

Таблица 5.1

Тип фильтра	Схема фильтра	Импеданс		Достижимый наклон АЧХ, db/дек
		источника	нагрузки	
С-фильтр		Высокий	Высокий	20
Г-фильтр		Низкий	Высокий	40
		Высокий	Низкий	
П-фильтр		Высокий	Высокий	60
Т-фильтр		Низкий	Низкий	60

Фильтр типа «С» представляет собой проходной или опорный конденсатор. Он, как принято говорить, шунтирует помеху на землю. Чаще всего такой фильтр используется для ослабления ВЧ помех в цепях питания постоянного тока.

Фильтры типа «Г» рекомендуется применять в тех случаях, когда импедансы источника и нагрузки сильно отличаются друг от друга.

Фильтр типа «П» рекомендуется использовать при высоких сопротивлениях источника и нагрузки.

Фильтр типа «Т» рекомендуется применять в цепях коммутации, а также в цепях с низкими импедансами входа и выхода.

Рекомендации по выбору и применению фильтра:

1) Фильтр должен быть включен так, чтобы конденсатор был обращен к высокому импедансу, а индуктивность – к низкому. Однако если существует вероятность перенапряжений на входном конденсаторе, на входе фильтра рекомендуется все же устанавливать индуктивность.

2) Каждый добавленный в фильтр элемент увеличивает крутизну АЧХ примерно на 20 дБ/дек., с каждым добавленным элементом её вершина сдвигается влево. Например, если к четырехэлементному фильтру добавить еще один элемент, то наклон его АЧХ увеличится с 80 дБ/дек до 100 дБ/дек (рис. 5.11).

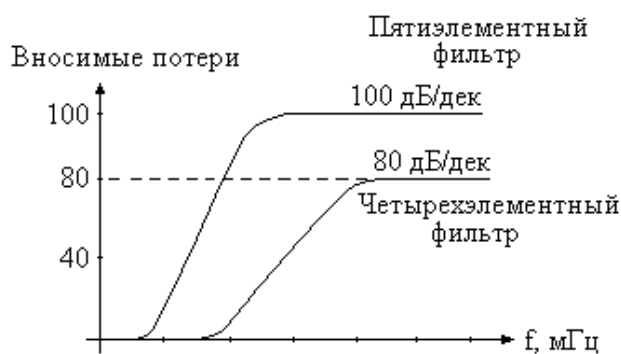


Рис. 5.11

3) Электрическая емкость конденсатора определяет основные параметры ФНЧ. Чем больше ее величина, тем ниже $f_{ср}$, выше уровень вносимого затухания и крутизна АЧХ в переходной области. Однако применение фильтров с большой емкостью в цепях импульсных сигналов вызывает искажение формы выходных импульсов, а также частотные и фазовые искажения входных импульсов.

4) При компоновке устройства фильтр необходимо размещать по возможности ближе к источнику помех.

5) Фильтр рассеивает энергию в виде тепла и электромагнитного поля, поэтому для него может потребоваться экранирование и дополнительное охлаждение.

5.6.3 Компоненты фильтров

Факты

Пассивные электронные компоненты (ПЭК) в составе современных электронных средств имеют долю по стоимости 2-3%, а по количеству – порядка 70%.

В материнской плате компьютера используется примерно 800-1000 ПЭК, из них порядка 50% керамических конденсаторов и около 40% - резисторов.

В мобильных телефонах ПЭК составляют примерно 90% от общего числа компонентов, т.е. 400-500 штук, в том числе около 250 конденсаторов.

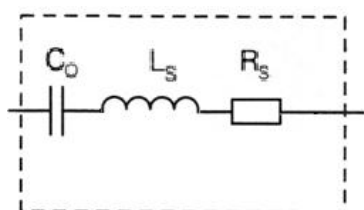
Конденсаторы.

В фильтрах используются конденсаторы следующих типов:

- оксидные (электролитические);
- керамические;
- пленочные конденсаторы (полиэтилентерефталатные, полипропиленовые, поликарбонатные и др).

В силу ряда преимуществ наибольшее применение находят керамические конденсаторы, поэтому будем рассматривать конденсаторы только этого типа.

Керамические конденсаторы общего применения, имеющие выводы и соответственно значительную паразитную индуктивность не эффективны как фильтры на частотах, превышающих 3 МГц. На рис. 5.12 приведена простейшая эквивалентная схема замещения конденсатора.



C_0 – номинальная ёмкость;

L_s – паразитная индуктивность;

R_s – характеризует активные потери в конденсаторе;

Рис. 5.12 – Эквивалентная схема замещения конденсатора

Наличие паразитной индуктивности приводит к появлению собственной резонансной частоты f_c – максимальной частоты, на которой конденсатор работает эффективно. Зависимость импеданса конденсатора от частоты приведена на рис.5.13. Для идеального конденсатора эта зависимость имеет вид прямой линии, а для реального – вид резонансной кривой.

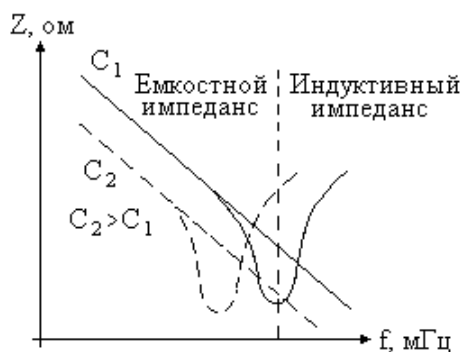
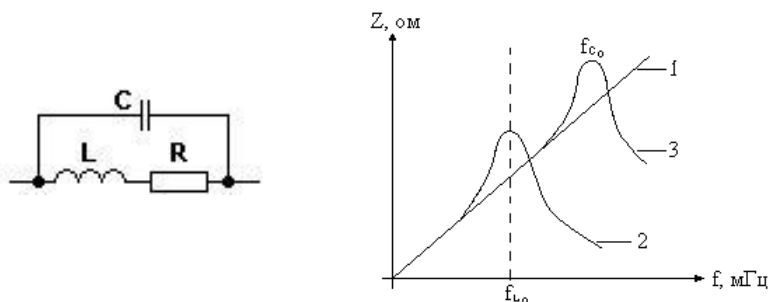


Рис. 5.13 – Импеданс конденсатора в зависимости от частоты

Собственная частота конденсатора определяется по известной формуле

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_s \cdot C_0}}$$

Катушки индуктивности (КИ) также значительно отличаются от идеальных (рис.5.14).



L – номинальная индуктивность, R – сопротивление обмотки (активные потери), C – собственная емкость КИ

Рис. 5.14 – Эквивалентная схема КИ

Если LC – фильтр работает на частотах $f_L > f < f_c$, то он может быть достаточно эффективен (вносимые потери фильтра увеличиваются с ростом частоты); если не выполняется одно из неравенств, то ослабление перестаёт расти с увеличением частоты; если же не выполняются оба неравенства, то ослабление LC - фильтра уменьшается пропорционально $1/f^2$.

Для повышения эффективности фильтров особенно на высоких частотах используются специальные типы компонентов – *опорные* и *проходные кон-*

денсаторы, а вместо КИ – ферритовые устройства (безобмоточные катушки).

Опорные конденсаторы – это конденсаторы, одним из выводов которого является опорная металлическая пластина с резьбовым или паяным креплением (рис. 5.15, а)

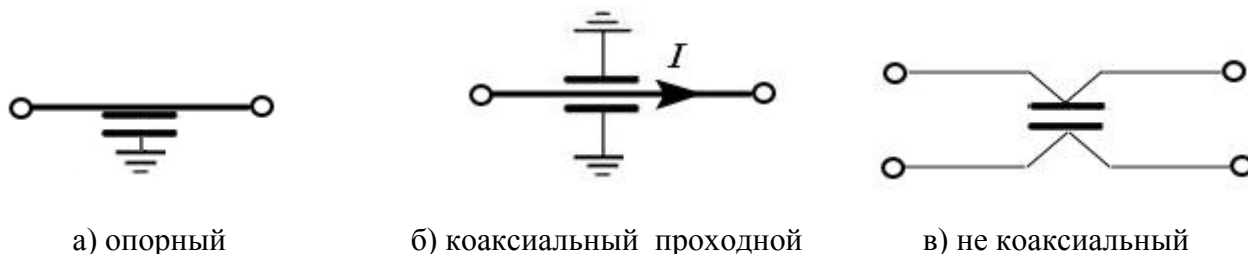


Рисунок 5.15 – Схемы опорного и проходного конденсаторов.

Опорные навесные конденсаторы работают эффективно на частотах до 30...50 МГц. Примеры марок таких конденсаторов: КО, КДО.

Прходные конденсаторы (ПК) бывают двух типов: коаксиальные и не коаксиальные.

Принцип построения коаксиального ПК показан на рис. 5.15, б. Такие конденсаторы используются в тех случаях, когда требуется обеспечить шунтирование нежелательной ЭМП в широком частотном диапазоне (до нескольких ГГц). Здесь одним из лучших являются дисковые конденсаторы (рис. 5.16). Достоинства этих конденсаторов: высокое значение f_c , большая удельная ёмкость и износоустойчивость, малая чувствительность к механическим воздействиям и влажности. Особое распространение эти конденсаторы получили там, где вес, ёмкость и надёжность имеют первостепенное значение.



Рисунок 5.16 – Дискоидальный конденсатор (а) и его применение в конструкции проходного конденсатора (б).

Не коаксиальные ПК имеют симметричную конструкцию (рис. 5.17, в). Они используются в двухпроводных линиях до частот порядка 100 МГц. Пример: К73-21.

5.7 Подавление сетевых помех

По современным стандартам радиоэлектронные и электротехнические устройства, которые могут создавать сетевые помехи или чувствительные к ним, должны снабжаться устройством подавления сетевых помех (УПСП). В минимальной конфигурации он содержит только сетевой фильтр, однако, более эффективные УПСП имеют также устройство защиты от перенапряжений (ограничитель напряжения).

Сетевые фильтры. В электрических сетях питания имеются симметричные и несимметричные пути распространения помех. Рассмотрим схему на рисунке 5.17.

Как и питающий ток, ток помех может протекать по основному и обратному проводам в разных направлениях. В этом случае помеху принято называть *дифференциальной* или *симметричной*.

Вместе с этим из-за наличия паразитных связей через емкости C_{Π} в обоих проводниках протекают токи в одном направлении, и возвращаются к источнику через земляную шину. Помехи этого вида называется *синфазными* или *ассиметричными*.

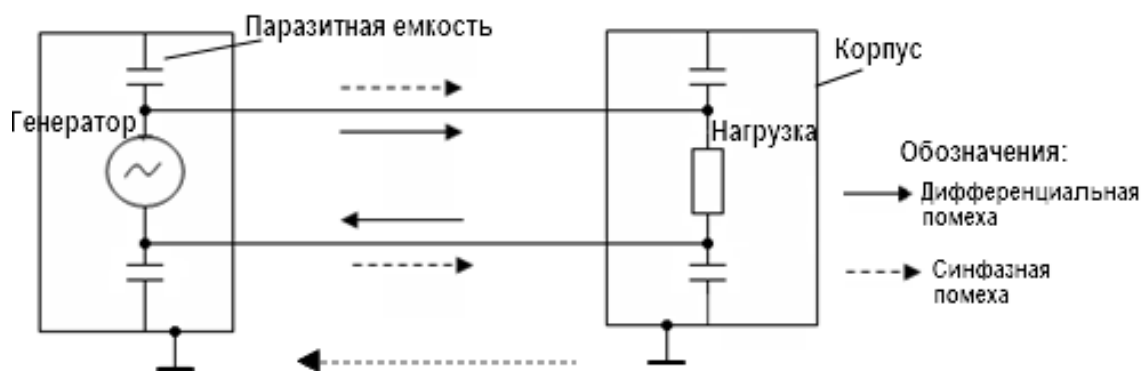


Рис. 5.17 – Распространение синфазной и дифференциальной помехи

При больших токах в сетевых фильтрах чаще всего используются катушки на кольцевых сердечниках, т.к. они имеют относительно малые размеры. В схеме, изображенной на рисунке 5.18, применен дроссель с компенсацией токов (синфазный дроссель), у которого обмотки включены согласно. Достоинство такого дросселя заключается в небольших габаритах и в отсутствии насыщения сердечника.

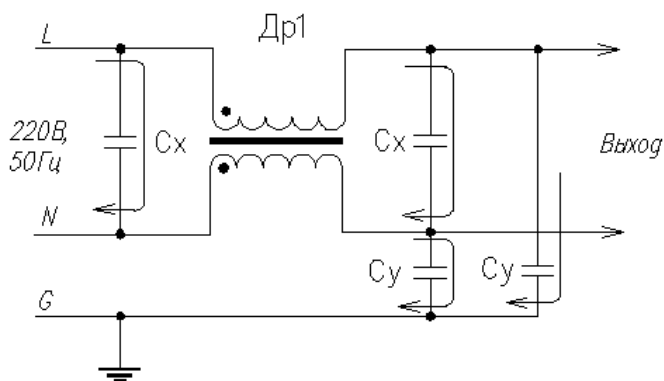


Рис. 5.18 – Типовая схема сетевого фильтра для 3-х проводной сети

Дроссель Др1 фактически **ослабляет только синфазную помеху**, поскольку магнитные потоки в сердечнике, вызванные рабочим током и током дифференциальной помехи, компенсируются (благодаря согласному способу намотки), и сопротивления его обмоток практически является омическим. **Дифференциальная помеха** ослабляется с помощью конденсаторов большой емкости C_x , которые включены в фильтре симметрично. Большая индуктивность дросселя Др1 (для синфазной помехи) и два конденсатора C_y , подключенные к земле, являются фильтром синфазных помех.

В сетях питания в качестве фильтров нередко используются дроссели, выполненные на ферритовых сердечниках (Ferrite Beads – ферритовая бусина). На рисунке 5.19 показан фильтр, выполненный на сердечнике кольцевой формы, и его импедансная характеристика.

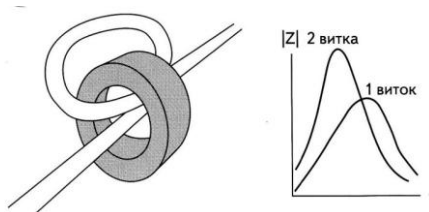


Рис. 5.19 – Разновидности дросселя типа Ferrite Beads

Широкое применение находят ферритовые фильтры разъемной конструкции для установки на изолированный кабель.

Доп. информация по X, Y конденсаторам.

X и Y конденсаторы – обозначение конденсаторов, используемых в силовых цепях в основном для фильтрации помех, принятое во многих международных стандартах. Эти конденсаторы должны иметь высокое напряжение пробоя, так как от них, в первую очередь, зависит безопасность работы изделия. Если пробой и произойдет, то он не должен привести к замыканию вы-

водов конденсатора. Пробой Y-конденсатора не должен приводить к поражению электрическим током. При номинальном рабочем напряжении 350...400 В (обозначено на корпусе или записано в документации) они должны выдерживать 3...8 кВ.

Устройства защиты от импульсных перенапряжений.

Основными причинами возникновения импульсных перенапряжений являются:

- молнии, возникающие при грозе;
- переходные процессы при переключении емкостной или индуктивной нагрузки;
- электростатический разряд.

Удар молнии характеризуется токами порядка 200 кА, длительностью импульса 1-500 мкс, напряжением порядка 100 кВ. Даже при наличии молниеотвода примерно 10 % ее энергии проникает в электрические сети здания.

Электростатический разряд (ESD) возникает при трении. Накопленный таким образом заряд может достигать десятков тысяч вольт.

Для защиты от перенапряжений используется в основном три вида приборов: газоразрядные устройства (разрядники), специальные ограничительные диоды (tvс-диоды), варисторы. В самом общем виде принцип действия этих приборов состоит в замыкании на землю мощных импульсов тока и рассеивание их энергии в окружающем пространстве.

Разрядник представляет собой стеклянную или керамическую трубку, заполненную аргоном или неоном и имеющую электроды, сделанные из специального сплава. Когда к нему прикладывается высокое напряжение со скоростью нарастания 1 кВ/мкс и выше, в трубке возникает разряд. Среди рассматриваемых устройств разрядник способен пропускать самые большие токи – до 100 кА. Однако и время его реакции самое большое – не менее 0,15 мкс, поэтому он не может защитить полупроводниковые приборы и микросхемы. Разрядник склонен к деградации. Применяется в ЭС в качестве первой ступени защиты от разрядов молнии.

Металлооксидные варисторы срабатывают в десятки раз быстрее, чем разрядники (типовое время срабатывания – 25 нс). Варистор – это резистор с сопротивлением, зависящим от приложенного напряжения. При повышении напряжения выше номинального сопротивление варистора резко возрастает, ограничивая сигнал до величины остаточного напряжения (табл. 5.2). Варистор способен пропускать ток до 40-80 кА, отличается низкой стоимостью. Его недостатком является старение после каждого разряда, что сокращает его

срок службы до нескольких лет. Кроме этого, варистор обладает большой емкостью (до 1000 пФ). Применяется в качестве первой или второй ступени защиты устройства, а также для защиты отдельных компонентов непосредственно на печатной плате.

Ограничительный диод (*tvs - diode*) работает по принципу стабилитрона, но отличается от него высоким быстродействием и способностью пропускать большие токи. Ограничительные диоды не склонны к деградации. Высокое быстродействие и низкое напряжение ограничения позволяют использовать их для защиты от переходных процессов радиочастотные узлы, п/п приборы и микросхемы.

Обобщенные характеристики защитных приборов приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Прибор	Диапазон номинальных напряжений, В	Время срабатывания, нс	Максимальная амплитуда импульса тока, кА
Разрядник	$75 \dots 10^5$	250	40
Варистор	$18 \dots 2 \cdot 10^3$	25	20
TVS- диод	$5 \dots 450$	10^{-3}	1

На рисунке 5.20 приведен пример схемы сетевого фильтра с многоступенчатым устройством защиты. Он включается между трехпроводной сетью и блоком питания ЭС. Выводы сети обозначены: L – «фаза», N – «ноль», PE – «защитная земля». Если вывод PE по какой-то причине не подключен, то эффективность устройства значительно снижается.

Предохранители *FU1*, *FU2* повышают надежность схемы, т.к. срабатывают при токах, которые являются недопустимо большими для последующих ступеней защитной схемы.

Кратковременные помехи, неспособные вызвать срабатывание разрядника *F1*, будут ослаблены дросселем *L4* и поглощены двухсторонним tvs-диодом *VD2*. Бусинковый дроссель *L1*, представляющий собой ферритовый цилиндр, одетый на сетевой кабель подавляет синфазные помехи (рис. 5.20).

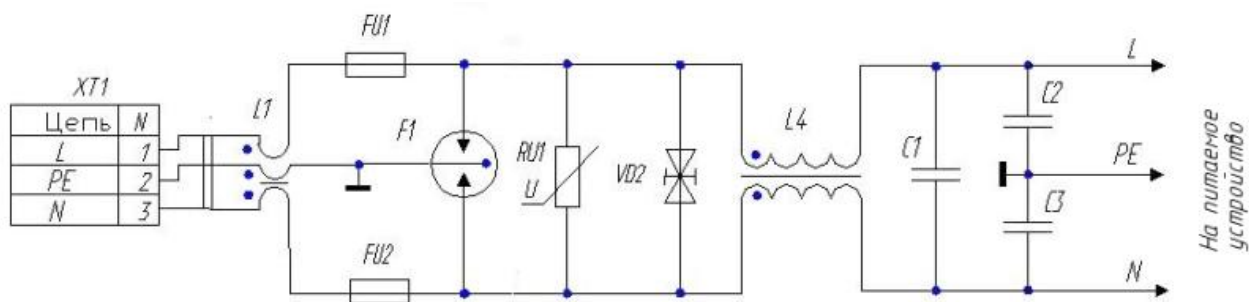


Рис. 5.20 – Типовая схема фильтра с защитой от перенапряжений сетевого ИП

5.8 Помехи в шинах питания цифровых схем

Под "шинами питания" будем понимать провода U_{cc} и "земли".

Причинами возникновения помех в шинах питания являются:

- генерация импульсных помех при коммутации самих цифровых ИС;
- проникновение помех от других устройств, например, от источника питания.

Рассмотрим генерацию помех в К-МОП логической схеме, схема которой представлена на рисунке 5.21.



Рис. 5.21 – Логическая схема К-МОП

При переключении логического элемента в цепи питания возникает короткий импульс тока в момент, когда оба транзистора выходного каскада открыты. Это показано на верхнем графике рисунка 5.22. Амплитуда импульса ограничивается только сопротивлениями каналов открытых транзисторов р-МОП и n-МОП.

В результате действия импульса тока на шинах питания, обладающих определенным импедансом, возникают импульсы падения напряжения:

на проводнике питания возникает провал напряжения, а на проводнике "земля" – подскок напряжения.

На практике величина провала может оказаться настолько большой, что напряжение U_{cc} выйдет за поле допуска на интервале времени Δt_{Π} , на котором снижается помехозащищенность микросхемы, и ее работоспособность не гарантируется (рис. 5.22).

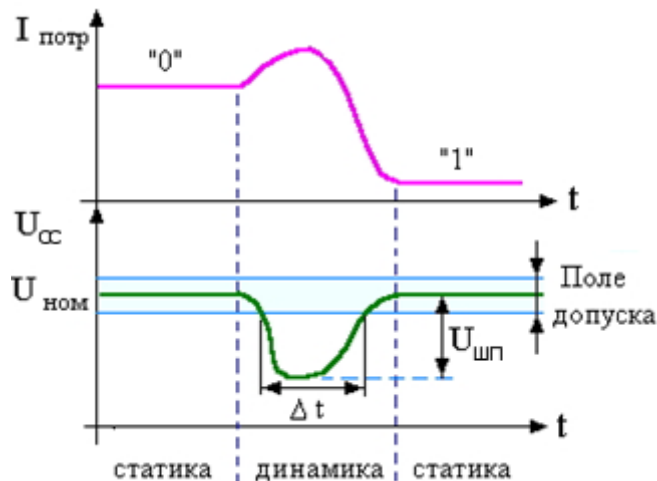


Рис. 5.22 – Переключение логического элемента

Подскок напряжения на проводе "земля" является причиной возникновения импульса напряжения во время переключения вентиля из 1 в 0. Этот импульс суммируется с выходным сигналом логического элемента (ЛЭ) и может привести к тому, что последующий за ним ЛЭ воспримет суммарный сигнал как логическую единицу, что приведет к сбою в работе всего узла.

Образование суммарного сигнала на входе ЛЭ2 поясняется на рисунке 5.23. Из приведенной схемы следует, что напряжение на входе ЛЭ2 является алгебраической суммой полезного сигнала $U_{ВЫХ.ЛЭ1}$ и падения напряжения на проводе возврата тока U_Z , которое по существу является помехой:

$$U_{ВХ.Д2} = U_{ВЫХ.Д1} - U_Z.$$

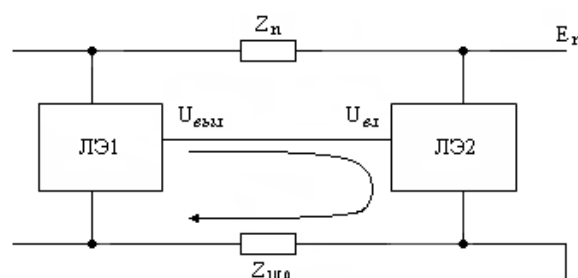


Рис. 5.23

Наиболее опасной составляющей напряжения U_Z является напряжение на индуктивности провода $U_L = L(di/dt)$, т.к. оно в быстродействующих схемах существенно превосходит напряжение на активном сопротивлении ($U_R = I_Z \cdot R_Z$). Как мы видим, U_L зависит не только от индуктивности провода, но и от скорости изменения тока в нем (di/dt). Последняя величина определяется быстродействием микросхемы: чем оно больше, тем скорость выше. Выкладки, сделанные для наиболее вероятных ситуаций, показывают, что **самым критичным параметром цепей питания является индуктивность проводников, причем, с ростом быстродействия ИС роль индуктивности возрастает.**

Картина ухудшается в том случае, когда одновременно переключается много цифровых схем, например, при записи информации в параллельный регистр памяти.

Основным способом снижения индуктивности является уменьшение длины и увеличение площади сечения проводника. При этом влияние ширины на индуктивность проводника больше, чем влияние толщины.

На рисунке 5.24 демонстрируется влияние формы сечения на индуктивность.

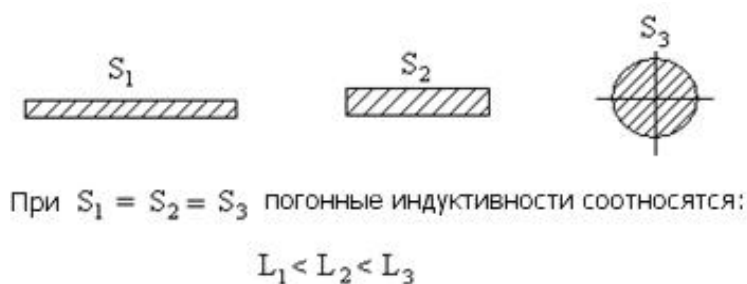


Рис. 5.24 – Влияние формы сечения проводника на погонную индуктивность

Таким образом, для снижения индуктивности печатного проводника в первую очередь необходимо уменьшать длину и увеличивать ширину этого проводника.

Шины питания на печатной плате особенно "земляная" по возможности должны занимать всю свободную от сигнальных проводников площадь, образуя так называемый полигон (рис. 5.25).

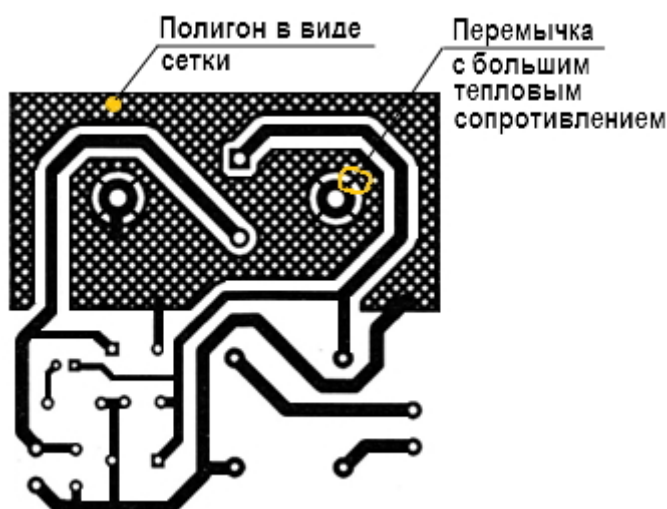


Рис. 5.25 – Плата с "землей" в виде полигона.

На практике к проводникам питания подсоединяется не одна, а множество микросхем. Токи потребления от всех ИС объединяются (суммируются) на общей шине и поэтому провалы напряжения и помехи в проводниках питания существенно возрастают. Эта проблема в значительной степени решается минимизацией длин общих участков шины питания. На рис. 5.26 приведен пример правильной и нежелательной разводки шины питания на плате. На рис. 5.26,а все микросхемы соединены одной шиной питания, которая имеет большую длину. На рис. 5.26,б шина разделена на две части, которые соединяются между собой только вблизи электрического соединителя, причем вводов питания не один, а два. Также важно располагать проводники питания (прямой и обратный) как можно ближе друг к другу.

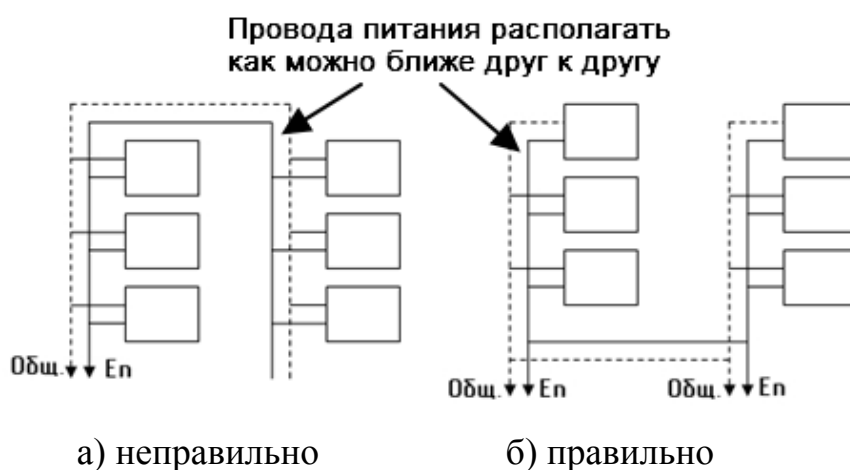


Рис. 5.26 – Разводка шин питания на плате

В многослойных печатных платах под шины питания, как правило, выделяются отдельные слои. Структура простейшей МПП приведена на рис. 5.27.

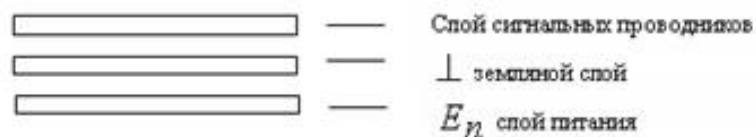
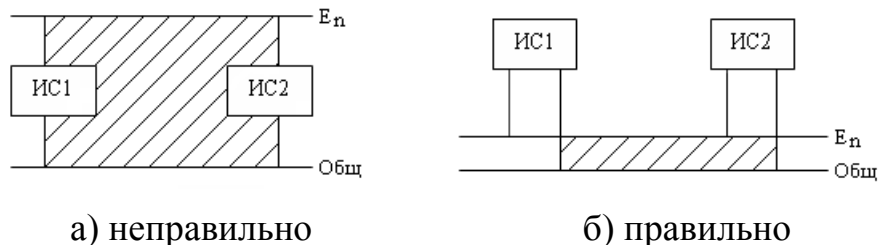


Рис. 5.27 – Типовая структура МПП



а) неправильно

б) правильно

Рис. 5.28

На рисунках 5.28,а приведен нежелательный вариант размещения проводников: в этом случае образуется контур с большой площадью (заштрихован), который является хорошей антенной (будет принимать и излучать помехи). Наводимый внешним полем ток в этом контуре прямо пропорционален величине ($S \cdot \cos \alpha$), где α – угол между плоскостью контура и линиями внешнего магнитного поля, S – площадь контура.

Другой вариант размещения (рис. 5.26,б) предпочтителен по двум причинам:

- во-первых, он характеризуется меньшей площадью контура;
- во-вторых, ввиду близкого расположения проводников и разнонаправленности токов в них происходит уменьшение индуктивности шины (эффект компенсации).

Таким образом, при разработке топологии платы необходимо максимально сближать шины питания и земли.

Кроме оптимизации топологии шин питания эффективным способом снижения помех, возникающих в них, является применение блокировочных (байпасных) конденсаторов. Существует несколько версий, объясняющих принцип действия этих конденсаторов с различных точек зрения:

- конденсатор, включенный между проводами питания, играет роль фильтра, который подавляет ВЧ помехи в шине;

- конденсатор, установленный рядом с микросхемой, является индивидуальным источником питания для неё и поэтому эффективная длина каждого из проводников питания мала, т.к. в этом случае она равна расстоянию между выводами конденсатора и выводами микросхемы;

- конденсатор, включенный между проводами питания, уменьшает скорость изменения тока $\frac{dI_z}{dt}$ в шине питания.

Анализ этих версий позволяет предъявить требования к байпасному конденсатору:

- на частотах основных помех конденсатор должен иметь минимальное емкостное сопротивление;

- для каждой микросхемы желательно предусмотреть свой индивидуальный конденсатор (из-за высокой цены конденсаторов реализуется нечасто);

- конденсатор должен располагаться как можно ближе к выводам питания микросхемы;

- соединения конденсатора с микросхемой (например, печатные проводники) должны иметь минимальную индуктивность.

Перечисленным требованиям в наибольшей степени отвечают керамические конденсаторы. Их эффективность зависит от числа расположения на ПП, величины емкости у каждого конденсатора, паразитной индуктивности конденсатора и соединительных проводников. Не рекомендуется использовать конденсаторы с длинными выводами и гр. НПО. Эффективность байпасного конденсатора зависит от его конструкции и метода монтажа на плату (рис. 5.29).

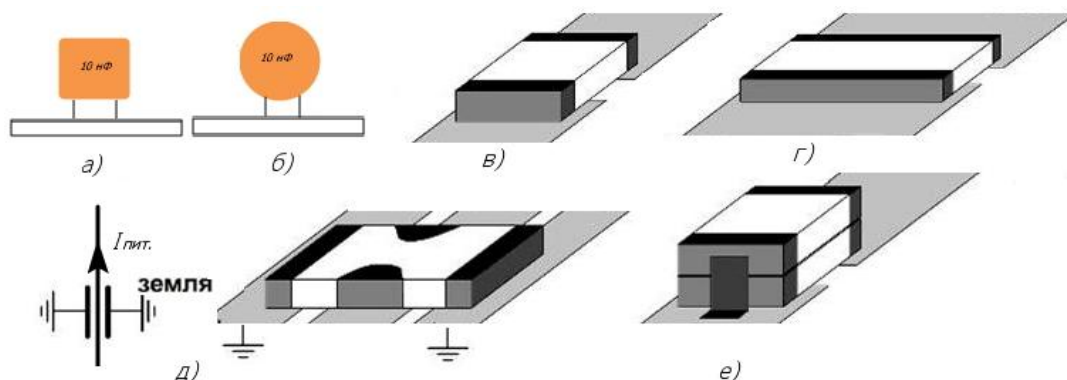


Рисунок 5.29

Керамический конденсатор прямоугольной формы с проволочными выводами (рис. 5.29, а) – самый неэффективный вариант среди всех представленных на рисунке, т.к. он обладает наибольшей собственной индуктивностью (табл. 5.3). Немного лучшими характеристиками обладают дисковые керамические конденсаторы (рис. 5.29,б). В современных конструкциях чаще всего используются чиповые конденсаторы (рис. 5.29,в-е), которые благодаря отсутствию проволочных выводов имеют небольшие паразитные индуктивности. Специальный конденсатор с коэффициентом формы меньше 1 (длина меньше ширины) обладает пониженной индуктивностью по сравнению со стандартным конденсатором (рис. 5.29,г и 5.29,в, соответственно). Еще меньшей индуктивностью (**порядка 0,2 нГ**) обладают специальные трехвыводные (проходные) чип-конденсаторы (рис. 5.29,д).

В таблице 5.3 приведены значения паразитных индуктивностей для некоторых типов конденсаторов.

Таблица 5.3 – ESL керамических конденсаторов

Конструкция конденсатора	ESL _{min} , нГн	ESL _{max} , нГн
<i>Чип-конденсаторы</i>		
0402	0,54	1,90
0603	0,54	1,95
0805	0,70	1,94
1206	1,37	2,26
1210	0,61	1,55
1812	0,91	2,25
<i>С радиальными выводами</i>	6,0	15,0
<i>С осевыми выводами</i>	12,0	20,0

Повысить эффективность байпасного фильтра можно, если соединить параллельно два или более одинаковых конденсатора, как показано на рис. 5.29,е. **В этом случае емкость увеличивается вдвое, а индуктивность во столько же раз снижается.** Графики на рис. 5.30 демонстрируют эффект, который можно получить, при параллельном включении одинаковых конденсаторов.

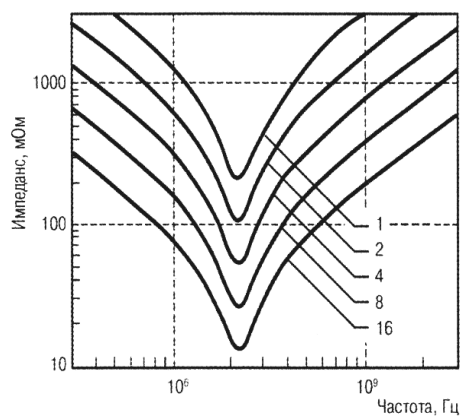


Рис. 5.30 – Импедансные характеристики при параллельном включении 1,2,4,8 и 10 конденсаторов одинаковой емкости

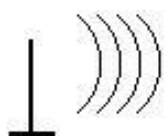
5.9 Экранирование в конструкциях ЭС

Экранирование – в общем случае это приём ослабления нежелательного поля до приемлемого уровня в некотором ограниченном объеме.

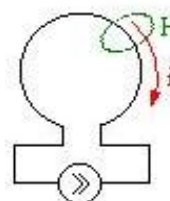
Использование экранирования приводит к увеличению массы и стоимости и к ухудшению технологичности изделия. Поэтому экранирование – это вынужденная мера, которая применяется, если исчерпаны другие возможности обеспечения ЭМС конструкции.

5.9.1 Ближняя и дальняя зоны

В непосредственной близости от источника помех электромагнитное поле определяется внутренними свойствами самого источника. Элементарный источник помех можно представить в виде штыря (рис. 5.31,а) или в виде петли (рис. 5.31,б).



а)



б)

Рис. 5.31 – Элементарные источники помех

Вблизи штыря формируется интенсивное электрическое поле (ЭП), и относительно слабое магнитное поле (МП). Поэтому получается, что волновое сопротивление $Z = E/H$ около источника большое (порядка 3000 Ом). Моделью в виде штыря можно представить штыревую антенну, вывод ЭРЭ, незамкнутый печатный проводник и др. токопроводящие элементы конструкции.

Вблизи петлевого источника, в противоположность предыдущему случаю, наблюдается интенсивное магнитное поле и слабое электрическое поле, поэтому такой источник характеризуется **малым волновым сопротивлением** (около 30 Ом).

При удалении от любого из рассмотренных источников волновое сопротивление среды стремится к волновому сопротивлению свободного простран-

ства – **377 Ом** (рисунок 5.30), поэтому рано или поздно наступает режим распространения **плоской электромагнитной волны (ПЭВ)**.

Считается, что при расстоянии равном **$\lambda/2\pi$** , где λ – длина волны синусоидального колебания, ПЭВ полностью сформирована и волновое сопротивление для нее составляет 377 Ом. Наличие границы $r=\lambda/2\pi$ позволяет разделить всю область распространения электромагнитных волн на две зоны – рисунок 5.32 (при более строгом анализе – на три зоны).

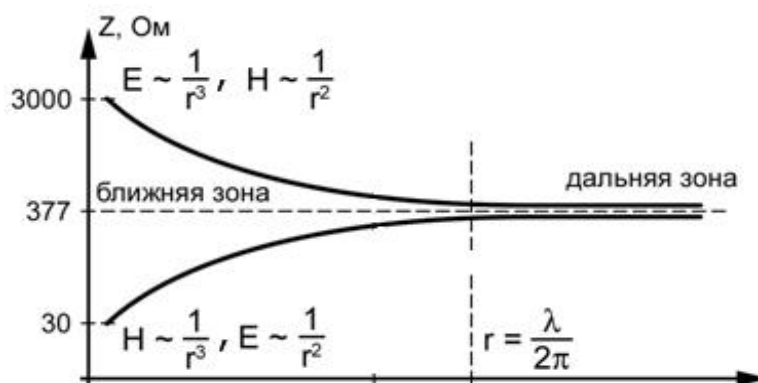


Рис. 5.32 – Изменения волнового сопротивления в зависимости от расстояния до источника

Область, охватывающая расстояния от 0 до значения $\lambda/2\pi$ называется **ближней зоной (зоной индукции)**. Здесь **наблюдается достаточно чёткое разделение на магнитную и электрическую составляющие поля, что на практике требует отдельного рассмотрения электрического и магнитного экранирования.**

На краю ближней зоны ближе к ее границе происходит формирование ПЭВ, поэтому иногда эту неширокую область называют **переходной зоной**.

В **дальней зоне (зона распространения)**, которая начинается от $r = \lambda/2\pi$ и продолжается до бесконечности, распространяется ПЭВ. Электромагнитное поле отрывается от источника и распространяется в пространстве с постоянным волновым сопротивлением. Поэтому в этой зоне поле абсолютно одинаково по своей структуре (соотношение между **Е** и **Н**) для любого источника.

Таким образом, при анализе экранирования необходимо разделять задачи локализации электрического, магнитного и электромагнитного полей.

К сожалению, тип источника известен только в частных случаях, поэтому экранирование в ближней зоне требует априорных знаний свойств источника. В дальней же зоне тип источника не имеет значения, т.к. в любом случае мы будем иметь дело с ПЭВ.

Справка: длину волны в свободном пространстве с точностью порядка 0,07% можно определить по формуле $\lambda [\text{м}] = 300/f [\text{МГц}]$.

Примеры:

на частоте $f=3 \text{ МГц}$ (КВ диапазон) $\lambda=100 \text{ м}$, $r=15,9 \text{ м}$;

на частоте $f=100 \text{ МГц}$ (FM диапазон) $\lambda=3 \text{ м}$, $r=0,48 \text{ м}$.

5.9.2 Электрические параметры среды

Волновое сопротивление

Все однородные материалы характеризуются собственным волновым сопротивлением:

$$Z_i = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (5.2)$$

где: ω – круговая частота, на которой определяется волновое сопротивление;

$\mu = \mu_0\mu_r$ – магнитная проницаемость среды,

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – абсолютная магнитная проницаемость свободного пространства (воздуха),

μ_r – магнитная проницаемость среды относительно свободного пространства (воздуха);

$\sigma = \sigma_{\text{Cu}} \sigma_r$ – удельная проводимость материала, σ_{Cu} – удельная проводимость меди, σ_r – проводимость материала относительно меди;

$\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ – диэлектрическая проницаемость среды,

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, $\epsilon_0 = 0.85 \text{ пФ/м}$,

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды (относительно воздуха).

Для воздуха, у которого проводимость σ очень мала ($\sigma \ll \omega\varepsilon$), имеем:

$$Z_a = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377, \text{ Ом}$$

У металлов удельная проводимость очень высокая ($\sigma \gg \omega\varepsilon$), поэтому формулу (5.2) можно упростить. В инженерной практике удобно использовать формулу:

$$|Z_m| = 369 \sqrt{f \frac{\mu_r}{\sigma_r}}, \text{ мкОм/квadrat} \quad (5.3)$$

где f – частота, МГц;

σ_r – проводимость материала относительно меди;

μ_r – относительная магнитная проницаемость.

Вывод: собственное волновое сопротивление воздуха чисто резистивная константа, тогда как у металла в эту величину входят и резистивная, и индуктивная составляющие.

Толщина скин-слоя в металлах

Толщина скин-слоя находится из выражения:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (5.4)$$

Для удобства применения в инженерной практике используются преобразованные выражения:

$$\delta = \frac{66}{\sqrt{f}}, \text{ мкм, (для меди } \mu_r = \sigma_r = 1),$$

$$\delta = \frac{66}{\sqrt{\mu_r \sigma_r f}}, \text{ мкм, (для любого металла),}$$

где f – частота, МГц.

Параметры наиболее распространенных металлов, применяемых для изготовления экранов, приведены в таблице 5.3.

Пятая колонка этой таблицы содержит параметр $\sqrt{\sigma_r/\mu_r}$, который характеризует ослабление (относительно меди) электромагнитной волны за счет отражения. **Чем больше это отношение, тем больше ослабление ПЭВ.** Немагнитные материалы по этому параметру превосходят практически все магнитные материалы. Для тонких материалов потери при отражении это единственное значимое слагаемое полной эффективности экрана. **В этом случае следует выбрать немагнитный материал с высокой проводимостью.**

В четвертой колонке приведен параметр $\sqrt{\sigma_r\mu_r}$, который характеризует потери в экране в результате поглощения металлом энергии ПЭВ. **Чем больше это произведение, тем больше ослабление.**

Таблица 5.3 - Относительная проводимость и магнитная проницаемость металлов

Металл	Относительная проводимость σ_r	Магнитная проницаемость μ_r при $f \leq 10$ кГц	$\sqrt{\sigma_r\mu_r}$ поглощение	$\sqrt{\sigma_r/\mu_r}$ отражение
1	2	3	4	5
Немагнитные металлы				
Серебро	1,064	1	1,03	1,03
Медь (литая)	1,00	1	1	1
Медь (напыление)	0,10	1	0,32	0,32
Золото	0,70	1	0,88	0,88
Хром	0,664	1	0,81	0,81
Алюминий (мягкий)	0,63	1	0,78	0,78
Алюминий (закаленный)	0,40	1	0,63	0,63
Алюминий (фольга, 0,15 мм)	0,53	1	0,73	0,73
Алюминий (напыление)	0,036	1	0,19	0,19
Латунь (91 % Cu, 9 % Zn)	0,47	1	0,69	0,69
Магнитные металлы				
Сталь	0,10	180	4,24	0,023
Электротехническая сталь	0,23	200-600		
Низконикелевый пермаллой	0,21	1500-		
Мю-металл (Mumetal)	0,20	20000		
Суперпермаллой	0,023	100000	53,7	0,0005

5.9.3 Экранирование в ближней зоне

Особенности экранирования в ближней зоне

1) В ближней зоне, т.е. на отрезке, не превышающем для гармонического сигнала величину $\lambda/2\pi$, поле изменяется относительно мало, поэтому в этой зоне процессы рассматриваются как квазистатические. При этих условиях экранирование выполняют как для статических полей.

Информационные сигналы имеют сложный спектральный состав, т.е. в них присутствуют колебания различных длин волн, поэтому на практике для проектирования экрана часто приходится рассматривать одновременно квазистатические и динамические процессы.

2) В ближней зоне действует закон электромагнитной индукции.

3) Методы и способы экранирования для электрического поля принципиально отличаются от приемов экранирования магнитного поля.

Электрические связи и электростатическое экранирование.

Внутри проводника электростатическое поле отсутствует, поэтому заряды распределяются только на его поверхности.

5.9.4 Электростатическое экранирование

Электростатическое экранирование по существу сводится к замыканию электростатического поля на поверхность металлического экрана и отводу электрических зарядов на землю (рис. 5.33). Заземление электростатического экрана является необходимым элементом при реализации электростатического экранирования. Применение металлических экранов позволяет полностью устранить влияние электростатического поля.

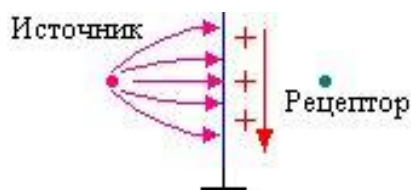


Рис. 5.33 - Экранирование статического электрического поля

Требования к электростатическому экрану.

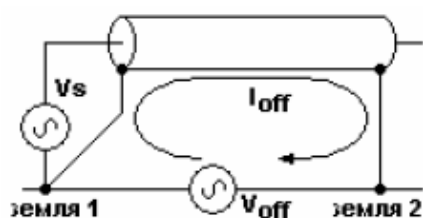
Экран по возможности ставиться как можно ближе к источнику. Если же такой возможности нет, то экранируют рецептор.

Конструкция экрана должна выбираться такой, чтобы силовые линии электрического поля замыкались на стенки экрана, не выходя за его пределы.

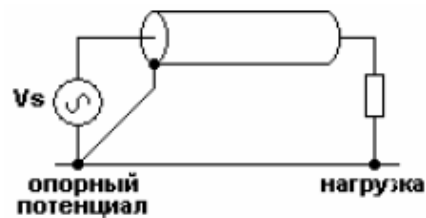
Важнейшее требование к электростатическому экрану – он должен иметь хорошее заземление. Поэтому лучшим вариантом выполнения контакта является пайка или сварка. При отсутствии заземления экран способен переизлучать поля источника.

Материал экрана должен иметь максимальную электропроводность. К толщине материала требований не предъявляется. Чаще всего используются медь, медные сплавы, алюминий. Можно использовать и диэлектрические экраны, плотно прилегающие к экранируемому элементу. Ослабить поле источника в этом случае можно только в ϵ раз, где ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость материала экрана.

При экранировании провода оболочка должен заземляться только в одной точке (рис. 5.34).



неправильно



правильно

Рис. 5.34 – Выполнение заземления электростатического экрана

Экранирование изделий в пластмассовых корпусах

Существенную проблему представляет выполнение экрана для аппаратуры в пластмассовых корпусах (например, мониторы компьютеров). Повышение эффективности экранирования в этом случае достигается:

- Применением композиционных материалов (пластмасса с металлическим наполнителем);

- Нанесением поверхностных слоёв металла (напыление металлов, нанесение специальной проводящей краски, оклейка корпуса фольгой и т. п.).

5.9.5 Магнитное экранирование

Различают два принципа магнитного экранирования: *шунтирование магнитного поля и компенсация.*

Принцип шунтирования работает на низких частотах от 0 до 3...10 кГц и заключается в шунтировании силовых линий магнитного поля стенками экрана, обладающими высокой магнитной проницаемостью (рис. 5.35). Силовые линии поля не попадают внутрь экрана потому, что магнитное сопротивление его стенок при $\mu_r > 1$ значительно меньше сопротивления среды внутри экрана.

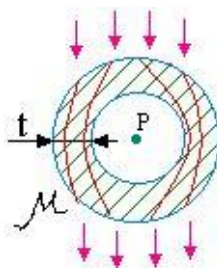


Рис. 5.35 – Шунтирование магнитного поля

Основные требования к такому экрану:

- эффективность экранирования прямо пропорциональна магнитной проницаемости μ и толщине экрана t ;
- заземлять магнитный экран не надо;
- неоднородности (стыки, разрезы и швы) не должны препятствовать силовым линиям магнитного поля;
- эффективность магнитоэстатического экранирования повышается при применении многослойных экранов.

Магнитное экранирование на низких частотах является самой сложной практической задачей. Применение экрана существенно усложняет и утяжеляет конструкцию.

Принцип компенсации состоит в следующем. При повышении частоты в экране возникают вихревые токи (токи Фуко), которые в определенной мере компенсируют своими полями внешнее воздействующее магнитное поле.

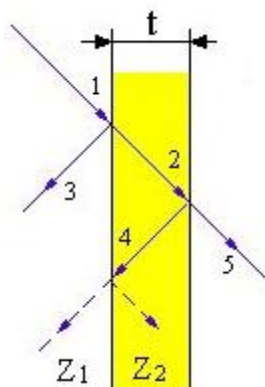
Этот вид экранирования основан на использовании магнитной индукции, создающей в экране переменные индукционные вихревые токи (токи Фуко). Магнитное поле этих токов внутри экрана будет направлено навстречу возбуждающему полю, а за его пределами - в ту же сторону, что и возбуждающее поле. Результирующее поле оказывается ослабленным внутри экрана и усиленным за его пределами. Вихревые токи в экране распределяются неравномерно по его сечению (толщине). Это вызывается явлением поверхностного эффекта, сущность которого заключается в том, что переменное магнитное поле ослабевает по экспоненциальному закону по мере проникновения вглубь металла, так как внутренние слои экранируются вихревыми токами, циркулирующими в поверхностных слоях.

Эффективность магнитного экранирования зависит от частоты и электрических свойств материала экрана. Чем ниже частота, тем слабее действует экран, тем большей толщины приходится его делать для достижения одного и того же экранирующего эффекта. Для частот, начиная с нескольких сотен кГц, экран из любого металла толщиной 0,5 ... 1,5 мм действует весьма эффективно. Для частот выше 10 МГц медная пленка толщиной более 0,1 мм дает значительный экранирующий эффект. Поэтому на частотах выше 10 МГц вполне допустимо применение экранов из фольги или полученные путем покрытия диэлектрика.

5.10 Электродинамическое экранирование (ЭДЭ)

5.10.1 Процесс и эффективность экранирования

При падении на экран плоской электромагнитной волны происходит ее отражение, поглощение, а также повторные отражения в толще экрана (рис. 5.36).



- 1 — первичная волна, падающая на экран
- 2 — волна, частично поглощенная стенкой экрана
- 3 — волна, отраженная от лицевой поверхности
- 4 — волна, повторно отраженная в экране
- 5 — волна, прошедшая через экран.

Рис. 5.36 – Экранирование плоской ЕМ-волны

Основным показателем качества экрана, характеризующим его способность снижать уровень электромагнитной энергии, является *эффективность экранирования* S . В общем виде этот параметр определяется суммой составляющих

$$S = A_{\Pi} + A_O + A_{\Pi,O} \quad (5.5)$$

где A_{Π} - определяет эффективность экранирования за счёт поглощения ПЭВ в толще экрана, дБ;

A_O - составляющая, определяющая отражение от границы раздела при входе волны в экран.

$A_{\Pi,O}$ - характеризует потери за счёт повторных отражений в толще экрана.

Все величины в этой формуле выражаются в дБ.

Величину $A_{\Pi,O}$ можно не учитывать в тех случаях, когда $A_{\Pi} > 6$ дБ. Это условие соблюдается при использовании материалов, толщина которых превышает толщину скин-слоя.

Потери за счет поглощения электромагнитной энергии в толще экрана определяются снижением амплитуды поля в e раз на расстоянии, равном толщине скин-слоя.

Уменьшение амплитуды в 2,7 раз соответствует ослабление в 8,686 дБ. При толщине t экрана в нем "укладывается" t/δ . Поэтому суммарное ослабление за счет поглощения электромагнитной волны будет определяться формулой с относительными (относительно меди) величинами

$$A_{\Pi} = 8,686 \frac{t}{\delta} = 131,4 \cdot t \cdot \sqrt{f \mu_r \sigma_r}, \text{ дБ} \quad (5.6)$$

где t – толщина стенки экрана, мм;

μ_r и σ_r – соответственно, магнитная проницаемость и удельная проводимость относительно меди;

f – частота, МГц.

Таким образом, потери на поглощение в экране возрастают с увеличением частоты, магнитной проницаемости и проводимости металла экрана.

Потери на отражение на границе раздела сред связаны с различными значениями волновых сопротивлений диэлектрика Z_1 и металлического экрана Z_2 . При условии $Z_1 \gg Z_2$

$$A_0 = 20 \log(Z_1/Z_2) \quad (5.7)$$

где Z_1 – модуль импеданса окружающей среды;

Z_2 – модуль импеданса экрана.

Эффективность экранирования в результате отражения в дальней зоне:

$$A_0 = 168 - 10 \log \frac{f \mu_r}{\sigma_r}, \text{ дБ} \quad (5.8)$$

5.10.2 Выполнение отверстий в электромагнитном экране

Общая эффективность экранирования на практике часто определяется в большей степени не качеством экрана, а наличием отверстий, щелей, стыков в экране и прочих элементов поверхности. В связи с этим, к примеру, проблемой является выполнение отверстий в экране для вентиляции, вывода соединительных проводов, обеспечения доступа к элементам подстройки и т.п.

На рис. 5.37 показана физическая картина того как проникает электрическое и магнитное поле через апертуры в экране. Если проникновение велико, то негативные воздействия на электрические соединения в изделии становятся реальными.

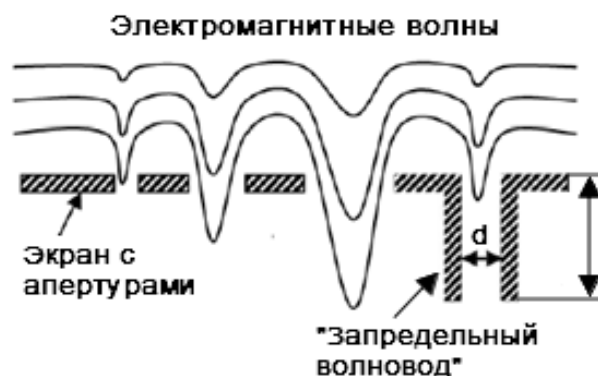


Рисунок 5.37 – Проникновение поля в отверстия экрана

Возможно выполнение специальных по конфигурации отверстий, не пропускающих электромагнитную волну, которые называют "запредельными волноводами" – рис. 1, 2. Как правило, эти отверстия выполняют путем вытя-

гивания металла на длину l . При этом образуется некоторое подобие волновода с определенной частотой среза, выше которой электромагнитные волны не проникают из волновода внутрь изделия.

Частота среза зависит от поперечных размеров и формы сечения, а также от длины волновода.

Форма сечения "запредельного волновода" может быть круговой, квадратной и весьма часто – в виде правильного шестиугольника ("соты") – рис. 5.38.

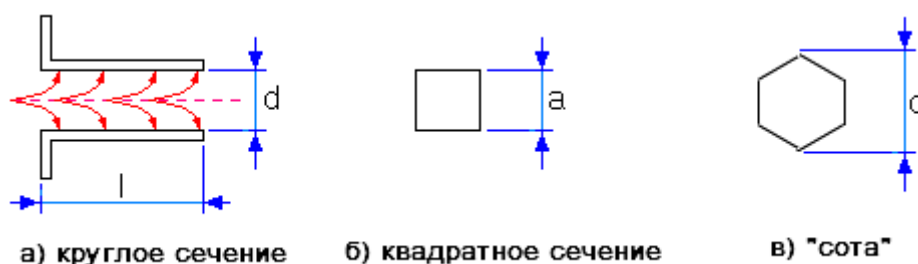


Рисунок 5.38 – Геометрические параметры "запредельных волноводов"

Частота среза для волновода круглого сечения определяется по формуле

$$f_{\text{ср}} = \frac{1,75 \cdot 10^4}{d, \text{ мм}}, \text{ Гц.}$$

Формулы для расчета ослаблений (эффективность экранирования) для волноводов различных сечений представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4

Вид сечения	Расчетное соотношение
Круглое	$S_k = 32(l/d)$, дБ
Прямоугольное	$S_{\text{п}} = 27(l/a)$, дБ
"Сота"	$S_c = 27(l/q)$, дБ

В данной таблице использованы обозначения:

l – длина волновода, мм;

d – диаметр окружности для патрубка круглого сечения;

a – максимальный размер для прямоугольного сечения;

q – диаметр описанной окружности для "сотового" патрубка, мм.

Эффективность экранирования снижается из-за утечек через щели, отверстия, резонансных эффектов полостей и т.д. Формулу для эффективности экранирования (5.5) можно дополнить *поправочными коэффициентами* для неидеального экрана. Это один из распространенных подходов, широко используемых в инженерной практике, поскольку получение адекватных моделей для неоднородностей в экране достаточно сложная задача.

Формула определения эффективности экранирования с поправкой на утечки через апертуры выглядит следующим образом:

$$S = A_{\Pi} + A_O + A_{\Pi.O} - k_a$$

где A , R , B – соответственно потери на поглощение, отражение и повторные отражения,

k_a – поправка на утечки через апертуры.

5 БЛОКИ И ЯЧЕЙКИ

5.1 Методы конструирования ЭС- только для ознакомления

Основные методы конструирования ЭС представлены на схеме (рис. 5.1).



Рис. 5.1 - Методы конструирования ЭС

Для профессиональной стационарной, подвижной и переносной аппаратуры (измерительная техника, средства связи, радиолокация и т.п.) основным является базовый метод конструирования (БМК), использование которого дает следующие преимущества:

- на этапе разработки позволяет вести работу над многими узлами и блоками (параллельно);
- дает возможность изменения общей функции аппаратуры или проведение ее модернизации путем замены отдельных модулей или блоков;
- обеспечивает возможность создания различных типов аппаратуры при использовании различных модулей или блоков (пример: конструкции персональных компьютеров);
- позволяет создавать изделия с высокой ремонтопригодностью;
- позволяет упростить технологию изготовления.

Разновидности БМК: функционально-узловой, функционально-модульный и функционально-блочный метод.

При первом и втором методе производится разбиение блока на узлы или модули (конструктивно-технологические единицы – КТЕ) исходя из следующих соображений:

- функциональной завершенности (КТЕ может выполнять некоторые функции без помощи дополнительных средств);
- конструктивной завершенности;
- метрологической завершенности;
- электрической завершенности.

Модули от других видов КТЕ отличаются тем, что их конструкции обязательно унифицированы, что позволяет дополнительно выиграть, например, в сроках подготовки производства.

Функционально-блочный метод применяется при конструировании относительно несложной аппаратуры, где выигрыш от упрощения (удешевления) конструкции и увеличение надежности (уменьшается число электрических соединений) является решающими. Предельным случаем функционально-блочного метода является создание моноблочной конструкции (изделие не разбивается на части, отдельные функциональные узлы). Данный подход применяется при конструировании ЭС в следующих случаях:

- устройство имеет мало функций, вследствие чего нецелесообразно разбивать его на части;
- устройство должно иметь минимальные размеры;
- устройство изготавливается в малых количествах или имеет малый срок службы.

Метод моноконструкций предполагает реализацию конструкции в виде моноблока на основе оригинальной несущей конструкции (НК). Необходимость разработки ЭС с использованием оригинальных несущих конструкций обычно возникает в следующих случаях:

- изделие должно иметь «фирменный» внешний вид (бытовая аппаратура);

- изделие должно иметь очень плотную упаковку, определенную форму и размеры для размещения на носителе (ракетно-космическая аппаратура).

5.2 Компонование блоков

Наиболее ответственной задачей при конструировании ЭС является компонование разрабатываемого изделия.

компоновка объекта – это его характеристика

компонование – это действие, работа по созданию компоновки объекта

5.2.1 Понятия и определения

☺ **Компоновка блока** – взаимное расположение и ориентация ячеек и других конструктивных элементов в заданном объеме блока.

Различают *внутреннюю* и *внешнюю* компоновку изделия. Задача внутреннего компонования блока состоит в оптимальном размещении составных частей различных структурных уровней с учетом обеспечения необходимых массогабаритных показателей, электромагнитной совместимости, нормального теплового режима, стойкости к механическим воздействиям, обеспечения производственной и эксплуатационной технологичности конструкции (удобство сборки, электромонтажа и ремонта изделия).

Если аппаратура обслуживается человеком-оператором, то возникает необходимость дополнительно учитывать требования эргономики и инженерной психологии при размещении органов индикации, коммутации и управления на передней панели. Это является основной задачей внешнего компонования изделия.

Блоки ЭС, равно как и КТЕ более низкого структурного уровня, могут иметь *регулярную* или *нерегулярную (произвольную)* структуру, *разъемную* или *неразъемную* конструкцию.

Регулярная компоновка блока (рис. 5.1): платы одинакового размера устанавливаются параллельно друг другу с определенным шагом. К таким конструкциям, как правило, можно отнести блоки книжного, кассетного или этажерочного типа. Компоновка самих функциональных ячеек в настоящее

время редко бывает регулярной в связи с тем, что в них доминируют микросхемы, выполненные в сильно различающихся корпусах по числу, шагу и размещению выводов. К категории блоков и ячеек нерегулярной структуры относят конструкции, внутреннее построение которых сложно формализовать.

5.2.2 Обоснование компоновочной схемы блока регулярной структуры

Выбор компоновочной схемы в этом случае проводится по результатам анализа шести возможных вариантов, изображенных на рис.5.1.

Полезный объем блока можно условно представить в виде четырех объемов:

V_1 – пакет функциональных ячеек (ФЯ);

V_2 – электрические соединители и межъячеечный монтаж;

h_2 – глубина зоны межъячеечного монтажа, определяемая типом электрического соединителя;

V_3 – элементы лицевой панели и монтаж установочных элементов;

h_3 – глубина зоны лицевой панели, определяемая типом компонентов, устанавливаемых на лицевой панели, способом электрического монтажа компонентов с ФЯ;

V_4 – элементы задней панели, внешние электрические соединители и монтаж;

h_4 – глубина зоны задней панели, определяется типами межблочного электрического соединителя и элементов, устанавливаемых на задней панели.

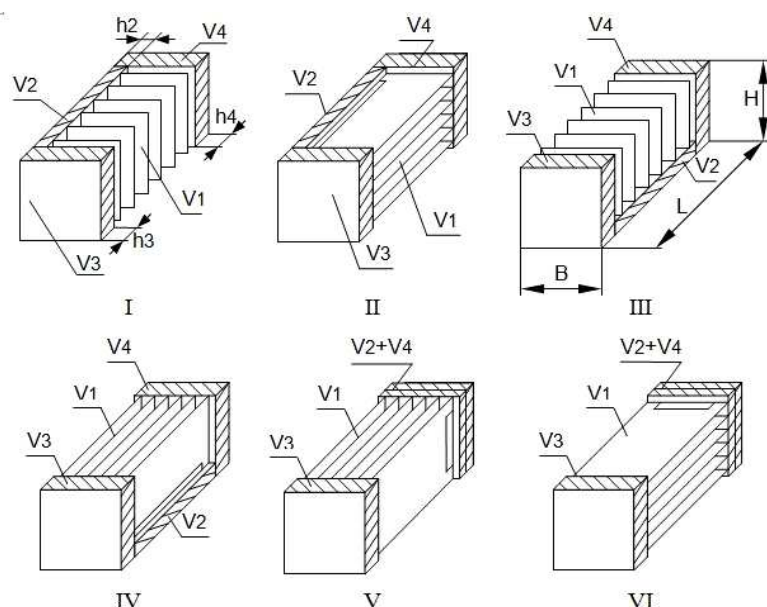


Рис. 5.1 – Варианты компоновки блока регулярной структуры

Объем блока

$$V_{\text{бл}} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4.$$

Качество конструкции в большей степени будет зависеть от соотношения объемов V_1 и V_2 . Объем V_1 определяется объемом ФЯ, их количеством и шагом установки ФЯ в блоке. Для вариантов, представленных на рис. 5.1 (L^I , B^I , H^I – глубина, ширина и высота внутреннего объема блока соответственно) очевидны следующие зависимости:

$$V_1^{V,VI} \geq V_1^{III,IV} \geq V_1^{I,II};$$

$$V_1^{V,VI} \geq V_1^{III,IV} \geq V_1^{I,II};$$

$$V_2^{I,II} \geq V_2^{III,IV} \geq V_2^{V,VI}.$$

Варианты компоновки V и VI являются предпочтительными по эффективности использования внутреннего объема блока и наименее рациональными - варианты I и II.

Варианты II и VI не обеспечивают необходимые условия для эффективного отвода тепла как в случае естественного, так и принудительного воздушного охлаждения блока. Для книжных конструкций при естественном воздушном охлаждении предпочтительнее варианты IV и V, располагающие небольшим количеством плат. При этом в варианте V за счет установки электрического соединителя на короткой стороне ФЯ возможны трудности при трассировке печатной платы и увеличение паразитных связей печатного монтажа. Вариант IV может использоваться в случае принудительного воздушного охлаждения при установке вентилятора на заднюю или лицевую панель. Варианты I и V предпочтительнее при набегавшем воздушном потоке снизу.

Для разъемной конструкции блока целесообразно использовать при естественном воздушном охлаждении вариант компоновки III, а при необходимости использования принудительного охлаждения в составе шкафа, стойки – вариант I.

5.2.3 Компоновка блоков нерегулярной структуры

Блоки с нерегулярной структурой в отличие от предыдущего случая характеризуются большим числом вариантов компоновочных схем, т.к. ФЯ в блоке могут иметь неодинаковые размеры, по-разному ориентированы в пространстве, иметь разные зазоры между собой и т.п. Поэтому задача первоначальной компоновки в этом случае состоит в генерации нескольких вариантов компоновочных схем, их сравнительном анализе и выборе наилучшего среди них. Проще всего ее выполнить, ориентируясь на наиболее удачные и перспективные решения, выявленные в результате анализа аналогичных конструкций ЭС.

Порядок компоновки блока нерегулярной структуры:

- опираясь на требования ТЗ, выбирают тип электрического монтажа в блоке (разъемный или неразъемный, с применением жгутов, плоских кабелей и т.п.);
- выделяют необходимые зоны для размещения ФЯ, межъячеечных соединений, размещения элементов на панелях корпуса и др.;
- выбирают пространственные ориентации печатных и других узлов конструкции, зазоры между ними, обеспечивающие выполнение требований к конструкции по стойкости к внешним воздействиям, электромагнитной совместимости, технологичности и др.

Далее, используя принципы последовательных приближений и перебора рациональных решений, постепенно совершенствуют первоначальный вариант компоновки. После установления всех зазоров уточняют габариты несущих конструкций и блока в целом.

5.2.4 Выполнение компоновки (компонование)

Компоновка проводится при наличии схемы электрической принципиальной и технического задания на разработку ЭС.

В результате компоновки ЭС определяются геометрические размеры, форма, ориентировочная масса изделия, взаимное расположение всех элементов в конструкции.

Компоновка может быть представлена:

- 1) детально в виде сборочного чертежа или 3D-модели;
- 2) упрощенно в виде компоновочного эскиза.

Компоновочные эскизы рекомендуется составлять уже на начальных этапах разработки изделия. Обычно разрабатывается несколько эскизов компоновки, а затем выбирается наилучший среди них. Для этого могут выполняться ориентировочные габаритных размеров, теплового режима, паразитных связей, надёжности и др.

5.3 Типовые варианты компоновки блоков

В основном применяются три типа конструкций: *разъемная, книжная, этажерочная* и *кассетная*. Рассмотрим три первых варианта как наиболее распространенные. Отличительной особенностью **разъемных** конструкций блоков является использование для организации внутриблочных электрических соединений электрических соединителей "вилка-розетка" и объединительной платы, на которой размещаются розетки соединителей (Рис. 5.2)

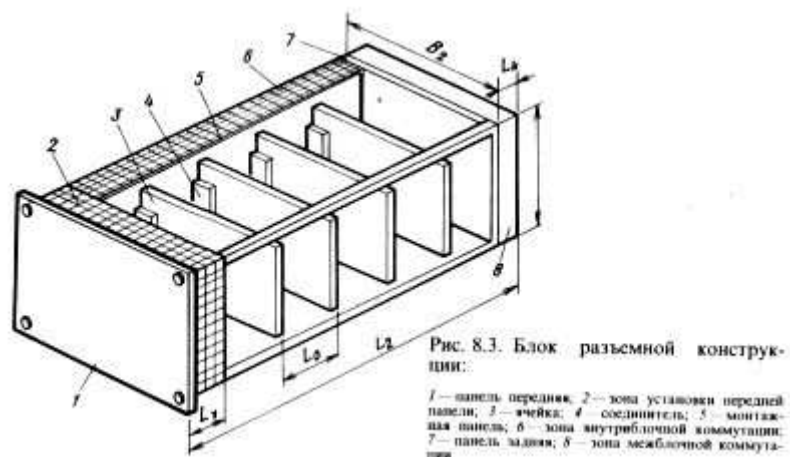


Рис. 5.2 - Блок разъемной конструкции

Возможные варианты компоновки блоков разъемной конструкции приведены на рис. 5.1.

Достоинства: конструкция обеспечивает высокую ремонтопригодность: неисправная функциональная ячейка легко вынимается из блока и заменяется исправной ячейкой.

Недостатки: наличие электрических соединителей снижает надежность (интенсивность отказов электрических контактов относительно высока) и ухудшает массогабаритные показатели блоков.

Разъемные конструкция находит применение в бытовой, вычислительной, авиационной и контрольно-измерительной аппаратуре.

В **книжной** конструкции крупногабаритных блоков функциональные ячейки с помощью шарнирных соединений объединяются в пакет, раскрывающийся в виде книги. Различают конструкции блоков с вертикальной и горизонтальной осями раскрытия. В блоках, выполненных на корпусных интегральных микросхемах, несущим элементом конструкции служит каркас, на продольных центральных связях которого закрепляется кросс-плата. На рис. 5.3 показан крупногабаритный авиационный блок с вертикальной осью раскрытия.

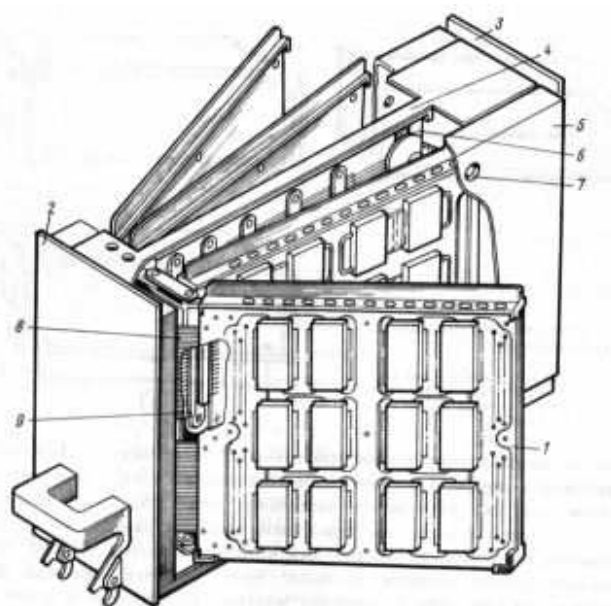


Рис. 8.10. Блок книжной конструкции:

1 — ячейка; 2 — панель передняя; 3 — панель задняя; 4 — рама средняя; 5 — стена боковая;
6 — плата печатная соединительная; 7 — шнур стяжной; 8 — плоский кабель; 9 — колодка соединительная

Рис. 5.3 - Блок книжной конструкции с вертикальной осью раскрытия

Внешние выводы функциональных ячеек соединяются с контактными площадками объединительной платы с помощью гибких плоских проводов (гибкий плоский кабель, гибкий печатный кабель), что позволяет уменьшить массу и габариты блоков и повысить их надежность. Однако это преимущество достигается за счет снижения ремонтопригодности, особенно

на объекте установки, когда оперативное восстановление работоспособности нередко осуществляется путем замены блока.

Книжные конструкции блоков на бескорпусных микросборках выполняются герметичными в металлических коробчатых или колпачковых корпусах (рис. 5.4).

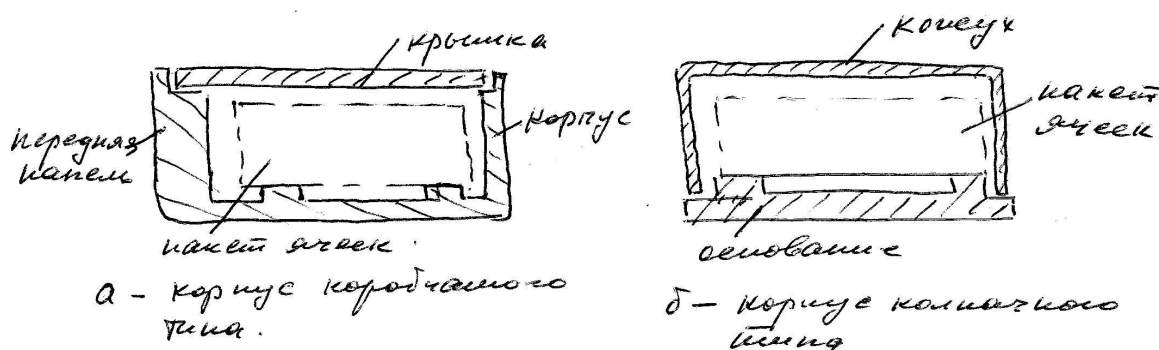


Рис. 5.4

Функциональные ячейки (односторонняя, двоянная или двухсторонняя) объединяются в пакет с помощью ленточных кабелей или шлейфов. Герметизация блоков осуществляется чаще всего методом паяного шва (см. тему "Герметизация").

На рис. 5.5 приведен пример конструкции малогабаритного цифрового блока книжной конструкции, выполненный на бескорпусных микросборках, в корпусе коробчатого типа.

Аналоговые ЭС, выполненные на микросборках, чаще всего имеют металлический герметичный корпус в форме пенала, который служит одновременно теплоотводом, экраном и защитой МСБ от климатических воздействий. Основание корпуса может иметь П-образную форму, форму "кроватьки" или "коробчатую" форму.

Пример пенальной конструкции приемно-усилительного тракта с односторонним расположением МСБ приведен на рис. 5.6. Основание коробчатого типа (2) помещается в кожух-экран в виде прямоугольной трубы и герметизируется двумя паяными швами (5). В состав микроблока входят бескорпусные микросборки (4) и фильтр ПАВ (3) и навесные ЭРЭ (9). Для крепления микроблока на объекте корпус снабжен четырьмя лапками с

отверстиями (8). На передней стенке корпуса расположены ВЧ-разъём (7) и штенгель-трубка (6). На другой стенке установлены низкочастотные гермовводы (1).

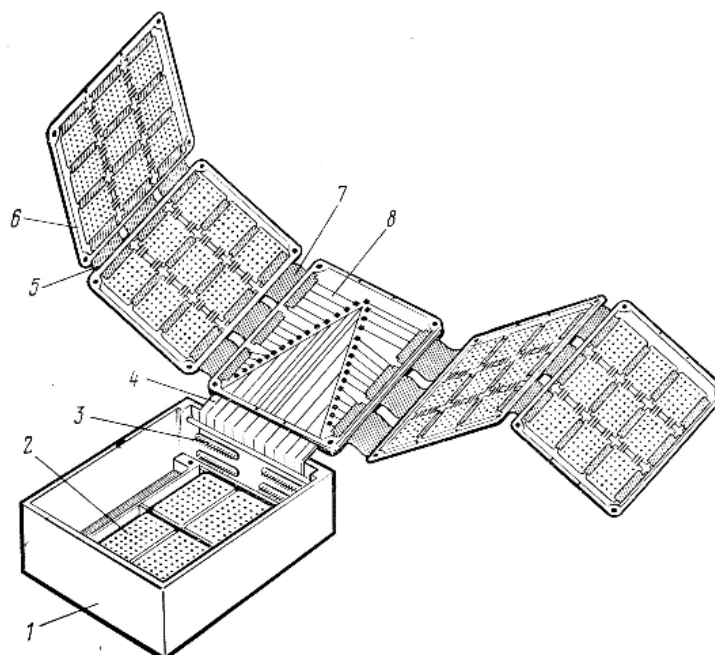


Рис. Общий вид развернутого блока бортовой ЭВМ, состоящего из двух ячеек непрерывной коммутации и источника вторичного электропитания:
 1 — гермокорпус; 2 — источник питания; 3 — гермосоединитель; 4 — плоский проводный кабель; 5 — шлейф внутриячеечной коммутации; 6 — ячейка непрерывной коммутации; 7 — шлейф внутриблочной коммутации; 8 — кроссировочная коммутационная плата

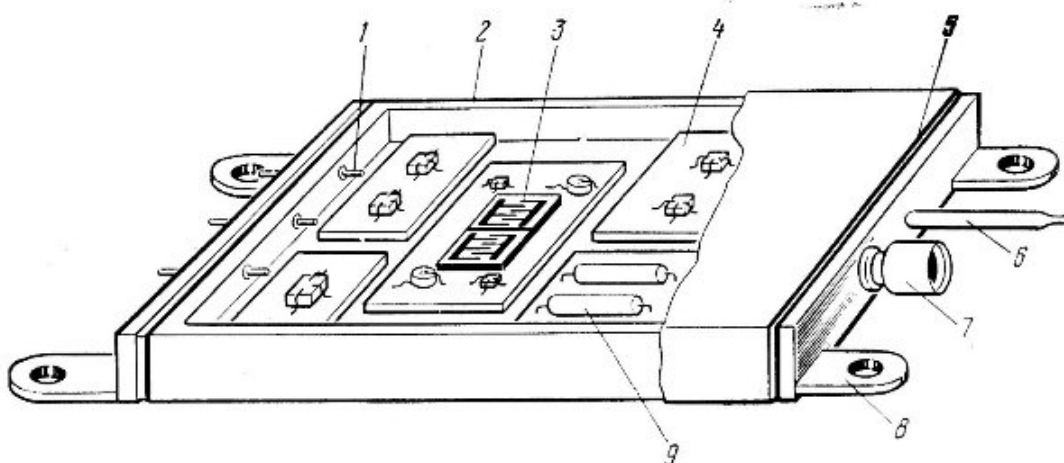
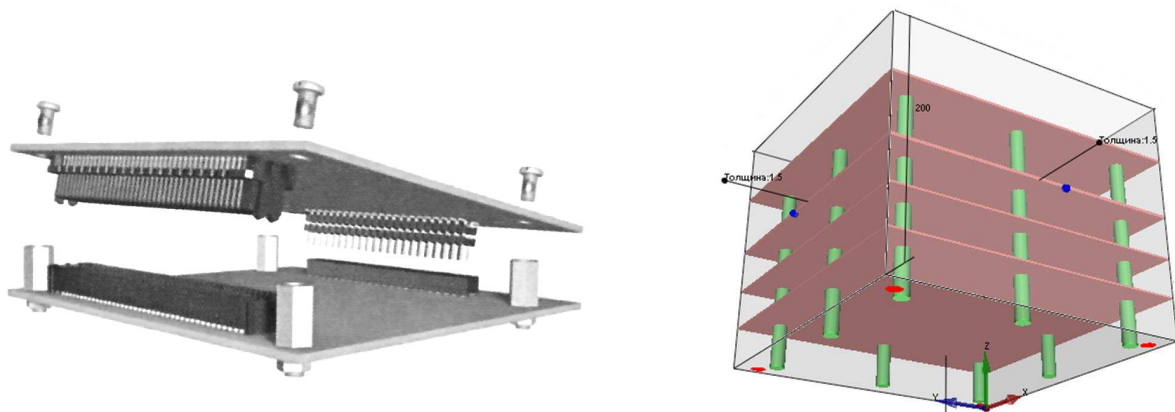


Рис. 5.6 – Пенальная конструкция приемно-усилительного тракта

Примеры конструкций этажерочного типа приведены на рис. 5.7.



а) Разъемная регулярная "этажерка" б) Неразъемная регулярная "этажерка"

Рис. 5.7 – Регулярные конструкции этажерочного типа

На рис. 5.8 приведена модель сложной этажерочной конструкции (нерегулярной),

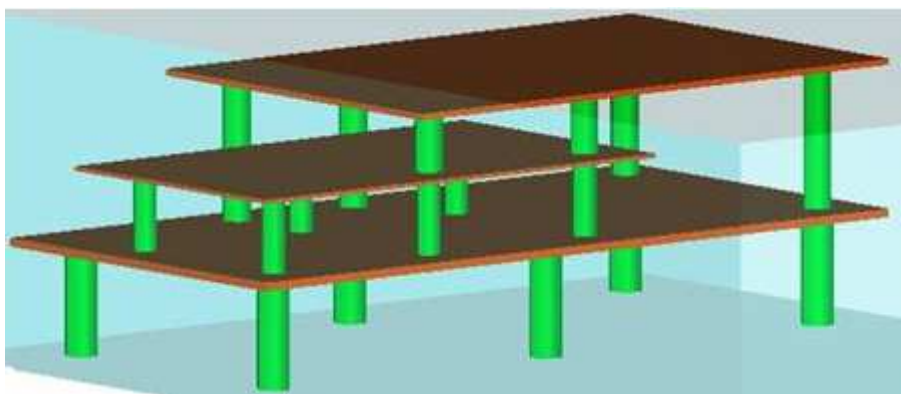


Рис. 5.8 – Модель сложной "этажерки"

Конструкции книжного и этажерочного типов находят применение в аппаратуре, размещаемой на ракетах, космических объектах и в изделиях, требующих предельной минимизации массогабаритных характеристик изделия.

5.4 Печатные узлы

Согласно ГОСТ Р 53386-2009 печатным узлом (печатным модулем) называют печатную плату с подсоединенными к ней в соответствии с чертежом электрическими и механическими элементами и (или) другими печатными платами.

Печатный узел, как правило, не имеет самостоятельного эксплуатационного назначения.

Другое название печатного узла – «Функциональная ячейка» (сокращенное обозначение – ФЯ).

На рис. 5.8 показана классификация ПУ. Печатные узлы в основном используются в составе блоков, поэтому основные варианты их конструкций определяются вариантом конструкции самого блока – разъемная или неразъемная.

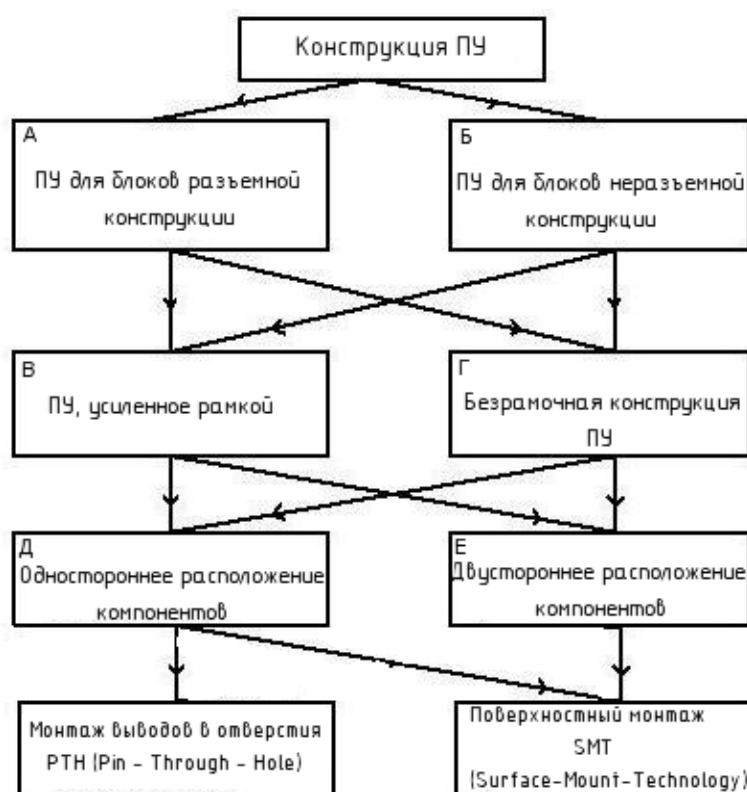


Рис. 5.8 - Классификация конструкций ФЯ

Неотъемлемой частью разъемной конструкции ПУ (А) является один или несколько электрических соединителей (ЭС), которые имеют два исполнения: в виде навесного компонента или в виде набора контактных площадок на печатной плате (печатный соединитель).

На плате ПУ неразъемного типа (Б) для связи с внешними устройствами предусматриваются специальные контактные площадки, монтажные лепестки и т.п.

Каркасы (рамы, обечайки, ребра жесткости) в конструкциях ПУ предусматриваются в следующих случаях:

- конструкция ПУ будет подвергаться значительным механическим воздействиям;

- при больших размерах печатной платы, когда недопустимы ее деформации.

Установка и монтаж ЭРЭ может осуществляться на одну (Д) или на обе стороны платы (Е). В первом случае обеспечивается относительная простота сборки ПУ, а во втором – повышенная плотность размещения компонентов.

По технологии монтажа ЭРЭ на плату различают две основные разновидности печатных узлов:

- 1) конструкции с монтажом гибких выводов компонентов в отверстия на плате – эта разновидность имеет международную аббревиатуру РТН (Pin - Through - Hole);

- 2) конструкции, выполненные с помощью технологии поверхностного монтажа - SMT (Surface - Mount - Technology).

Технология SMT по сравнению с РТН-технологией имеет следующие преимущества:

- существенное уменьшение размеров плат за счет использования миниатюрной элементной базы и существенного уменьшения числа переходных отверстий;

- компоненты могут легко размещаться с обеих сторон платы, что дополнительно увеличивает плотность размещения;

- меньшая масса и более низкий профиль изделия благоприятно сказывается на его вибро- и ударопрочности;

- автоматическая сборка SMT компонентов, потенциально уменьшает полные издержки производства;

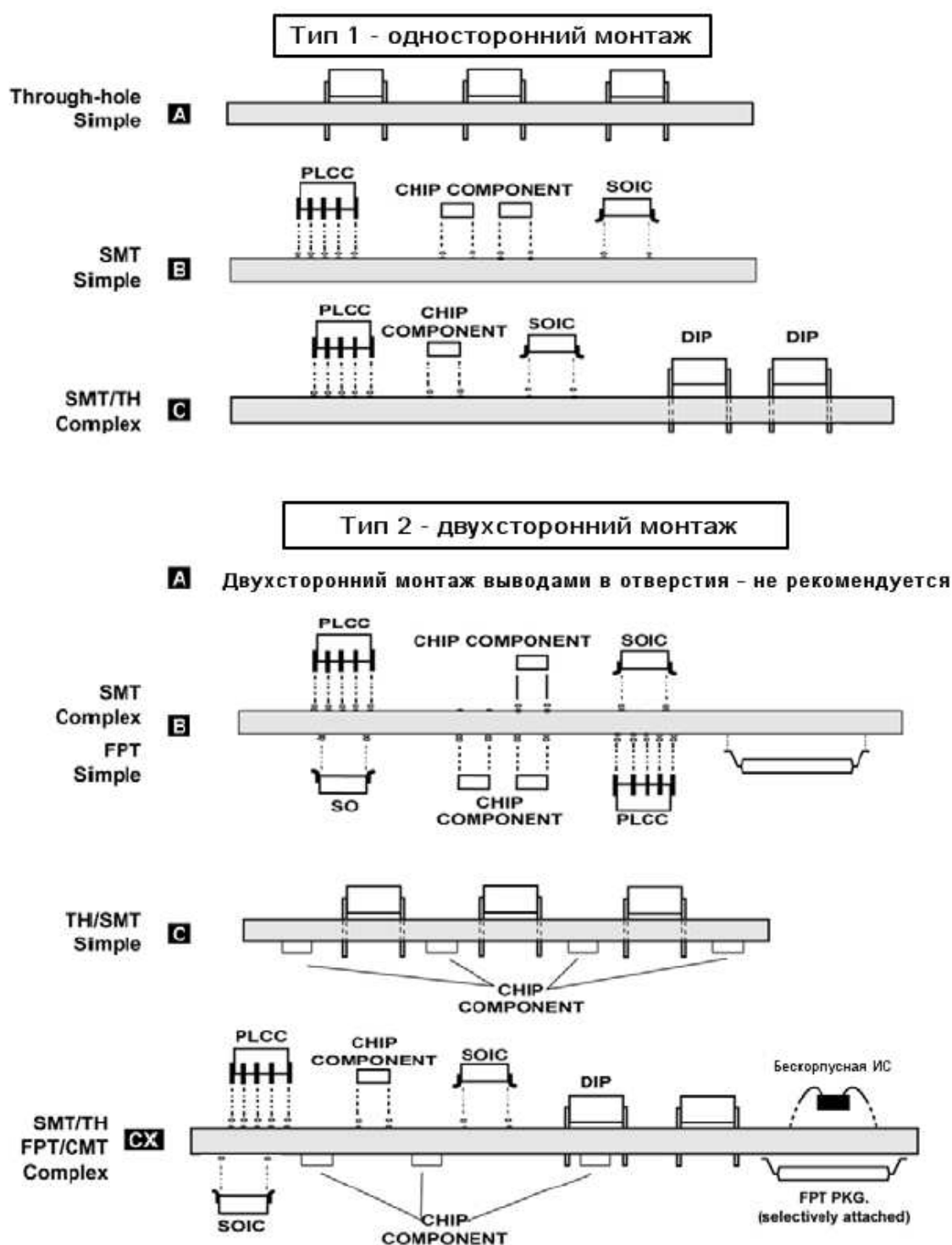
К недостаткам SMT можно отнести:

- повышенные требования к допускам и качеству платы требует использования высококачественных материалов, прецизионного оборудования и высокой культуры производства;

- экономически оправданным является применение SMT только при автоматизации сборки;

- сборка руками с применением обычного паяльника практически не допустима;
- любые изменения расположения компонентов требуют дополнительных затрат, таких как изготовление нового трафарета для клея и т. п., что влечет за собой дополнительные расходы;
- при применении SMT появляются дополнительные издержки на программирование процесса автоматизации сборки и изготовление трафаретов.

Варианты конструкций печатных узлов



6 Защита ЭС от климатических воздействий

6.1 Способы защиты, защитные материалы

Все способы защиты можно разделить на две группы:

- бескорпусная, т.е. без применения корпуса (полной оболочки);
- герметизация в корпусах.

Первый способ основан на нанесении защитного слоя непосредственно на защищаемое изделие. При этом используются специальные герметизирующие материалы (ГМ). В зависимости от назначения различают следующие виды ГМ: пропиточные и покрывные лаки, заливочные компаунды, клеи, пенопласты и пенокомпаунды, порошкообразные термореактивные герметизирующие материалы.

Пропиточные и покрывные лаки — это составы с растворителем. В процессе сушки растворитель улетучивается, оставляя после себя поры, снижающие влаго- и нагревостойкость изоляции. Характеристики распространенных лаков приведены в таблице 6.1. Они в основном используются для защиты печатных узлов РЭС.

Таблица 6.1

Наименование, марка. ТУ, ВТУ	Предел рабочих темпер. °C	ϵ	$\operatorname{tg} \delta$	$\rho_v, \text{Ом} \cdot \text{см}$	Примечание
Лак Э-4100 ТУ ЯН-35-58	-60...+180	3,3		$4,5 \cdot 10^{15}$	Для жестких условий
Эпоксидно-уретановый лак УР-231 ВТУ ГИПИ-4 № 366-62	-60...+80	4,0	0,02	$7,8 \cdot 10^{14}$	Эластичен, стоек к трению. Для не очень жестких условий
Алкифенольный лак СБ-1с ТУ МХП 2785-54	-60...+150	4,0	0,022	$2 \cdot 10^{14}$	Выдерживает воздействие морского тумана

Заливочные компаунды — это термореактивные заливочные материалы без растворителя (с добавками пластификатора и наполнителя), полимеризация которых происходит в присутствии отвердителя.

Применяются полиуретановый компаунд «Виксинт К-68», герметик «Виксинт У-1-18» и др..

Клеи — это пленкообразующие синтетические материалы. В технологических процессах производства РЭС их применяют, главным образом, для склеивания различных деталей. Однако нередко они выполняют и защитные функции отдельных ЭРЭ. К примеру, высокими адгезионными свойствами и влагостойкостью обладает полиуретановый клей марки ПУ-2.

Поливинилацетатные и перхлорвиниловые клеи на основе термопластичных смол обладают хорошими адгезионными свойствами, но имеют невысокую нагревостойкость.

Фенолформальдегидные клеи на основе термореактивных смол обладают высокой нагревостойкостью и хорошими адгезионными свойствами, однако силы когезии (внутримолекулярной связи) обычно превосходят в них силы адгезионного сцепления.

Пенопласты и пенокомпаунды являются разновидностями газонаполненных полимерных материалов с ячеистой структурой, образованной замкнутыми порами. Их получение основано на явлении вспенивания полимеров под действием газов, выделяющихся при разложении газообразователей, введенных в состав композиции или выделяющихся в результате взаимодействия компонентов. Пенопласты применяют для изготовления деталей прессовым методом, а пенокомпаунды — для заполнения пустот и герметизации элементов узлов и блоков беспрессовым методом в целях защиты их от воздействия вибраций.

Порошкообразные термореактивные герметизирующие материалы, выпускаемые также в таблетках и гранулах, используют для изготовления изделий электроизоляционного назначения методами прямого прессования и литья под давлением или для герметизации изделий, предназначенных для эксплуатации в условиях тропического климата.

6.2 Способы выполнения бескорпусной герметизации

При бескорпусной герметизации форма и размеры ЭРЭ и

функциональных узлов второго уровня (микросборки) могут измениться за счет слоя ГМ, нанесенного на их поверхность пропиткой, заливкой, обволакиванием или опрессовкой.

Для пропитки (рис. 6.1, а) используют жидкие пропиточные компаунды, которые заполняют большие и малые поры, отверстия и каналы изделия, образуя на его поверхности тонкий изоляционный слой. Этот слой помимо влагозащиты обеспечивает механическое скрепление отдельных элементов конструкции изделия (например, витков катушки трансформатора), способствует повышению его электрической прочности и теплопроводности. Пропитку производят в специальных вакуумно-пропиточных установках, применяя ее как самостоятельный способ защиты, а также в сочетании с заливкой.

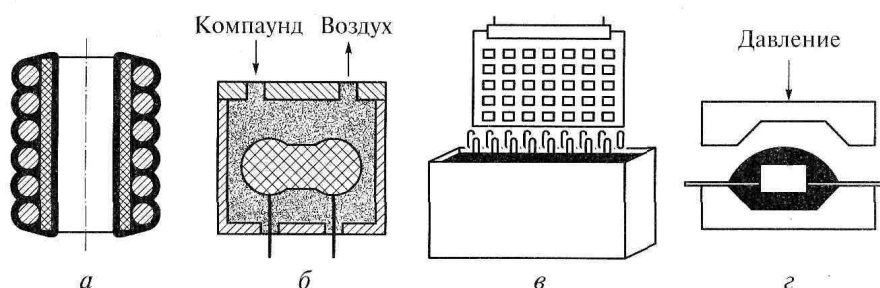


Рис. 6.1 – Способы выполнения бескорпусной герметизации:

а – пропитка; б – заливка; в – обволакивание; г - опрессовка

При заливке (рис. 6, б) свободное пространство легкого корпуса, в который помещено изделие, заполняют смолой. Выбор марки смолы зависит от конкретных требований, предъявляемых к изделию. Так, эпоксидные смолы обеспечивают изделию высокую прочность, полиуретановые — обладают хорошей адгезией, акриловые — повышенной термостойкостью, при полимеризации силиконовых смол минимальны возникающие внутренние напряжения, полиэфирные смолы — дешевые. После полимеризации смолы изделие извлекается из легкого корпуса.

При обволакивании изделие многократно покрывают изоляционным материалом либо окунанием (рис. 6, в), либо кистью или с помощью

пульверизатора, либо помещая его в паровую среду этого материала, слой которого будет удерживаться на поверхности изделия за счет адгезии. Далее изделие помещают в термостат для сушки и полимеризации. Двух- или трехкратное повторение процедуры обволакивания обеспечивает толщину защитного слоя 60...80 мкм. Таким способом, например, защищают печатные узлы.

В настоящее время широкое распространение получила технология нанесения полимерных покрытий *из газовой фазы в вакууме*. Структура пленки, получаемой вакуумным осаждением, благодаря отсутствию «точечных отверстий» существенно отличается от структуры и свойств пленки, получаемой из жидких сред, и обеспечивает необходимые влагозащитные свойства при толщине нанесенного слоя ≈ 10 мкм. Чаще всего используют **полипараксилиленовые покрытия (ППКП)**.

Процесс нанесения пленки в этом случае выполняется в три этапа в специальной камере при давлениях от 10 Па до 100 Па. Осаждаемое на изделие вещество получается путем пиролиза при температуре 680 °С и давлении 50 Па.

Преимуществами ППКП являются высокие электроизоляционные свойства, малые газо- и влагопроницаемость, возможность формирования покрытия при нормальных температурах, однородность покрытия по толщине на изделиях сложной конфигурации, отсутствие токсичности. Данный метод впервые был разработан в США.

В настоящее время освоено производство отечественных исходных продуктов дипараксилилена (ТУ6-14-50—96) и дихлордипараксилилена (ТУ6-14-88—96). Эти материалы введены в отраслевые стандарты: ОСТ В 107.460007.008—2000 «Аппаратура радиоэлектронная. Сборочно-монтажное производство. Покрытия на основе параксилилена и хлорпараксилилена», ОСТ107.9.4003—96 «Покрытия лакокрасочные. Технические требования к технологии нанесения» и в РД 107.9.4002—96 «Покрытия лакокрасочные. Номенклатура, свойства, область применения».

Применение указанных материалов для влагозащиты модулей РЭС,

работающих в условиях повышенной влажности, соответствует требованиям групп эксплуатации 2.1...2.5 ГОСТ РВ 20.57.306-98.

При опрессовке (рис. 1, *з*) в результате спекания пресс-порошка вокруг изделия образуется слой изоляционного материала. Опрессовку осуществляют в специальных матричных формах при высокой температуре и под давлением. Этот способ герметизации целесообразно использовать для защиты конструктивно простых и легких изделий — транзисторов, микросхем, конденсаторов, для которых слой ГМ помимо влагозащиты, может выполнять и функции несущей конструкции — каркаса.

Рассмотренные способы влагозащиты имеют свои технологические особенности и ограничения по применению, связанные с допустимыми воздействиями на защищаемое изделие. Поэтому всегда выбирают способ влагозащиты, наилучшим образом удовлетворяющий условиям производства и эксплуатации изделия.

6.3 Антикоррозийные и декоративные покрытия металлических деталей

Для защиты поверхностей металлов несущих конструкций РЭС от коррозии и в декоративных целях применяют негальванические (металлические и неметаллические), гальванические и химические покрытия.

Негальванические покрытия. В процессе выполнения негальванического покрытия последовательно происходят *диспергирование* материала покрытия путем его испарения или распыления, *перенос* и *осаждение* материала на защищаемую поверхность, и механическое *удержание* покрытия на поверхности за счет сил сцепления. Необходимую толщину покрытия получают изменением интенсивности процесса диспергирования, увеличением эффективности процесса переноса и изменением времени нанесения покрытия.

К *металлическим* негальваническим покрытиям относят вакуумное испарение, катодное распыление, горячее распыление и горячую металлизацию (пайку).

Методы *вакуумного испарения* и *катодного распыления* позволяет наносить любые пленки — диэлектрические, проводящие, магнитные и другие практически на любые подложки

При *горячем распылении* расплавленный металл (олово, цинк), распыляемый сжатым газом, осаждается на поверхности защищаемого изделия. Достоинствами метода являются простота технологии и неограниченность площади покрытия; недостатком — невысокая прочность сцепления защитного слоя с защищаемой поверхностью.

При *горячей металлизации* (лужении) расплавленный металл наносят (с применением флюса) на разогретую и очищенную от оксидов поверхность защищаемого изделия. Достоинства метода — относительно простая технология и высокая прочность сцепления защитного слоя с защищаемой поверхностью.

К **неметаллическим** негальваническим покрытиям относятся многочисленные виды лакокрасочных покрытий.

Гальванические покрытия. В основе гальванических способов защиты лежит электрохимическое или электролитическое (анодное или катодное) осаждение на защищаемую металлическую поверхность металла покрытия из водных растворов его солей.

Вид процесса осаждения определяется взаимным положением металлов основания и покрытия в ряду электрохимических потенциалов:

Li	Zn	Fe	Cd	Ni	Sn	H	Cu	Ag	Hg	Au
-3,02	-0,76	-0,44	-0,4	-0,24	-0,13	0	+0,34	+0,8	+0,86	+1,4

Металлы с более отрицательным потенциалом вытесняют металлы с менее отрицательным потенциалом из растворов их солей, а металлы, стоящие правее водорода, вытесняют его из кислот.

При анодном покрытии (например, при лужении меди оловом) электрохимический потенциал металла покрытия меньше потенциала металла основания. Благодаря этому обеспечивается и механическая, и электрохимическая защиты основания. К примеру, при наличии нарушений и пор в материале покрытия систему металл основания (Си)—металл

покрытия (олово)—растворяющая окружающая среда (H_2O , HCl) можно рассматривать как короткозамкнутый гальванический элемент. При этом в процессе электролиза растворение металла покрытия (олова) происходит быстрее, чем металла основания (меди), так как энергия активации олова меньше, и поэтому оно будет растворяться с образованием хлорного олова SnCl_4 и гидрата закиси олова $\text{Sn}(\text{OH})_2$.

При катодном покрытии (например, при серебрении меди) электрохимический потенциал и энергия активации металла покрытия больше, чем потенциал и энергия активации металла основания, поэтому обеспечивается только механическая защита. К примеру, при наличии нарушений и пор в материале покрытия систему металл основания (Cu)—металл покрытия (Ag)—растворяющая окружающая среда (H_2SO_4 , HNO_3) также можно рассматривать как короткозамкнутый гальванический элемент. Однако в процессе электролиза растворение металла основания (Cu) происходит быстрее, чем металла покрытия (Ag), так как энергия активации меди меньше, и поэтому она будет растворяться с образованием нитрата ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$) и сульфата (CuSO_4) меди.

Химические покрытия. Химические способы защиты основаны на упрочнении структуры тонкого приповерхностного слоя защищаемого металлического изделия в процессе воздействия на него щелочей и кислот. Чаще всего применяют *оксидирование, пассивирование, фосфатирование и азотирование* защищаемых поверхностей.

В процессе *оксидирования* на поверхности металла образуется устойчивая к внешним воздействиям пленка оксида исходного металла толщиной до 1,5 мкм. В зависимости от применяемых электролитов оксидирование бывает *щелочное, кислотное и химическое*.

Важный пример: химическое оксидирование алюминия и его сплавов проводят в растворах, содержащих щелочь и хроматы щелочных металлов, при температуре порядка 100 °C около 10 мин. Полученную пленку закрепляют обработкой в растворе хромового ангидрида (CrO_3).

В процессе *пассивирования* цветных металлов с участием бихроматов

щелочных металлов ($K_2Cr_2O_7$, Na_2CrO_4) и серной кислоты образуется прозрачная защитная пленка толщиной 0,01 ...0,5 мкм.

В процессе *фосфатирования* происходит химическая реакция кристаллизации нерастворимой пленки фосфатов защищаемого металла. Например, фосфатирование алюминия производят кипячением в 10%-ном растворе ортофосфорной кислоты (H_2PO_4) с добавками бихромата калия ($K_2Cr_2O_7$) и фтористого натрия (NaF). Получаемая при этом защитная пленка состоит из фосфатов алюминия и благодаря рыхлой структуре имеет высокие адсорбционные свойства, поэтому ее часто используют в качестве грунтового слоя под лакокрасочные покрытия.

В процессе *азотирования* происходит насыщение азотом поверхностей стальных деталей, омываемых потоком аммиака (NH_3) при температуре 500...600°C с образованием в железе твердого раствора нитридов. При соблюдении оптимального режима процесса получают беспористый поверхностный слой, имеющий максимальную и равномерную концентрацию азота.

6.4 Герметизация в корпусах

Герметизация в корпусе производится не только для защиты РЭС от воздействия влаги, морского тумана, брызг, пыли, агрессивных химикатов, а также, чтобы избежать уменьшения электрической прочности воздуха при снижении внешнего атмосферного давления. Основные методы герметизации приведены на рис. 6.2. Затраты на герметизацию изделия в корпусе составляет до 30% от общей трудоемкости и стоимости изделия.

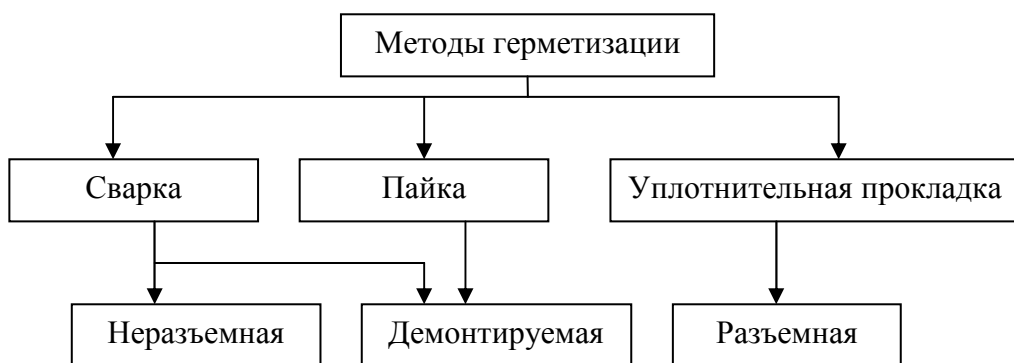


Рис. 6.2 - Методы герметизации

Неразъемная герметизация осуществляется сваркой плавлением, плазменной, роликовой, электронно-лучевой и лазерной.

Демонстрируемая сварка производится плазменным или лазерным способом. Для обеспечения возможности демонтажа герметизирующий шов выполняется на высоком бортике (рис. 6.3).

При характерных размерах $t_{св}=0,2...0,4$ мм и $t_6=3...4$ мм соединение можно демонтировать фрезерованием до 6-8 раз.

Другим методом демонтируемой герметизации является пайка по шву.

В менее ответственных случаях герметизация осуществляется с помощью уплотнительных прокладок (свинец, медь, резина). Этот способ представлен на рис. 6.4.

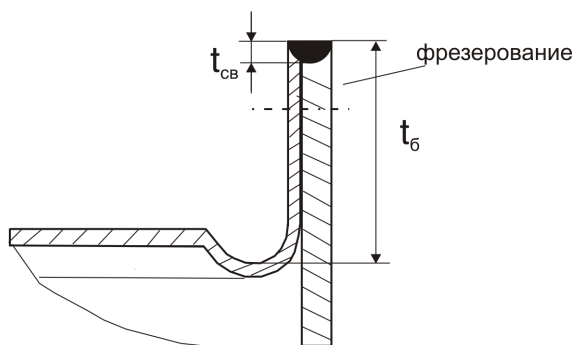


Рис. 6.3 - Конструкция демонтируемого шва

Важнейшим требованием при использовании резиновых уплотнителей является сохранение резиной своих упругих свойств в широком диапазоне рабочих температур. Это обеспечивается правильным выбором марки резины, наличием необходимого объема пространства гермосоединения, правильным выбором числа точек крепления и расчетом требуемого усилия обжатия. Следует учитывать также, что коэффициент объемного расширения у резины в 10 раз больше, чем у стали, что может привести к разрыву узла уплотнения при его малой прочности.

Размеры, обозначенные на рисунке 6.4, должны удовлетворять следующим требованиям

$$B_{\text{кап}} \cdot H_{\text{кап}} \cong 1,15 B_{\text{пр}} \cdot H_{\text{пр}},$$

$$B_{\text{пр}} \geq 2 \text{ мм.}$$

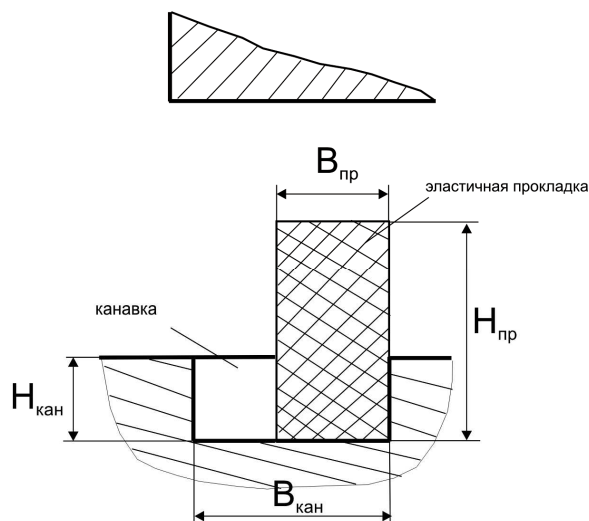


Рис. 6.4 - Уплотнительная прокладка в канавке до соединения деталей

При любом способе герметизации блока ее качество оценивается степенью натекания газа β_n .

$$\beta_n = \frac{Q \cdot P_{ат}^2}{P_{бл}^2 - P_{ат}^2} \cdot \frac{\nu_{N2}}{\nu_{возд}} \cdot K, \left[\frac{\partial m^3 \cdot Па}{с} \right],$$

где β_n - степень натекания газа;

$P_{ат}$ – атмосферное давление;

$P_{бл}$ – давление газа внутри блока;

$\nu_{N2}, \nu_{возд}$ - вязкости азота и воздуха;

$K = 0,1$ – коэффициент запаса;

Q - допустимая скорость натекания газов из корпуса.

$$Q = \frac{V_{бл} (P_{бл} - P_{ат})}{\tau}, \left[\frac{\partial m^3 Па}{с} \right],$$

где $V_{бл}$ – внутренний объем блока;

τ - время герметичности конструкции (для «пайки на шву» нормативный срок службы обычно 5-8 лет).

Допустимые значения Q должны выбираться из таблицы 6.2.

Таблица 6.2

Объем блока, дм ³	Вид герметизации	Способ герметизации	Допустимая скорость натекания Q, дм ³ , Па/с
до 0,5	неразъемная	сварка	$1,33 \cdot 10^{-10}$
0,5-5	демонтируемая	сварка	$1,33 \cdot 10^{-7}$
		пайка	
более 3	разъемная	уплотнительные прокладки	$1,33 \cdot 10^{-4}$

Степень герметизации в *неразъемных и демонтируемых* (вакуум-плотных) корпусах зависит от качества сварного или паяного шва, вальцовки или герметичности заливки шва компаундом. При этом ТКЛР материалов, образующих шов, а также герморазъемов и проходных изоляторов из стекла или керамики должны быть совместимы с ТКЛР материала корпуса. Кроме того, выходы валов и осей органов управления должны быть уплотнены сальниками из фетра или фторопласта, а сами органы управления (тумблеры, кнопки) — герметизированы с помощью резиновых колпачков.

После герметизации внутри корпуса через откачную трубку создают разряжение до 1,3 Па и проверяют качество герметизации. Затем корпус заполняют сухим азотом, аргоном или гелием до получения давления 0,1 ...0,15 МПа, после чего трубку обжимают, запаивают или заваривают.

6.5 Расчет прочности корпуса герметичного блока

Из-за перепада давлений внутри и вне корпуса его стенки испытывают механические напряжения (изгибные), которые должны быть меньше $\sigma_{\text{н доп}}$ (табличное значение). На рис. 6.5 приведено схематичное изображение корпуса и его расчетная модель.

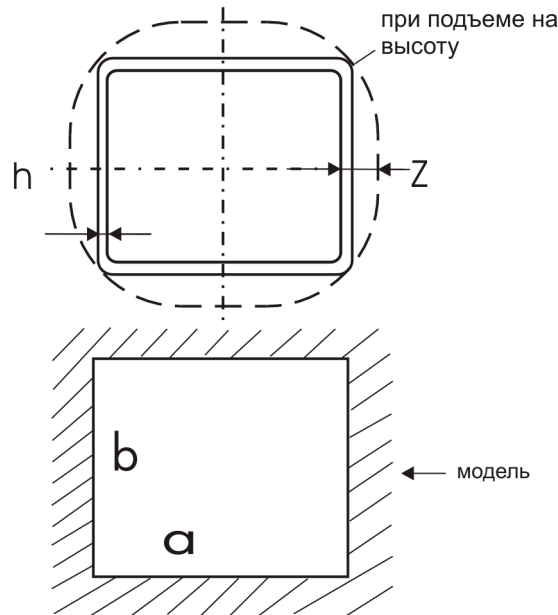


Рис. 6.5 – Корпус и его модель

Стенка корпуса с размерами a и b моделируется прямоугольной пластиной с жестким закреплением по всем четырем сторонам. Наибольшие напряжения в прямоугольном корпусе возникают на контуре стенки (при $a \geq b$):

$$G_H = C_1 \cdot P_{\text{бл}} \left(\frac{b}{h} \right)^2,$$

где C_1 – коэффициент зависящий от отношения $\frac{a}{b}$;

$P_{\text{бл}}$ – давление внутри блока;

h – толщина стенки .

Если $\sigma_H = \sigma_{H_{\text{доп}}}$, то $h \geq b \sqrt{\frac{C_1 \cdot P_{\text{бл}}}{\sigma_{H_{\text{доп}}}}}$,

Прогиб Z (в мм) в центре контура стенки или дна определяется по формуле

$$Z = \frac{C_2 \cdot P_{\text{бл}} \cdot b^4}{E \cdot h^3},$$

где E – модуль упругости материала, МПа,

C_2 – коэффициент, зависящий от соотношения сторон.

Значения коэффициентов C_1 и C_2 находят по таблице 3.

Таблица 6.3

a/b	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
C ₁	0,3102	0,3324	0,3672	0,4008	0,4284	0,4518
C ₂	0,0138	0,0165	0,0191	0,021	0,0227	0,0241

Допускаемое напряжение при расчете стенки корпуса на прочность можно определить по формуле

$$\sigma_{н\ доп} = \frac{\sigma_{пред}}{n},$$

где $\sigma_{пред}$ - предел прочности для хрупких и предел текучести для пластичных материалов;

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3,$$

где $n_1=1,2...1,5$ - коэффициент достоверности определения расчетных нагрузок и напряжений;

$n_2 = 1,0...1,5$ - коэффициент учитывающий степень ответственности детали;

$n_3=1,2...3$ - коэффициент, учитывающий однородность механических свойств материалов.

Пример. Определить толщину стенок корпуса блока 420x300x300 мм выполненного из алюминиевого сплава.

$$E = 70000 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{н\ доп} = 200 \text{ МПа},$$

$$P_{бл} = 0,098 \text{ МПа (внутри блока)}$$

$$h \geq b \sqrt{C_1 \cdot P_{бл} / \sigma_{н\ доп}} = 300 \sqrt{\frac{0,4284 \cdot 0,098}{200}} = 6,67 \text{ мм}$$

$$Z = \frac{C_2 \cdot P \cdot b^4}{E \cdot h^3} = \frac{0,0227 \cdot 0,098 \cdot 300^4}{70 \cdot 10^3 \cdot 6,67^3} = 0,8 \text{ мм}$$

7 ОСНОВЫ ТЕПЛОВОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭС

7.1 Понятия и определения

- ✓ **Тепловым конструированием** называют ту часть конструирования ЭС, которая имеет своей целью обеспечение **нормального теплового режима (НТР)** разрабатываемого изделия.
- ✓ **Тепловой режим (ТР) ЭС** – пространственно-временное распределение температуры в пределах завершенной конструкции.
- ✓ Тепловой режим ЭС считается **нормальным**, когда температуры всех деталей и узлов конструкции при заданных условиях эксплуатации не превышают предельно – допустимых значений установленных ТУ на них.

Необходимость обеспечения НТР: большинство аналоговых и цифровых узлов ЭС имеют низкие значения КПД – порядка 0,2...0,3. Из-за этого значительная доля потребляемой энергии тратится на нагревание элементов и узлов конструкции, и они могут сильно нагреваться. Повышение температур приводит к росту интенсивности отказов радиоэлементов, вызывает ускоренное старение конструкционных материалов. Для того чтобы они имели допустимые значения необходимо обеспечить хороший теплообмен аппарата с окружающей средой.

Тепловые режимы бывают **стационарными** и **нестационарными**.

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.

Примечание. Для *стационарных тепловых режимов* качество изоляции улучшается с уменьшением коэффициента теплопроводности, а для нестационарных – с уменьшением коэффициента температуропроводности.

На рис.7.1 показана зависимость температуры некой точки электронного средства, работающего в непрерывном режиме, от времени после подключения его к источнику питания. Через некоторое время эта температура стабилизируется и наступает стационарный тепловой режим.

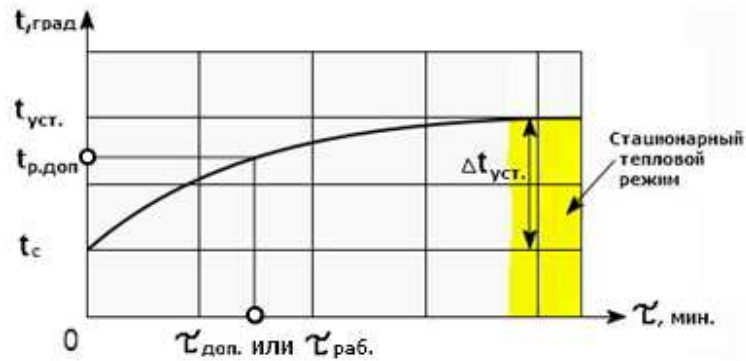


Рис. 7.1 – Наступление стационарного режима в некой точке изделия

Тепловой режим в динамике рассматривают в следующих случаях:

- устройство имеет ограниченное время работы;
- устройство работает в режиме кратковременной отдачи большой мощности

На рис. 7.2 показана зависимость температуры от времени для изделия, работающего в режиме кратковременной отдачи максимальной мощности (температурный график приведен для радиостанции в период обмена информацией).

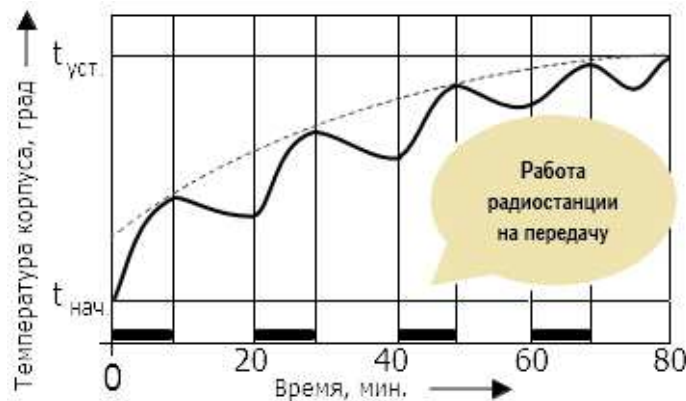


Рис. 7.2 – Зависимость температуры от времени для радиостанции

При расчетах часто удобнее пользоваться не температурами, а перегревами. **Перегрев** – разность между температурой некоторой точки (области) t_j конструкции ЭС и температурой окружающей среды:

$$\Delta t = t_j - t_c$$

Элементы конструкции, выделяющие теплоту, называют **источниками**, поглощающие – **стоками**, а сам процесс передачи тепла – **теплообменом**. Те-

теплообмен происходит вследствие разности температур между телами, а также между телами и средой.

Часть конструкции ЭС, в которой сосредоточены источники тепловой энергии, называется **нагретой зоной** (шасси с расположенными на нем элементами, блоки функциональных узлов, и др.).

При тепловом моделировании в конструкциях выделяют поверхности (объемы), во всех точках которых температуры одинаковы или условно одинаковы. Такие поверхности (объемы) принято называть **изотермическими**.

Теплообмен между нагретыми телами и окружающей средой количественно характеризуется тепловым потоком или плотностью теплового потока.

Тепловым потоком P называется количество тепла Q передаваемое от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой (в общем случае к среде) в единицу времени τ , т. е.

$$P = Q / \tau, \text{ Вт}$$

Различают три физических процесса передачи тепла: **теплопроводность (кондукция), конвекция, излучение**.

7.2 Процессы передачи тепла

Теплопроводность – перенос тепловой энергии при соприкосновении между собой частиц вещества или отдельных тел, имеющих разные температуры.

Теплопроводность может происходить в твердых телах, газах и жидкостях. Рассмотрим одномерный процесс, когда тепло передается от изотермической поверхности S_1 к изотермической поверхности S_2 (рис. 7.3). Этот случай описывается уравнением Фурье:

$$P_T = (\lambda \cdot S / l) \cdot (t_1 - t_2), \quad (7.1)$$

P_T – тепловой поток, передаваемый кондукцией между изотермическими поверхностями S_1 и S_2 ;

λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м · °С;

$S = 0,5 (S_1 + S_2)$ – площадь средней изотермической поверхности;

t_1, t_2 – температуры изотермических поверхностей S_1, S_2 ;

l – расстояние между изотермическими поверхностями.

Произведя замену $\lambda / l = \alpha_T$ из (7.1) получим:

$$P_T = \alpha_T \cdot S (t_1 - t_2), \quad (7.2)$$

где α_T – коэффициент теплопередачи кондукцией.

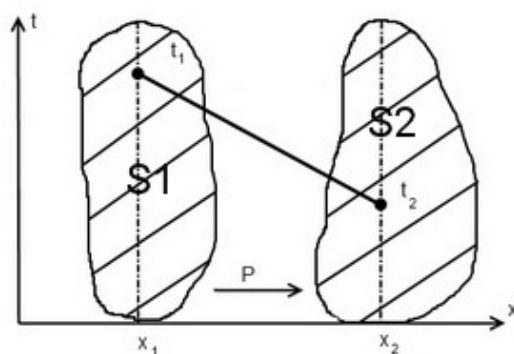


Рис. 7.3 – Пояснение к закону Фурье

Конвекция – процесс передачи тепла, происходящий между поверхностью твердого тела с температурой t_1 и некоторой газообразной или жидкой средой с температурой $t_2 = t_c$, обусловленный естественным или принудительным перемешиванием среды около поверхности (рис. 7.4).

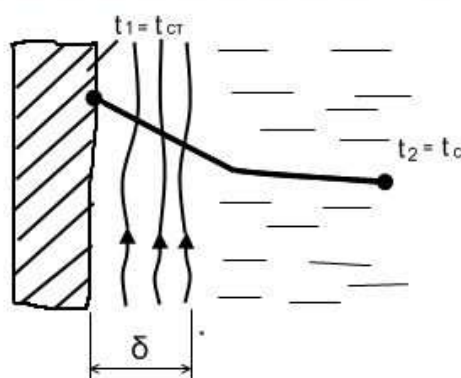


Рис. 7.4 – Естественная конвекция вблизи нагретой стенки

Полный тепловой поток, отдаваемый изотермической поверхностью среде за счет конвекции, определяется в соответствии с законом Ньютона:

$$P_K = \alpha_K \cdot S (t_1 - t_2), \quad (7.3)$$

где α_K – коэффициент конвективного теплообмена;

S – площадь теплоотдающей поверхности.

Коэффициент α_k представляет собой тепловой поток между единицей поверхности твердого тела и средой при разности температур между телом и средой в один градус.

Определение коэффициента α_k является ключевым моментом в расчетах конвективного теплообмена. В общем случае его величина зависит от температур t_1 и t_2 , и ряда физических констант среды и геометрических параметров:

$$\alpha_k = f(t_1, t_2, \beta, \lambda, C_p, \nu, \Phi, a, g), \quad (7.4)$$

где β – коэффициент объемного расширения среды (жидкости или газа) $1 / ^\circ\text{C}$;

λ – коэффициент теплопроводности среды, $\text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$

C_p – удельная теплоемкость среды при определенном давлении, $\text{Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;

ν – коэффициент кинетической вязкости среды, $\text{м}^2 / \text{с}$;

g – ускорение силы тяжести, $\text{м} / \text{с}^2$

a – коэффициент температуропроводности среды, $\text{м}^2 / \text{с}$;

Φ – совокупность параметров, характеризующих форму и поверхность тел.

Коэффициент температуропроводности $a = \lambda / C_p \cdot \rho$ – комплексный теплофизический параметр вещества, представляющий собой отношение способности тела проводить теплоту (λ) к его теплоаккумулирующей способности ($C_p \cdot \rho$), где ρ – плотность среды, $\text{кг} / \text{м}^3$. Чем выше его величина, тем быстрее вещество нагревается или охлаждается.

Задача – обосновать размерность коэффициента a .

Решение:

$$[a] = \left[\frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \right] = \left[\frac{\text{Вт} / \text{м} \cdot \text{град}}{(\text{Дж} / \text{кг} \cdot \text{град}) \cdot (\text{кг} / \text{м}^3)} \right] = [\text{м}^2 / \text{сек}]$$

Многие из параметров в (7.4) взаимосвязаны, и зависят от температуры. В связи с этим практически единственным способом определения коэффициента теплоотдачи α_k для различных условий является эксперимент. Выходит, что для того чтобы рассчитать тепловой режим изделия его надо изготовить и

испытать. Проблему расчета α_k помогает решить **теория подобия**, которая позволяет распространить результаты единичного опыта на целую группу подобных явлений.

Согласно этой теории сложные процессы можно характеризовать не отдельными частными параметрами, а обобщенными, представляющими собой безразмерные комплексы размерных физических величин. Комплексы называются **критериями** или **числами подобия**. Уравнение, связывающее между собой критерии, называют **критериальным уравнением**.

В теории тепломассообмена используются 14 критериев, в данном курсе потребуются 4 из них. Знание этих критериев позволяет производить расчет ТР конструкций ЭС с естественным и принудительным охлаждением.

Критерий Нуссельта записывается следующим образом:

$$Nu = \alpha_k \cdot L / \lambda, \quad (7.5)$$

где L – определяющий геометрический размер тела (внутренний диаметр трубы, высота цилиндра или вертикальной стенки, наименьшая сторона горизонтально расположенной поверхности и т.п.).

Критерий Нуссельта характеризует соотношение интенсивностей конвективного теплообмена и теплопроводности в пристеночном слое среды.

Критерий Грасгофа:

$$Gr = \beta \cdot g \cdot (L^3 / \nu^2) \cdot (t_1 - t_2). \quad (7.6)$$

Этот критерий характеризует соотношение подъемной и вязкой сил в потоке среды при естественной конвекции, иначе говоря, насколько велика «тяга» при естественной конвекции (как в печной трубе).

Критерий Прандтля:

$$Pr = \nu / a. \quad (7.7)$$

Показывает, насколько быстро среда нагревается вглубь (в какой мере глубинные слои участвуют в теплообмене).

Критерий Рейнольдса:

$$Re = v \cdot L / \nu \quad (7.8)$$

где v – скорость движения газа или жидкости при вынужденной конвекции (скорость обтекания, обдува)

Критерий Рейнольдса необходим только при расчетах принудительной конвекции.

При анализе конвективного обмена необходимо учитывать, что теплоотдающие тела могут иметь различные формы и ориентации в пространстве. Определяющие размеры и значения коэффициента ориентации некоторых геометрических тел находятся в таблице 7.1.

Таблица 7.1

Геометрическое тело	Определяющий размер	Коэффициент ориентации
Шары, горизонтальные цилиндры	Диаметр	1,0
Вертикальные пластины и цилиндры	Высота	1,0
Горизонтальные пластины, рассеивающие тепловой поток: – вверх – вниз	Минимальный размер пластины	1,3 0,7

Теплообмен излучением основан на способности твердых, жидких и газообразных тел излучать и поглощать тепловую энергию в виде электромагнитных волн инфракрасного диапазона.

Для двух тел, участвующих во взаимном теплообмене излучением (или для тела, помещенного в газовую среду), результирующий тепловой поток, направленный от изотермической поверхности S_1 первого тела с температурой t_1 ко второму телу (или газовой среде) с температурой t_2 определяется соотношением, полученным на основании закона Стефана-Больцмана:

$$P_L = C_0 \varepsilon_{пр} \varphi_{1,2} S_1 \{ [(t_1 + 273) / 100]^4 - [(t_2 + 273) / 100]^4 \}, \quad (7.9)$$

где $C_0 = 5,673 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{град}^4$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты поверхностей тел, участвующих в теплообмене;

$\varphi_{1,2}$ – коэффициент взаимной облученности тел (фактор экранирования). Он показывает, какая часть теплового потока, испускаемая нагретым телом, поглощается холодным.

Параметр $\varepsilon_{пр}$ определяется по-разному в зависимости от расчетной модели. Например, при теплообмене неограниченных плоскопараллельных пла-

стин, поверхности которых характеризуются степенями черноты ε_1 и ε_2 , приведенная степень черноты определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1 / (1 / \varepsilon_1 + 1 / \varepsilon_2 - 1) \quad (7.10)$$

Значения степени черноты для различных материалов приводятся в справочниках.

Необходимо заметить, что в оптическом смысле коэффициент черноты от цвета поверхности не зависит, а зависит в основном от ее состояния.

Для практических расчетов выражение (7.9) преобразуется к виду:

$$P_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} S_1 (t_1 - t_2), \quad (7.11)$$

где $\alpha_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{12} f(t_1, t_2)$ – коэффициент теплопередачи излучением,

7.3 Определение коэффициента α_k

Определение α_k при естественной конвекции в неограниченном пространстве. Это самый простой случай. Он характерен для теплопередачи от корпуса блока или устройства в окружающую среду.

Критерий Нуссельта для вертикальных плит, бесконечно длинных про- водников, труб и шаров, входит в уравнение:

$$\text{Nu}_{\text{ср}} = C (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n_{\text{ср}}, \quad (7.12)$$

где C и n – показатели теплообмена, значения которых приведены в таблице 7.2. Индекс «ср» указывает, что значения физических параметров λ , α , ν , β следует выбирать для среднего значения температуры $t_{\text{ср}}$.

Таблица 7.2.

$(\text{Gr Pr})_{\text{ср}}$	C	n	Режим движения газа (жидкости)
10^{-3}	0,5	0	Пленочный
$10^{-3} \dots\dots 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8	Ламинарный
$5 \cdot 10^2 \dots\dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	Переходной
$2 \cdot 10^7 \dots\dots 10^{13}$	0,136	1/3	Вихревой (турбулентный)

С каждым увеличением показателя n теплообмен становится все более интенсивным.

Таким образом, для определения α_k при естественной конвекции в неограниченном пространстве необходимо:

- 1) определить значения физических констант среды для средней температуры $t_{cp} = 0,5 (t_1 + t_2)$;
- 2) рассчитать критерий Gr и Pr и найти их произведение,
- 3) из таблицы 7.2 определить показатели теплообмена, по формуле (7.11) – критерий Nu, и с помощью формулы (7.5) – коэффициент α_k

Определение α_k при естественной конвекции в ограниченном пространстве

В конструкциях блоков ЭС теплообмен обычно происходит в ограниченном пространстве: в каналах, прослойках труб и т.д. Например, в зазорах между печатными узлами или узлами и стенками корпуса. Такой теплообмен более сложен, чем предыдущий, т.к. одновременно происходит три процесса: нагревание среды, нагрев холодной поверхности и охлаждение нагретой поверхности. Характер движения среды в каналах показан на рисунках 7.5. На практике такими каналами являются зазоры между кожухом и нагретой зоной блока, зазоры между функциональными ячейками и т.п.

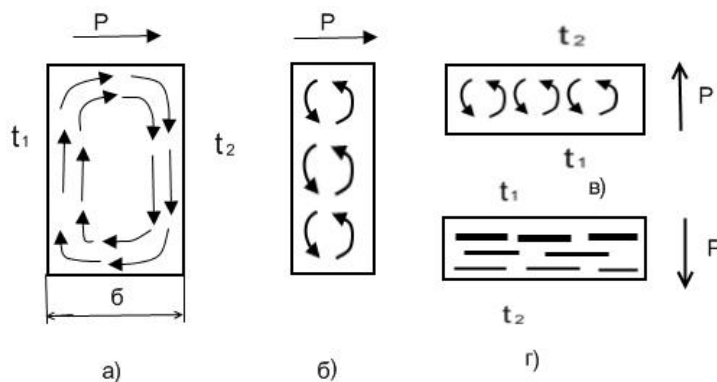


Рис. 7.5

Развитие конвекции в канале зависит от разности температур нагретой и холодной стенок Δt , расстояния между стенками d и ориентации канала в пространстве. В вертикальных воздушных прослойках толщиной более 10 мм конвекция наступает уже при разности температур $\Delta t = 0,3$ °С. В прослойках толщиной 5...10 мм конвективное движение воздуха начинает происходить,

если $\Delta t > 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. В тех же прослойках с толщиной менее 5 мм конвективный теплообмен возникает только в том случае, если Δt не ниже **50 °С (!)**. Поэтому при компоновке блоков оптимальным расстоянием между ФЯ считается 6...8 мм.

В горизонтально расположенных каналах конвекция не возникает вообще, если нагретая стенка находится сверху (см. рис. 7.5, г).

При инженерных расчетах нередко упрощают задачу, полагая, что тепло от нагретой стенки к холодной передается за счет теплопроводности среды, находящейся между стенками. При этом проводимость среды характеризуют эквивалентным коэффициентом теплопроводности:

$$\lambda_э = k_п \lambda \quad (7.13)$$

где $k_п = f(\text{Gr} \cdot \text{Pr})$ – поправочный коэффициент на конвективный теплообмен в прослойке (коэффициент конвекции);

λ – коэффициент теплопроводности среды при среднеарифметической температуре поверхностей $t_{ср} = 0,5 (t_1 + t_2)$;

t_1, t_2 – соответственно температуры нагретой и холодной стенок.

В практике конструирования ЭС чаще всего приходится иметь дело с плоскими прослойками среды, поэтому ограничимся двумя моделями, представленными на рисунке 7.6.

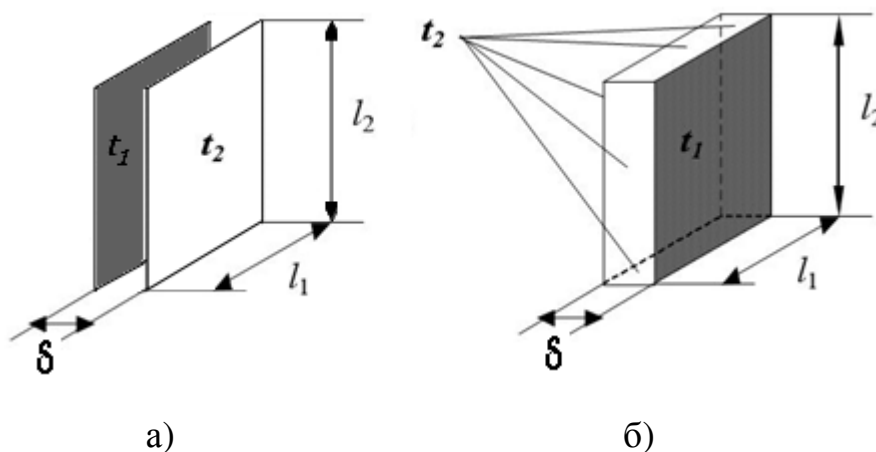


Рисунок 7.6 – Модели для плоских прослоек

На рисунке 7.6,а представлена прослойка газа или жидкости между двумя плоскими стенками с температурами t_1, t_2 ($t_1 > t_2$), а на рисунке 7.6,б – пря-

моугольный параллелепипед, одна грань которого имеет температуру t_1 , а остальные – температуру t_2 ($t_1 > t_2$).

Для первой модели конвективный коэффициент теплопередачи рассчитывается по формуле:

$$\alpha_k = (k_n \cdot \lambda) / \delta,$$

где δ – толщина прослойки.

Коэффициент конвекции k_n определяется следующим образом. Если выполняется условие $Gr \cdot Pr \leq 10^3$, то конвекция отсутствует и $k_n = 1$. Если произведение $Gr \cdot Pr > 10^3$, то приближенно он определяется по формуле:

$$k_n \approx 0,18 (Gr \cdot Pr)^{0,25}$$

Эффективный коэффициент теплопередачи через воздушную прослойку в прямоугольном параллелепипеде (рис. 7.6, б) определяется выражением:

$$\alpha_{кп} = N [6,25 - 5,25 (1 + \delta / \sqrt{l_1 l_2})^{-5/3}] \cdot B \cdot \sqrt[4]{\Delta t} / \delta \quad (7.14)$$

где $N=1$ и $N=1,3$ – коэффициенты для вертикальной и горизонтальной ориентации прослойки соответственно, причем в случае горизонтальной ориентации нагретая грань параллелепипеда находится внизу;

B – коэффициент, зависящий от средней температуры воздуха в прослойке $t_{cp} = 0,5 (t_1 + t_2)$, значения которого приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3

t_{cp} , град	0	50	100	200
B	0,63	0,58	0,56	0,44

Определение α_k при вынужденной конвекции.

Вынужденная конвекция обусловлена принудительным перемещением жидкости или газа относительно поверхности нагретого тела. Организуется в результате применения вентиляторов, воздуходувок, жидкостных насосов и т.п. Расчет конвективного коэффициента теплопередачи в этом случае сводится к определению режима движения жидкости или газа, а затем α_k определяется через критерий Нуссельта.

Режим движения жидкости (газа) зависит от значения критерия Рейнольдса. Считается, что режим движения среды является:

- ламинарным если $Re < 2200$,
- переходным если $2200 \leq Re \leq 10^4$,
- вихревым при $Re > 10^4$.

Скорость принудительного движения жидкости (газа), от которой зависит критерий Рейнольдса, находят через объемный расход жидкости (газа) G_v в системе охлаждения и площадь среднего сечения потока A_{cp} в канале или трубе

$$V = G_v / A_{cp}, \text{ м / с} \quad (7.15)$$

Для конструкций ЭС с неупорядоченным расположением элементов величина A_{cp} и определяющий размер (длина обтекания) L могут быть оценены по формулам:

$$A_{cp} = A_k (1 - K_3); \quad L = \sum L_i S_i / \sum S_i, \quad (7.16)$$

где A_k – площадь сечения кожуха конструкции в направлении, перпендикулярном потоку воздуха;

$K_3 = V_{эл} / V_k$ – коэффициент заполнения;

$V_{эл}, V_k$ – соответственно объемы элементов и кожуха конструкции;

L_i, S_i – длина обтекания и площадь теплоотдающей поверхности i -го элемента.

После определения числа Re необходимо определить число Nu . Особенность этой задачи состоит в том, что критерий Nu зависит не только от режима движения среды, но и от условий взаимодействия потока и охлаждаемой поверхности. Поэтому выделяют несколько случаев, которые представлены на схеме (рис. 7.7).



Рисунок 7.7 – Классификация случаев определения Nu .

Все эти случаи описаны в кн.: Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре, стр.76-81. Там же приведены расчетные формулы, которые сведены в таблицу 7.4.

Таблица 7.4 – Расчетные формулы для разных случаев определения Nu

Расчетная формула	Условия применения формулы
При внешнем обтекании тел	
$Nu_f = 0,66 \cdot Re_f^{0,5} \times Pr_f^{0,43} (Pr_f / Pr_w)^{0,25}$ (7.17)	Ж, Пр, Л ($Re < 5 \cdot 10^5$)
$Nu_f = 0,57 \cdot (Re_f)^{0,5}$ (7.18)	В, Пр, Л ($Re < 5 \cdot 10^5$)
$Nu_f = 0,037 \cdot Re_f^{0,8} \times Pr_f^{0,43} (Pr_f / Pr_w)^{0,25}$ (7.19)	Ж, Пр, Ви ($Re \geq 5 \cdot 10^5$)
$Nu_f = 0,032 \cdot Re_f^{0,8}$ (7.20)	В, Пр, Ви ($Re \geq 5 \cdot 10^5$)
$Nu_f = 0,8 \cdot (Re_f)^{0,5}$ (7.21)	В, П, Л ($Re < 5 \cdot 10^5$)
При вынужденной конвекции в канале	
$Nu_{cp} = 1,5 \cdot Nu^\infty (l_H / L_k)^{0,5}$ (7.22)	В, Л ($Re < 2200$), $L_k \leq l_H$
$Nu_{cp} = Nu^\infty (1 + 0,5 \cdot l_H / L_k)$ (7.23)	В, Л ($Re < 2200$), $L_k > l_H$
$Nu_{cp} = 1,165 \cdot Nu^\infty (l_H / L_k)^{0,167}$ (7.24)	В, Ви, $L_k \leq l_H$
$Nu_{cp} = Nu^\infty (1 + 0,165 \cdot l_H / L_k)$ (7.25)	В, Ви, $L_k > l_H$
При движении теплоносителя внутри трубы	
$Nu_{cp} = 1,13 \cdot (Re)^{1/3} \cdot Gr^{0,1} \cdot K_L$ (7.26)	В, Л
$Nu^\infty = 0,023 \cdot (Re)^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr_f / Pr_w)^{0,25}$ (7.27)	В и Ж, Ви, $L_k \rightarrow \infty$
$Nu = (l_H / x)^{1/6} \cdot Nu^\infty$ (7.28)	В и Ж, Ви, $x \leq l_H = 20d$
$Nu_{cp} = 1,2 \cdot (l_H / x)^{1/6} \cdot Nu^\infty$ (7.29)	В и Ж, Ви, $x \leq l_H = 20d$

Обозначения в таблице:

индексы "f" и "w" означают, что соответствующие критерии определены для температуры потока и температуры стенки, соответственно;

индекс "cp" означает, что по формуле определяется среднее значение критерия;

Ж – жидкость, В – воздух;

Л – ламинарный поток, Ви – вихревой поток жидкости или газа;

П – поперечное обтекание, Пр – продольное обтекание;

L_k – длина канала (трубы), l_H – длина начального участка, на котором стабилизируется поток жидкости или газа, d – диаметр трубы.

7.4 Принципы, используемые при моделировании и расчетах ТР

7.4.1 Принципы суперпозиции температурных полей и местного влияния - САМОСТОЯТЕЛЬНО

7.4.2 Электротепловая аналогия

Электротепловая аналогия основана на принципе Максвелла*, который позволяет использовать одни и те же соотношения для расчета электрических, магнитных и тепловых процессов.

Для наглядности запишем еще раз соотношения:

$$P_T = \alpha_T S (t_1 - t_2)$$

$$P_K = \alpha_K S (t_1 - t_2)$$

$$P_L = \alpha_L S (t_1 - t_2)$$

Эти формулы, устанавливающие зависимость между тепловыми потоками и перегревом, по своей структуре аналогичны формуле закона Ома в интегральной форме для электрических цепей:

$$I = \sigma (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (7.17)$$

Формальное сходство позволяет использовать методы и приемы теории электрических цепей для интерпретации процессов теплообмена.

Из сравнения соотношений для тепловых потоков и электрического тока, протекающего через участок электрической цепи, легко установить следующие аналогии:

электрическое сопротивление $R_э$	$\leftrightarrow$	тепловое сопротивление R_T ,
электрическая проводимость $\sigma_э$	$\leftrightarrow$	тепловая проводимость σ_T ,
разность потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$	$\leftrightarrow$	температурный перегрев Δt ,
электрический потенциал φ	$\leftrightarrow$	температура t ,
электрический ток I	$\leftrightarrow$	тепловой поток P ,
электрическая емкость C	$\leftrightarrow$	теплоемкость C_∂ .

На основании электротепловой аналогии процесс теплообмена может быть представлен тепловой схемой, элементами которой являются источники и приемники тепловой энергии, и тепловые сопротивления (проводимости).

* "Подобие, которое является основой аналогии, существует не между самими явлениями, но между математическими соотношениями, описывающими эти явления" – Кларк

Максвелл (Maxwell J.C. A treatise on electricity and magnetism. – London: Oxford University Press, 1892, v.1).

Каждому узлу тепловой схемы ставится в соответствие определенная температура t . Переменные величины в тепловой схеме (тепловые потоки и перегревы) подчиняются законам Ома и Кирхгофа. На основании этих законов тепловые схемы могут быть преобразованы и упрощены.

7.5 Моделирование и расчет ТР конструкций ЭС

Для того чтобы расчет ТР конструкции имел приемлемую сложность, ее заменяют тепловой моделью. Точность и трудоемкость расчета при этом будет зависеть от степени приближения модели к реальной конструкции. На практике всегда стремятся найти компромисс между точностью расчета и сложностью модели.

Типичными допущениями при тепловом моделировании являются:

1. Упрощают форму исследуемой конструкции с сохранением некоторых интегральных характеристик (площадей, объемов, некоторых размеров). Наиболее удобными для расчета ТР являются правильные формы (прямоугольный параллелепипед, сфера и др.).

2. Объемы или поверхности, между которыми происходит теплообмен, считают изотермическими. К изотермическим поверхностям конструкций часто относят: поверхность корпуса со среднеповерхностной температурой t_k , поверхность нагретой зоны с температурой t_z , поверхность отдельной функциональной ячейки с температурой t_{zi} , поверхность отдельного радиоэлемента с температурой t_{zj} и т.д. Такой подход в тепловом моделировании называется «методом изотермических поверхностей (объемов)».

3. В некоторых случаях нагретую зону конструкции, которая состоит из однотипных ФЯ с регулярной структурой, представляют однородным анизотропным телом (ОАТ). При этом считается, что все источники тепла сосредоточены в центре нагретой зоны. Метод ОАТ пригоден в основном для моделирования конструкций цифровых ЭС разъемного, этажерочного и книжного типов.

4. Если позволяет условие задачи тепловой режим изделия считают стационарным.

При необходимости прибегают к экспериментальному моделированию теплового режима изделия. Он заключается в создании макета конструкции ЭС, воспроизводящего процесс теплообмена реальной конструкции. Степень приближения макета к конструкции зависит от конкретной задачи исследования. Так, например, для моделирования температурного поля кожуха блока нет необходимости в создании на макете структуры нагретой зоны. Температуры в различных точках макета измеряются с помощью контактных датчиков (термопара, терморезистор, полупроводниковый датчик температуры) или бесконтактным методом с помощью пирометра.

Таким образом, наиболее распространенными методами теплового моделирования являются:

- метод изотермических поверхностей (объемов);
- метод однородного анизотропного тела;
- экспериментальный метод.

7.5.1 Построение модели блока по методу изотермических поверхностей

Рассмотрим построение тепловой модели конструкции блока с источниками тепла, распределенными в объеме. К данному классу относятся конструкции блоков книжного, этажерочного и разъемного типов. Общим для названных конструкций является то, что нагретая зона представляет собой объем, занимаемый собранными в блок ФЯ.

Схематическое изображение конструкции приведено на рис.7.5, *а*. Блок функциональных ячеек (нагретая зона) 2 размещен в корпусе 1 и закрепляется на корпусе с помощью установочных элементов 3 (бобышек, втулок, кронштейнов, угольников и др.).

Если нагретая зона блока состоит из однотипных ФЯ с регулярной структурой, то ее можно считать однородным анизотропным телом. Примем

также допущение, что поверхности нагретой зоны и корпуса - изотермические со среднеповерхностными температурами t_3 , t_{KB} и t_{KH} соответственно.

Тепло от центра нагретой зоны с температурой t_{30} теплопроводностью (эквивалентная тепловая проводимость σ_3) выводится на поверхность нагретой зоны.

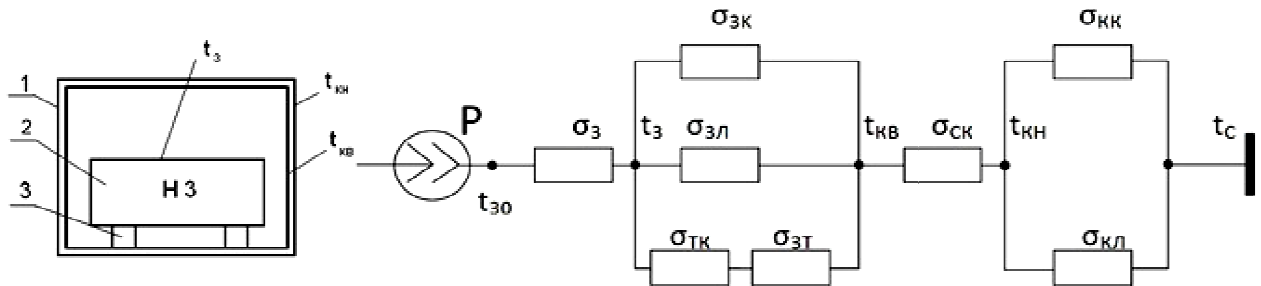


Рис.7.5 – Конструкция блока и его электротепловая схема

С поверхности нагретой зоны посредством конвективной (σ_{3K}) и лучевой ($\sigma_{3Л}$) теплопередачи через воздушные прослойки, теплопроводностью контакта нагретая зона - установочные элементы (проводимость контакта σ_{TK}) и самих установочных элементов ($\sigma_{\delta y}$) тепло передается на внутреннюю поверхность корпуса. За счет теплопроводности стенок (σ_{CK}) тепло выводится на наружную поверхность корпуса, откуда конвекцией (σ_{KK}) и излучением (σ_{KL}) переносится в окружающее пространство. Тепловая схема, отражающая процесс теплообмена в конструкции, приведена на рис.7.5, б. При малой толщине стенки ($\delta_{CK} = 1,5...2\text{мм}$) тепловым сопротивлением стенок корпуса, выполненного из металлических сплавов с высоким коэффициентом теплопроводности, обычно пренебрегают. Однако если используется корпус из пластмассы, то тепловую проводимость стенок σ_{CK} необходимо учитывать.

Цель расчета – определить температуру в центре нагретой зоны t_{30} , т.к. она считается наибольшей во всей конструкции блока. Расчет производится поэтапно, «от известной величины - к неизвестной»:

$$t_{KH} = t_C + P / (\sigma_{KK} + \sigma_{KL}),$$

$$t_{KB} = t_{KH} + P / \sigma_{CK},$$

$$t_3 = t_{KB} + P / \left[\sigma_{3K} + \sigma_{3Л} + \frac{\sigma_{TK} \sigma_{YЭ}}{\sigma_{TK} + \sigma_{YЭ}} \right],$$

$$t_{30} = t_3 + P / \sigma_3.$$

Величина σ_3 - это проводимость от центра нагретой зоны до ее поверхности. Для модели в виде ОАТ она определяется по формуле

$$\sigma_3 = \left[\frac{C \cdot l_z}{4 \cdot \lambda_z \cdot l_x \cdot l_y} \right]^{-1},$$

где C – коэффициент, характеризующий форму однородного анизотропного тела;

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – эквивалентные коэффициенты теплопроводности ОАТ вдоль осей;

l_x, l_y, l_z – размеры ОАТ.

Значение коэффициента C обычно представляют графически. Графики построены для определенных условий выбора направлений осей координат ОАТ. Такими условиями являются неравенства:

$$l_z < l_x \sqrt{\frac{\lambda_z}{\lambda_x}}, \quad l_z < l_y \sqrt{\frac{\lambda_z}{\lambda_y}}.$$

Задача расчета конвективных составляющих в выше приведенных формулах при попытке ее решить «в лоб» является неопределенной. В связи с этим используются специальные методы расчета, позволяющие исключить неопределенность. Такими методами являются:

- метод последовательных приближений,
- метод тепловой характеристики,
- коэффициентный метод.

7.5.2 Метод последовательных приближений

Этот метод представляет собой итеративный процесс установления соответствия с некоторой наперед заданной точностью между температурой t_j или перегревом Δt_j , эквивалентной тепловой проводимостью σ_Σ и тепловым потоком P .

Порядок выполнения расчетов:

- 1) задают (произвольно) значение перегрева j -ой точки или области конструкции Δt^1_j в первом приближении;
 - 2) для среднего значения температуры окружающей среды $t_{cp} = 0,5 [t_c + (t_c + \Delta t^1_j)]$ с помощью критериальных уравнений или по специальной номограмме определяют конвективный коэффициент теплопередачи α^1_k ;
 - 3) для температуры $t^1_j = t_c + \Delta t^1_j$ находят коэффициент теплопередачи излучением α^1_l ;
 - 4) определяют коэффициент теплопередачи теплопроводностью α_t , а затем эквивалентную проводимость по формуле: $\sigma^1_\Sigma = \alpha_t S_{cp} + \alpha^1_k S + \alpha^1_l S$, где S - площадь поверхности теплообмена;
 - 5) находят расчетное значение перегрева для заданного теплового потока
- $$\Delta t^1_{jp} = P / \sigma^1_\Sigma ;$$
- 6) проверяется условие $|\Delta t^1_j - \Delta t^1_{jp}| \leq \delta$,
где $\delta = (1...3) ^\circ\text{C}$ - допустимое отклонение расчетного значения перегрева от принятого в первом приближении.

Если неравенство не выполняется, то повторяют расчет во втором приближении при $\Delta t^{11}_j = \Delta t^1_{jp}$.

Количество необходимых приближений зависит от величины δ и того, насколько удачно задано значение перегрева в первом приближении.

Пример 7.1.

Определить среднеповерхностную температуру корпуса блока РЭС с геометрическими размерами $50 \times 100 \times 150$ мм при тепловом потоке $P=10$ Вт и температуре окружающей среды $t_c = 60 ^\circ\text{C}$. Корпус окрашен серой эмалевой краской.

Поверхность корпуса принимаем за изотермическую со среднеповерхностной температурой t_k . Тепло от корпуса к окружающей среде передается конвекцией и излучением.

Определяем площадь поверхности корпуса: $S_k = 2 (0,05 \times 0,1 + 0,05 \times$

$$0,15 + 0,1 \times 0,15) = 0,06 \text{ м}^2.$$

$$\text{Характерный размер конструкции } L = (S_k / 6)^{1/2} = 0,1.$$

$$\text{Задаем перегрев корпуса в первом приближении } \Delta t^1_k = 10^\circ \text{C}.$$

$$\begin{aligned} \text{Температура корпуса в первом приближении } t^1_k &= t_c + \Delta t^1_k = 60 + 10 = 70^\circ \text{C}. \\ \text{Среднее значение температуры окружающей среды } t^1_{cp} &= 0,5 (t_c + t^1_k) = 0,5 (60 + 70) = 65^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

По справочнику определяем теплофизические параметры сухого воздуха: коэффициент теплопроводности $\lambda_v = 2,93 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ \text{C)}$, коэффициент кинематической вязкости $\nu = 19,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент объемного расширения воздуха $\beta = 1 / (t_{cp} + 273) = 1 / (65 + 273) = 2,96 \cdot 10^{-3} \text{ 1 / } ^\circ \text{C}$.

$$\begin{aligned} \text{Считаем критерий Грассгофа } G^1_r &= \beta g (L^3 / \nu) (t^1_k - t_c) = \\ &= 2,96 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot [(0,1)^3 / (19,5 \cdot 10^{-6})^2] \cdot 10 = 76,4 \cdot 10^4. \end{aligned}$$

$$\text{Критерий Прандтля можно принять } P^1_r = 0,7, \text{ тогда произведение}$$

$$G^1_r \cdot P^1_r = 53,5 \cdot 10^4.$$

Из таблицы 5.1 определяем, что режим движения воздуха переходный, а коэффициенты теплообмена $c = 0,54$, $n = 0,25$.

$$\begin{aligned} \text{Критерий Нуссельта } Nu^1 &= C \cdot (G^1_r P^1_r)^n = 0,54 \cdot (53,5 \cdot 10^4)^{0,25} = 14,6. \\ \text{Конвективный коэффициент теплопередачи в первом приближении } \alpha^1_k &= \\ N^1_u \lambda_v / L &= 14,6 \cdot 2,93 \cdot 10^{-2} / 0,1 = 4,28 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{По номограмме находим } \alpha^1_{лн} &= 7,2 \text{ Вт / м}^2 \cdot ^\circ \text{C}, \text{ из таблицы определяем} \\ \text{степень черноты поверхности корпуса, для эмалевых красок } \varepsilon &= 0,92. \text{ Тогда } \alpha^1_{л} = \alpha^1_{лн} \varepsilon / \varepsilon_f = 7,2 \cdot 0,92 / 0,8 = 8,3 \text{ Вт/м} \cdot \text{C}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Эквивалентная тепловая проводимость между корпусом и средой } \sigma^1_\Sigma &= \\ &= (\alpha^1_k + \alpha^1_{л}) \cdot S_k = (4,28 + 8,28) \cdot 0,06 = 0,753 \text{ Вт / } ^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Расчетное значение перегрева корпуса в первом приближении } \Delta t^1_{кр} &= \\ &= P / \sigma^1_\Sigma = 10 / 0,753 = 13,3^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

Разность температурных перегревов $\Delta t^1_k - \Delta t^1_{кр} = 10 - 13,3 = 3,3^\circ \text{C} > (1...2)^\circ \text{C}$, следовательно, требуется выполнить расчет во втором приближении приняв $\Delta t^{11}_k = \Delta t^1_{кр} = 13,3^\circ \text{C}$.

$$\text{Температура корпуса } t^{11}_k = 60 + 13,3 = 73,3^\circ \text{C}. \text{ Среднее значение тем-}$$

температуры окружающей среды $t_{\text{ср}}^{11} = 0,5(60 + 73,3) = 66,7 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Теплофизические параметры воздуха для $t_{\text{ср}}^{11} = 66,7 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$\lambda_{\text{в}}^{11} = 2,95 \cdot 10^{-2} \text{ Вт / м } ^\circ\text{C}; \quad \nu^{11} = 19,67 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}; \quad \beta^{11} = 2,94 \cdot 10^{-3} \text{ 1 / } ^\circ\text{C}.$$

Критерий $G^{11}r = 98,96 \cdot 10^4$, критерий $P^{11}r = 0,7$, произведение $G^{11}r \cdot P^{11}r = 69,28 \cdot 10^4$. Коэффициенты теплообмена $c = 0,54$, $n = 0,25$.

$$\text{Критерий } N^{11}u = 0,54 (69,28 \cdot 10^4)^{0,25} = 15,6.$$

Конвективный коэффициент теплопередачи во втором приближении $\alpha_{\text{к}}^{11} = 15,6 \cdot 2,96 \cdot 10^{-2} / 0,1 = 4,59 \text{ Вт / м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ и коэффициент теплопередачи излучением $\alpha_{\text{л}}^{11} = 8,18 \text{ Вт / м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Эквивалентная тепловая проводимость $\sigma_{\Sigma}^{11} = (4,59 + 8,18) \cdot 0,06 = 0,766 \text{ Вт / } ^\circ\text{C}$. Расчетное значение перегрева во втором приближении $\Delta t_{\text{кр}}^{11} = 10 / 0,766 = 13,05 \text{ } ^\circ\text{C}$. Расхождение расчетного значения перегрева во втором приближении о заданным составляет $0,25 \text{ } ^\circ\text{C}$, следовательно, можно принять, что перегрев корпуса блока $\Delta t_{\text{к}} = 13 \text{ } ^\circ\text{C}$, а среднеповерхностная температура $t_{\text{к}} = t_{\text{с}} + \Delta t_{\text{к}} = 60 + 13 = 73 \text{ } ^\circ\text{C}$.

7.5.3 Метод тепловой характеристики

Этот метод заключается в построении по расчетным данным зависимости $\Delta t_j = f(P)$, по которым для любого значения теплового потока P можно найти перегрев и температуру j -ой точки или области конструкции.

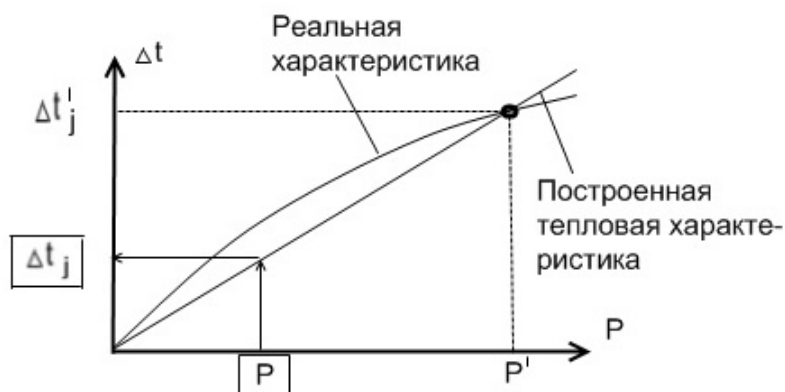


Рис. 7.6 – Построение тепловой характеристики

Для построения тепловой характеристики задаются произвольным значением перегрева $\Delta t'_j$, как и в методе последовательных приближений, нахо-

дят эквивалентную тепловую проводимость между j -ой точкой и окружающей средой σ^1_Σ , затем - тепловой поток $P^1 = \sigma^1_\Sigma \cdot \Delta t^1_j$, который способна рассеять конструкция при данных условиях теплообмена. Значения Δt^1_j и P^1 являются координатами одной точки, лежащей на тепловой характеристике, второй точкой служит начало координат. Таким образом, тепловая характеристика представляет собой прямую, проходящую через начало координат и точку с координатами Δt^1_j и P^1 (рис.7.6). По тепловой характеристике может быть найден перегрев и температура j -ой точки или области конструкции при любом заданном значении теплового потока.

Пример 7.2 По условиям задачи примера 7.1 методом тепловой характеристики определить среднеповерхностную температуру корпуса блока.

В примере 7.1 для начального перегрева корпуса $\Delta t'_k = 10$ °С была найдена эквивалентная тепловая проводимость корпус - окружающая среда $\sigma^1_\Sigma = 0,753$ Вт / °С.

Тепловой поток, который может рассеять поверхность корпуса блока $P = 7,53$ Вт. Строим тепловую характеристику. По ней для заданного теплового потока $P=10$ Вт находим $\Delta t_k = 13,1$ °С, $t_k = 60 + 13,1 = 73,1$ °С.

7.5.4 Коэффициентный метод расчета ТР конструкций ЭС

Исследования показывают, что тепловые режимы РЭС характеризуются достаточно высокой стабильностью и зависят от ряда факторов, относящихся к самой конструкции (геометрические размеры, коэффициент заполнения, структура нагретой зоны, значение теплового потока) и условиям эксплуатации (температура и давление окружающей среды).

Изучение влияния на показатели теплового режима определяющих факторов на физических и теоретических тепловых моделях конструкций при изменении факторов в широких пределах позволило установить закономерности положенные в основу методики расчета тепловых режимов конструкций РЭС определенных классов.

В виду того, что одним из основных показателей теплового режима является температурный перегрев, то используемое в коэффициентном методе расчетное соотношение записывается в виде:

$$\Delta t = \Delta t_0 \cdot \prod_{i=1}^n k_i,$$

где Δt_0 - начальное значение перегрева,

k_i - парциальный коэффициент, учитывающий влияние некоторого фактора на тепловой режим блока.

Начальное значение перегрева Δt_0 определяют по тепловой характеристике для типовой конструкции. Тепловая характеристика отроится в координатах Δt и поверхностной плотности теплового потока $P_s = P / S$ где S - площадь поверхности теплообмена.

Значения коэффициентов k_i обычно даются в виде графиков зависимостей от того или иного влияющего фактора (давления окружающей среды, степени черноты поверхности, площади поверхности теплообмена конструкции и др.)

При использовании коэффициентного метода следует иметь в виду, что область его применения ограничивается тем классом конструкций, для которых определены коэффициенты.

7.6 Защита ЭС от температурных воздействий. Системы охлаждения

7.6.1 Общие принципы защиты ЭС от температурных воздействий:

1) Отвод избыточного тепла от изделия и отдельных его элементов в необходимом количестве и с необходимой скоростью. Желательно чтобы отвод осуществлялся естественным путем без дополнительных затрат энергии. В современной электронной технике далеко не всегда удастся это сделать, поэтому все шире используется принудительный отвод тепла (принудительное охлаждение).

На практике очень часто отвод избыточного тепла осуществляется в окружающий воздух. Физика процесса такова, что количество поглощаемого воздухом тепла определяется параметрами воздуха (температура, влажность, скорость движения), а не материала, из которого изготовлена теплорассеивающая поверхность. Именно теплорассеивание в пограничных слоях воздуха является ограничивающей стадией теплообмена в системе «источник тепла – воздух». Окружающий воздух просто не может рассеять (принять) более 5...10 Вт тепловой энергии с единичной поверхности теплообмена. Следовательно, при выборе материала для теплорассеивающих устройств необходимо принимать во внимание, что теплопроводность материала равная 5...10 Вт/(м·град) необходима и достаточна, чтобы передать на поверхность охлаждения все тепло, которое может быть принято окружающим воздухом, а применение материалов с большей теплопроводностью является технически избыточным.

2) "Сглаживание" быстрых изменений температуры, например термударов, используя инерционность протекающих процессов, в том числе тепловых. Пример: использование плавящегося вещества (см. рисунок).

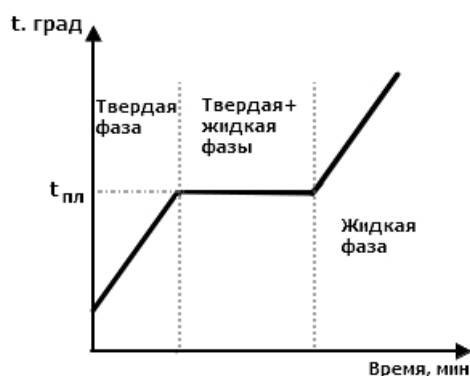


Рисунок 7.7 –

3) Использование холодильных машин, главная особенность которых – это способность поддерживать температуру в некотором объеме ниже температуры окружающей среды.

4) Использование в конструкции материалов и элементной базы, способных работать при экстремальных температурах ("Высокотемпературная электроника").

7.6.2 Классификация и эффективность систем охлаждения

Системой охлаждения (СО) называется совокупность устройств и конструктивных элементов, используемых для уменьшения локальных и общих перегревов.

В зависимости от способа передачи тепла и вида теплоносителя системы охлаждения подразделяют на **кондуктивные, воздушные, жидкостные, испарительные, комбинированные.**

В зависимости от характера контакта теплоносителя и источника тепла различают: системы охлаждения прямого и косвенного действия.

Кроме того, все СО принято делить на **системы общего и локального назначения**, с замкнутым (теплоноситель циркулирует в системе охлаждения) и разомкнутым (теплоноситель выбрасывается из системы охлаждения) циклом.

Виды воздушных систем охлаждения

Естественное воздушное охлаждение:

а) **естественное воздушное охлаждение (ЕВО)** внутри корпуса. Тепло от деталей за счет конвективной теплоотдачи и излучения передается герметичному корпусу, а от него таким же способом - в окружающую среду.

Самый простой, надежный, дешевый, но наименее эффективный метод.

б) **естественная вентиляция** ЭС происходит за счет разности плотностей холодного наружного и нагретого внутреннего воздуха. Для прохода воздуха в корпусе имеются вентиляционные отверстия (перфорация), при этом часть тепла отдается воздуху, проходящему через аппарат, часть рас-

сеивается от корпуса в окружающую среду. **Только для негерметичных блоков.**

Принудительное воздушное охлаждение:

а) *внутреннее перемешивание воздуха* вентилятором в объеме герметичного корпуса. Значительно интенсифицирует теплообмен между деталями и корпусом.

б) *принудительная вентиляция*. Применяется в тех случаях, если естественная вентиляция и внутреннее перемешивание не обеспечивают нормальный тепловой режим РЭС. Она может быть **приточной, вытяжной** и **приточно-вытяжной**.

Приточная вентиляция считается более эффективной, так как вентилятор работает в более плотном холодном воздухе, что обеспечивает больший массовый поток теплоносителя и больший сток тепла.

в) *наружный обдув корпуса*. Применяется обычно для герметичных блоков. С целью интенсификации теплообмена корпус снабжается ребрами охлаждения.

г) *локальная принудительная вентиляция* – обдув отдельных, наиболее нагретых, элементов.

Для увеличения эффективности воздушного охлаждения элемента ЭС широко используются оребренные поверхности охлаждения. В практике детали с оребренными поверхностями называют радиаторами или теплоотводами. Радиаторы применяют при охлаждении мощных полупроводниковых приборов и других элементов РЭС.

Жидкостные системы охлаждения делят на системы *естественного* и *принудительного* действия.

При *естественном жидкостном охлаждении* платы с элементами погружают в жидкость, которая охлаждается в теплообменниках. По сравнению с естественным воздушным охлаждением в этих системах интенсивность теплоотвода значительно выше, однако при этом требуется защищать элементы РЭС от влияния жидкости, что усложняет конструкцию. По этой причине жидкостные системы охлаждения применяются пока сравнительно редко.

Принудительное жидкостное охлаждение применяется при больших удельных мощностях рассеивания чаще всего при охлаждении больших элементов. Жидкость прокачивается насосом через специальные каналы в охлаждаемых узлах приборов или платах.

Испарительные системы.

В этих системах используется тот факт, что для испарения жидкости, т.е. для ее перехода в другое фазовое состояние – в жидкое, требуется значительное количество тепла. На рис. 1.13 приведена схема замкнутой системы испарительного охлаждения.

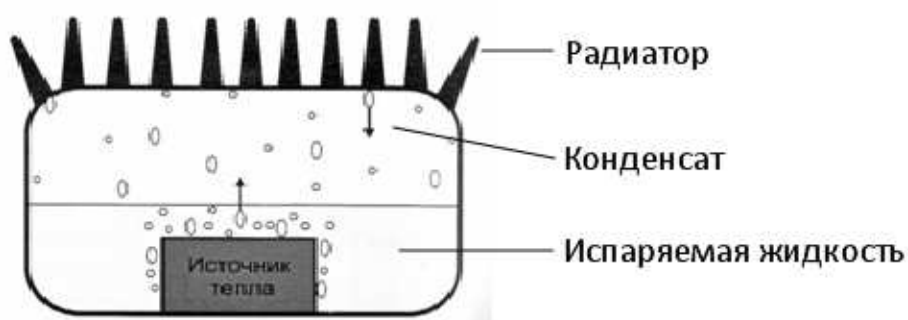


Рис. 1.13

Охлаждаемая конструкция погружается в жидкость, которая кипит на поверхности теплонагруженных деталей. При этом температура кипения охлаждающей жидкости должна быть ниже допустимой температуры охлаждаемой поверхности. При кипении образуются газовые пузырьки, которые поднимаются вверх и затем конденсируются на холодной стороне радиатора. При конденсации накопленная ранее энергия отдается пузырьками радиатору. Образующиеся на радиаторе конденсат под действием силы тяжести и/или капиллярных сил перемещаются назад к жидкости. В этом процессе может быть передано большое количество тепла от точки испарения до точки конденсации.

Такое охлаждение позволяет значительно повышать удельную мощность рассеивания РЭС и считается одним из перспективных методов охлаждения. Этот механизм используется в тепловых трубках

Особый класс представляют собой системы охлаждения, основанные на использовании **эффекта Пельтье**.

Эффективность системы охлаждения может быть оценена поверхностной плотностью теплового потока, уносимого теплоносителем из РЭС.

Для различных систем охлаждения плотность теплового потока характеризуется следующими величинами (табл.7.2).

Таблица 7.2

Вид системы охлаждения	Плотность теплового потока P_s , Вт/см ²	Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·°С
Естественное воздушное охлаждение	0,2	2...10
Принудительное воздушное охлаждение	1,0	10...150
Принудительное жидкостное охлаждение	20	300-3000
Испарительные системы	200	500-120000

Нитрогенные системы – охлаждение с помощью жидкого азота

Гидрогенные системы – водяное охлаждение

Криогенные системы – используется фреон

Аэрогенные системы с элементами Пельтье (воздух)

7.6.3 Выбор способа охлаждения на ранних стадиях разработки

Ввиду того, что способ (система) охлаждения в значительной мере определяет структуру конструкции ЭС, то уже на ранних стадиях разработки важно произвести выбор способа охлаждения.

Цель выбора: определить способ охлаждения, который необходим и достаточен для обеспечения нормального теплового режима разрабатываемого конструкции ЭС.

Выбор производится на основании статистических данных о показателях тепловых режимов реальных конструкций ЭС. Для этого используется диаграмма, представленная на рисунке 7.8.

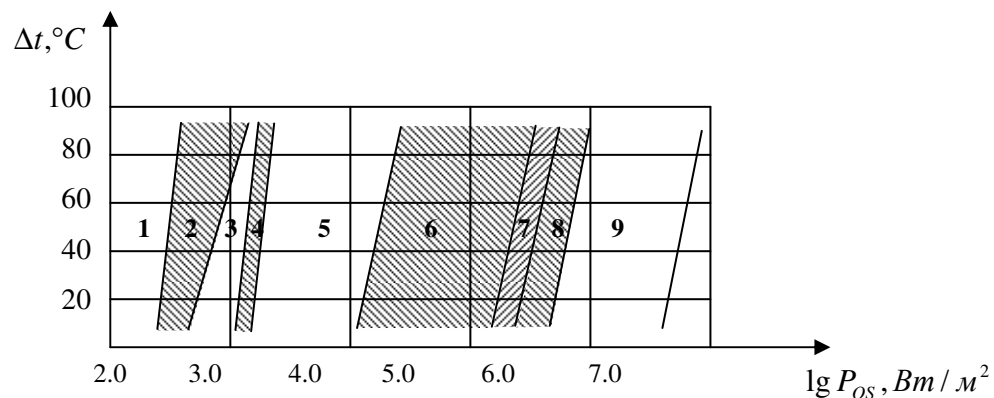


Рисунок 7.8 – Диаграмма для выбора способа охлаждения ЭС

Не заштрихованные зоны диаграммы относятся к следующим способам охлаждения: 1 - естественное воздушное, 3 - принудительное воздушное, 5 - принудительное жидкостное, 9 - принудительное испарительное.

Заштрихованным зонам соответствуют следующие способы охлаждения: 2 - естественное и принудительное воздушное, 4 - принудительное воздушное и жидкостное, 6 - принудительное жидкостное и естественное испарительное, 7 - принудительное жидкостное, принудительное и естественное испарительное, 8 - естественное и принудительное испарительное.

Необходимые исходные данные:

- тепловой поток P , Вт, рассеиваемый поверхностью теплообмена (корпуса) конструкции;

- площадь поверхности теплообмена (корпуса) S_K ;
- допустимая рабочая температура наименее теплостойкого элемента $t_{ЭЛ \min}$, °C;
- максимальная температура окружающей среды $t_{C \max}$, °C;
- минимальное давление окружающей среды $H_{C \min}$, мм рт.ст.

Перечисленные данные обычно указываются в техническом задании на разработку и известны. Значение теплового потока можно определить через потребляемую от источников питания мощность P_{II} , которая обычно указывается в ТЗ, и коэффициент полезного действия изделия η :

$$P = P_{II} (1 - \eta).$$

Чтобы выбрать систему охлаждения, необходимо найти поверхностную плотность теплового потока:

$$P_{OS} = K_H P / S_K, \text{ Вт/м}^2$$

где $K_H = 1 / (H_{C \min} / H)^{0.5}$ – поправочный коэффициент на давление окружающей среды;

$H = 760$ мм рт.ст. – нормальное давление;

допустимый перегрев в конструкции

$$\Delta t_{доп} = t_{ЭЛ \min} - t_{C \max}.$$

Если точка с координатами (P_s , $\Delta t_{доп}$) попадает в не заштрихованную область, то способ охлаждения определяется однозначно. Для заштрихованных областей, где возможно использование двух или трех различных способов охлаждения, задача выбора того или иного способа усложняется. Чтобы найти правильное решение необходимо воспользоваться вероятностными кривыми, которые связывают показатели P_s , $\Delta t_{доп}$ и вероятности обеспечения заданного теплового режима при различных условиях теплообмена. Вероятностные графики приведены в [Конструирование электронных средств: Учебное пособие/В.Ф. Борисов и другие].

Замечания

1) Если известен только объем конструкции, то при расчетах можно использовать площадь поверхности куба, которая определяется по формуле:

$S_K = 6 \cdot V_{ТЗ}^{2/3}$ (куб имеет наименьшую площадь поверхности среди тел прямоугольной формы).

2) Если геометрические размеры конструкции не заданы, то S_K можно найти приближенно, используя сведения об элементной базе конструкции и коэффициенты дезинтеграции массы или объема.

7.6.4 Особенности конструкций ЭС с кондуктивными системами охлаждения

В некоторых случаях передача тепла кондукцией является самым эффективным способом. Это касается в первую очередь герметичных блоков с высокой плотностью заполнения.

Кондуктивные системы охлаждения (КСО) основаны на контактном способе передачи тепла за счет теплопроводности элементов конструкции.

Эквивалентная схема цепи теплопередачи в КСО приведена на рис.7.9.

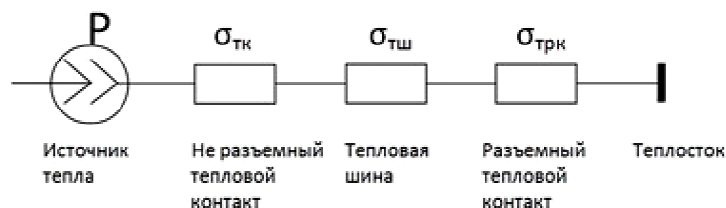


Рисунок 7.9 – Тепловая схема КСО

Тепло, выделяемое источником, через неразъемный тепловой контакт, передается на теплоотвод (тепловую шину), с которой через тепловой разъем поступает на тепловой сток (теплообменник).

Высокая эффективность КСО достигается, если обеспечены высокие проводимости σ_{TK} , $\sigma_{TШ}$, $\sigma_{ТРК}$ и эффективный теплосток (радиатор, теплообменник и др.).

Моделирование и расчет тепловых контактов в кондуктивных цепях

Структура теплового контакта изображена на рисунке 7.10. В контакте тепло от нагретой поверхности к холодной передается теплопроводностью фактического контакта и среды, заполняющей микронеровности поверхностей. Эффективность теплопередачи излучением ввиду малой разности температур между нагретой и холодной поверхностями низка. Поэтому теплопередача из-

лучением через среду не учитывается.

В рассматриваемой модели пятна фактического контакта контактирующих поверхностей распределены равномерно по всей поверхности контакта. Все пятна имеют форму круга с одним и тем же радиусом, не изменяющимся при изменении давления. Термическое сопротивление окисной пленки на контактирующих поверхностях мало настолько, что не учитывается.

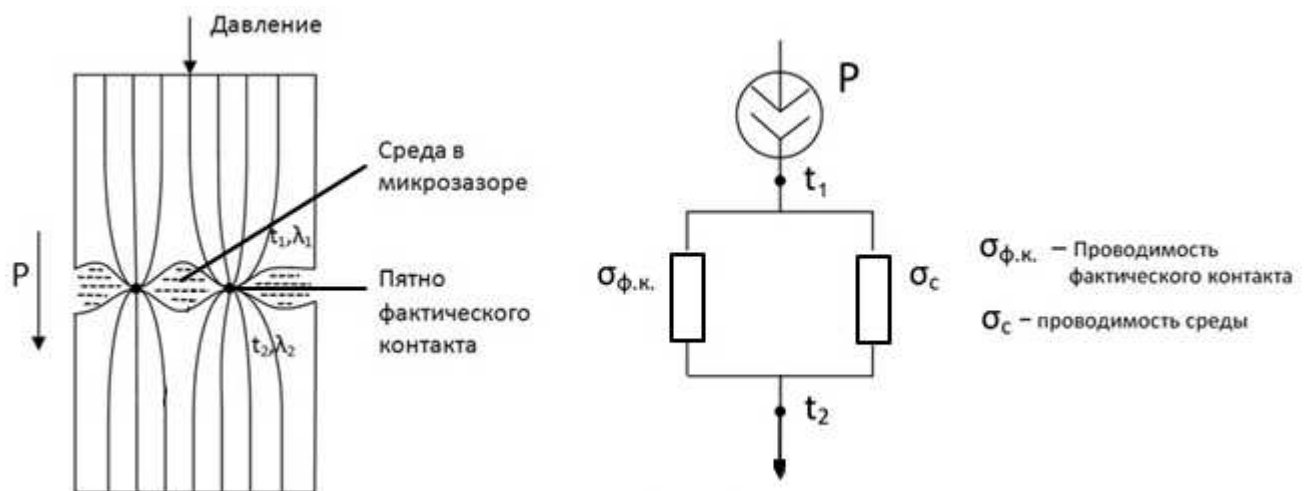


Рисунок 7.10 – Тепловой контакт двух поверхностей

Тепловое сопротивление контакта

$$R_k = \Delta t_k / P = 1 / (\sigma_{ф.к.} + \sigma_c)$$

где P – тепловой поток, протекающий через контакт;

Δt_k – разность температур контактирующих поверхностей;

$\sigma_{ф.к.}$ – тепловая проводимость, определяемая фактическими контактами;

σ_c – тепловая проводимость среды.

Удельное сопротивление фактического контакта

$$R_{ф.к.уд} = (\varphi / 2,12 \lambda_m \eta) \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт} \quad (7.18)$$

где $\eta = S_{фк} / S_k$ – относительная площадь фактического контакта;

φ – коэффициент стягивания теплового потока к пятнам фактического контакта;

$\lambda_m = 2 \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2)$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности

фактического контакта;

λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности материалов.

Определение параметров η и ϕ представляет собой сложную задачу. Поэтому при расчете удельного сопротивления фактического контакта $R_{\text{фк.уд}}$ находят отношение

$$\eta / \phi = (pV / E)^{0.8},$$

где p – удельное давление в контакте;

E – модуль упругости материала;

V – коэффициент, характеризующий геометрические свойства поверхностей.

Выражение η / ϕ справедливо для поверхностей с чистой обработкой от 3 до 10 класса, материалов с модулем упругости $E > 10^{10}$ Па и при относительных нагрузках на контактных поверхностях $p / E = 5 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-4}$. Значение коэффициента V находят из графика рисунок 7.11.

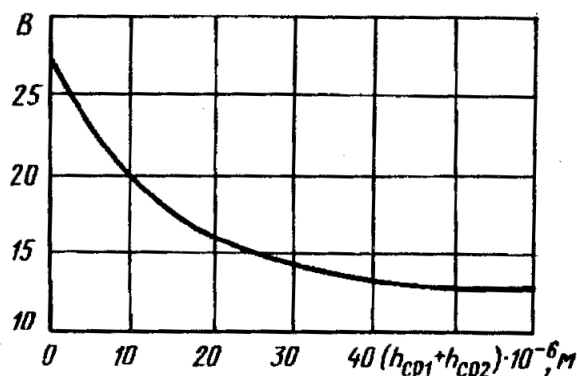


Рис. 7.11

После подстановки в (7.18) выражения для η / ϕ получают формулу:

$$R_{\text{фк.уд}} = 10^{-4} [2,12 \cdot \lambda_m (pV / E)^{0.8}]^{-1}, \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}.$$

Тепловая проводимость прослойки межконтактной среды

$$\bar{\sigma}_{\text{с.уд}} = \lambda_c / \sigma_{\text{экв}})$$

где λ_c – коэффициент теплопроводности среды,

$\sigma_{\text{экв}} = (h_{cp1} + h_{cp2})(1 - m_h)$ – эквивалентное расстояние между контактирующими поверхностями,

h_{cp1}, h_{cp2} – средние высоты микронеровностей контактирующих поверх-

ностей,

m_h – коэффициент заполнения профиля микронеровностей.

Значение $(1 - m_h)$ находят с помощью графика рисунок 7.12.

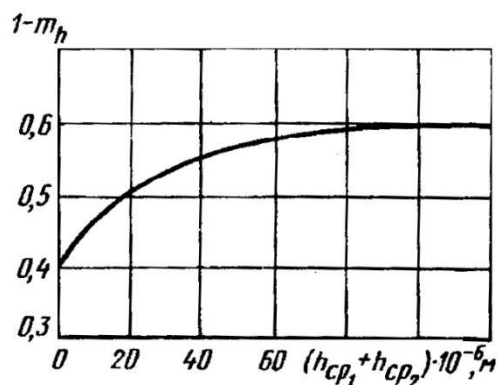


Рис. 7.12

В целом, величина тепловой проводимости контакта зависит от коэффициентов теплопроводности материалов контактирующих элементов, теплофизических свойств межконтактной среды, качества обработки контактирующих поверхностей, удельного давления в контакте и площади контакта.

Значение удельной тепловой проводимости для некоторых контактирующих материалов с шероховатостью поверхности $R_z 20$ и удельным давлением в контакте 1000 н/см^2 приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3.

Материалы контактирующих пар	$\sigma_{куд} \cdot 10^4, \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
1. Медь – алюминий	12,5
2. Медь – медь.	10
4. Медь – сплав Д16Т	5,0
5. Сплав Д16Т – сплав Д16Т	4,0
6. Сталь – сталь	1,5
7. Сталь – сталь (резьбовое соединение)	0,17
8. Металл – краска – металл	0,05

7.6.5 Элементы кондуктивных систем охлаждения

Теплопроводящие шины и рамки в печатных узлах.

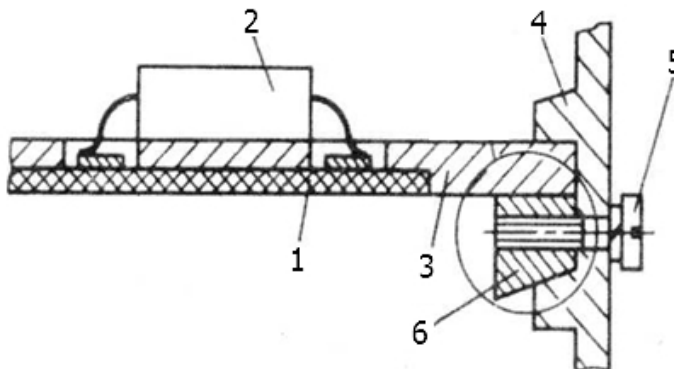
Для теплоотводящих элементов конструкции ЭС в первую очередь важны: теплопроводность, способность к механообработке, разумная цена. Лучшее соотношение этих свойств имеет алюминий и его сплавы. Например, у чистого алюминия $\lambda=247$ Вт/м·град, у литейных сплавов $\lambda \approx 150$ Вт/м·град (обычно содержат много кремния), у сплавов пригодных для штамповки (AlMgSi) – $\lambda=200-220$ Вт/м·град.

В более критичных по тепловому режиму случаях оптимальным материалом может оказаться медь или ее сплавы. Недостатками этих материалов являются высокая плотность и более высокая цена.

Тепловой контакт обычно обеспечивается за счет пайки, сварки, склеивания или с помощью винтов. В последнем случае для уменьшения контактного сопротивления используют специальные пасты или прокладки (они могут также обеспечивать изоляцию).

Разъемные тепловые контакты

На рис. 7.11 показан тепловой контакт, выполненный в виде клина.



1 – печатная плата; 2 – микросхема; 3 – рама;
4 – корпус блока; 5 – винт; 6 – клин.

Рис. 7.11 – Тепловой контакт с помощью клина

Теплопроводящие эластичные материалы

Для снижения теплового контактного сопротивления также используются теплопроводящие эластичные материалы (ТЭМ), которые легко заполняют воздушные зазоры. Они выпускаются в виде паст, клеев, пленок, ве-

ществ с изменяемым фазовым состоянием. Удельная теплопроводность ТЭМ λ в 20–200 раз больше, чем у воздуха и составляет 0,5 – 6 Вт/(м·град).

Состав ТЭМ:

- пластичное вещество-носитель (широко используется силикон),
- наполнитель, в качестве которого применяется оксид цинка, графит, серебро и др.

Основные факторы, влияющие на тепловое сопротивление слоя пасты – ***теплопроводность материала наполнителя, толщина слоя, размер частиц наполнителя.***

На рис. 7.12 изображена зависимость R_{th} от толщины слоя. При ее уменьшении тепловое сопротивление сначала почти линейно снижается, а затем начинает резко возрастать, т.к. слишком тонкий слой приводит к образованию пустот. Оптимальная толщина пасты на графике находится в пределах min-max.

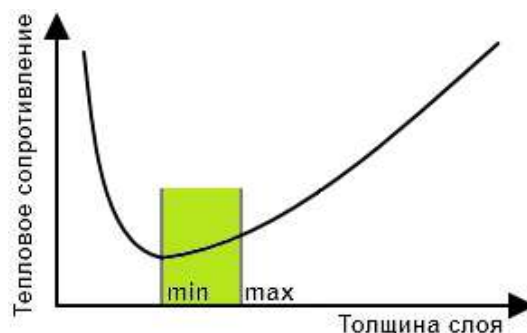


Рис. 7.12

Чем больше частицы наполнителя, тем выше удельная теплопроводность пасты. С другой стороны слой пасты не может быть меньше размеров самых крупных частиц наполнителя. Поэтому некоторые марки паст, например P12 фирмы Wacker, с очень малыми размерами частиц (не более 0,4 мкм), но с небольшой удельной теплопроводностью, в реальных условиях могут превосходить пасты, обладающие гораздо большей паспортной теплопроводностью.

Важнейшей характеристикой паст является максимально допустимое число циклов разогрева-охлаждения. После некоторого их числа тепловое со-

противление слоя пасты начинает резко возрастать, что ограничивает срок ее службы. Количество этих циклов ограничено

Ускоренные испытания позволили получить график зависимости пасты Р12 от количества термоциклов (рис. 7.13). Значение R_{th} снижается в течение первых 2000 циклов, что объясняется уплотнением частиц наполнителя в зазоре контакта. При выполнении примерно 30000 циклов происходит разрушение паяного соединения кристалл-плата, вызванного термомеханическими напряжениями.



Рис. 7.13

В периодике описываются бессиликонные пасты Nordson EFD, которые отличаются более высокой надежностью и долговечностью по сравнению с пастами на основе силикона. Это связано с отсутствием в них «эффекта растекания», который с течением времени приводит к образованию пустот и снижению теплопроводности.

Тепловые трубы – высокоэффективные проводники тепла

☺ **Тепловая трубка (ТТ)** – высокотехнологичное устройство на фазовом переходе теплоносителя. Ее устройство приведено на рис. 7.17.

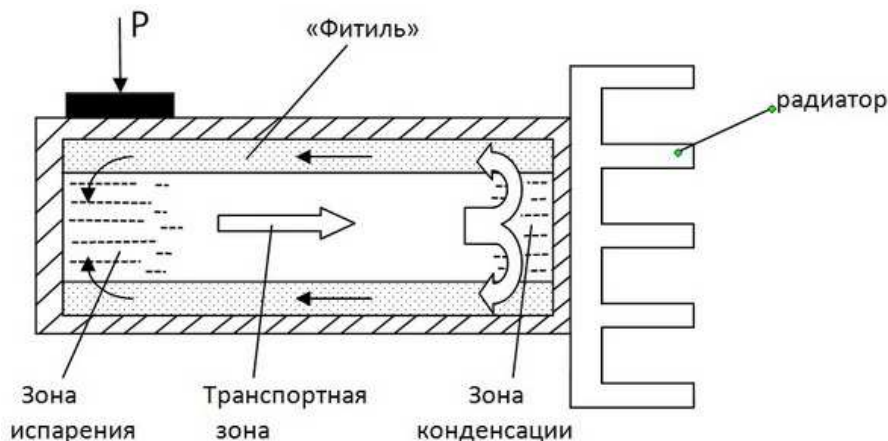


Рис. 7.17 – Устройство тепловой трубы

Впервые идея тепловой трубы была предложена Гоглером (фирма Джeneral Моторс корп.). Патент на нее оформлялся в период конец 1942 года - середина 1944 года.

Конструкция ТТ состоит из герметичного металлического корпуса (сталь, алюминий, медь), стенки которого выложены капиллярно–пористой структурой (КПС), которая необходима для того, чтобы ТТ могла работать в любом положении, при наличии или отсутствии гравитационных сил. КПС изготавливается из металлических и неметаллических сеток, стекло- и металловолокон, металлокерамических порошковых материалов и др. Капиллярная структура может быть выполнена также в виде канавок специальной формы на внутренней стенке ТТ.

В качестве рабочего вещества в ТТ обычно используют:

- в области отрицательных температур – фреоны, аммиак, сжиженные газы;
- в области умеренных положительных температур (до 250 °С) – вещества, характеристики которых приведены в таблице.

Таблица

Вещество	Температура кипения, °С	Уд. теплоемкость, Дж/кг·°С	Удельная теплота испарения, Дж/кг
Эфир этиловый	34,6	2,35	351
Сероуглерод	46,2	1,006	348
Ацетон	56,2	2,18	524
Спирт метиловый	64,7	2,5	1110
Спирт этиловый	78,3	2,43	846
Вода при $H=1 \text{ кг/см}^2$	100	4,18	2260
Вода при $H=0,05 \text{ кг/см}^2$	30		2400

В рабочем режиме в полости ТТ возникают два противоположно направленных потока: через свободное сечение канала из зоны испарения в зону конденсации движется поток пара; в противоположном направлении по КПС – поток конденсата. В стационарном режиме потоки пара и жидкости

взаимно компенсируются и внутри ТТ создается замкнутый циркуляционный поток рабочего вещества.

Основная функция ТТ – высокоэффективная передача тепла. С помощью ТТ можно передавать от сотен ватт до десятков киловатт. Это объясняется тем, что удельная теплота испарения теплоносителя, в сотни раз выше, чем удельная теплоемкость воды, одного из лучших теплоносителей работающего при атмосферном давлении и в приемлемых для электронной аппаратуры температурах (30-90 °С). В соответствующее количество раз и больше отводимая от охлаждаемого объекта мощность.

Термотрубки имеют высокую теплопроводность, скорость распространения тепла вдоль ТТ весьма велика и близка к скорости распространения звука. Это, важно, например, для охлаждения процессоров, которые в зависимости от режима работы, выделяют разное количество тепла.

Сравнительные возможности ТТ и медного стержня одинаковых размеров ($\varnothing$ 13 мм, ℓ = 600 мм):

для Си стержня: $P_{\max} = 5$ Вт, $\Delta t = 70$ °С, $R_T = 70$ град / 5 Вт = 14 град / Вт;

для тепловой трубки в рабочем режиме: $P_{\max} = 200$ Вт, $\Delta t = 0,5$ град, $R_{T\text{эф}} = 0,5 / 200 = 2,5 \times 10^{-3}$ град / Вт.

Т. к. тепловые трубки могут работать при очень малых перепадах температур, то их длина не имеет большого значения, что позволяет отводить тепло от сильно нагретых элементов или ФЯ конструкции ЭС на значительные расстояния (см. рис. 7.18, РМ7.3).

Основные достигнутые характеристики современных тепловых труб:

Рабочий диапазон температур 4 – 2300°K

Скорость теплопередачи – около скорости звука

Мощность теплопередачи, кВт/см² – до 20

Ресурс работы 20 000 ч

Особенности работы тепловых трубок

1) Тепловые трубки, в области температур при которых отсутствует кипение теплоносителя, имеют большое тепловое сопротивление, которое определяется только теплопроводностью стенок трубки вдоль ее длины.

Режимы работы трубки приведены на графике рисунок .

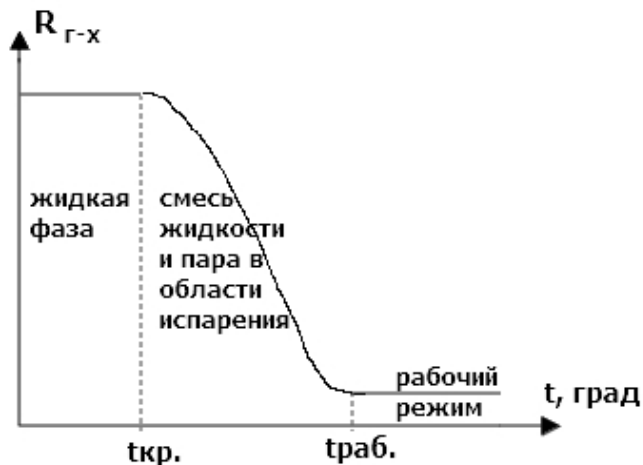
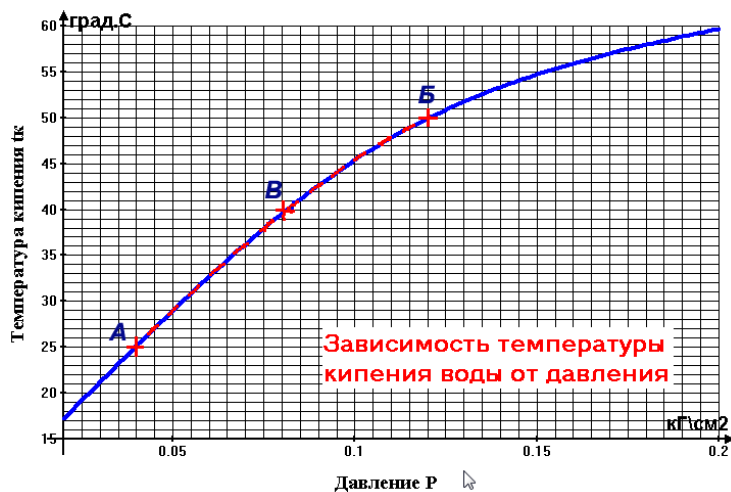


Рис.

На графике видно, что ТТ имеет переходную область ($t_{раб.} - t_{кр.}$). Температура $t_{кр.}$ – это температура закипания. В рабочем режиме тепловое сопротивление $R_{Г-Х}$ минимально для данной трубки. Это значение сопротивления обычно указывается в ее паспорте. Желательно, чтобы ширина переходной области была $(t_{раб.} - t_{кр.}) \rightarrow \text{мин.}$

Рабочее тепловое сопротивление тем меньше чем больше диаметр тепловой трубки, что и понятно. Толстая трубка не только содержит больший объем теплоносителя, но и имеет меньшее сопротивление.

2) Температура закипания зависит не только от состава теплоносителя, но и от давления (рис.),.



Чтобы уменьшить температуру закипания необходимо понизить давление.

3) Максимальная отводимая трубкой мощность определяется уд. тепло-
той парообразования теплоносителя и его объемом.

4) Параметры $t_{кр.}$ и $(t_{раб.} - t_{кр.})$ зависят от уровня технологии. В связи с этим требования к изготовлению ТТ:

- необходимы высокие технологии для изготовления качественных капиллярных структур;
- высокие требования к количеству и составу теплоносителя;
- рабочее давление в ТТ должно быть обеспечено с высокой точностью, например, погрешность давления воды в $\pm 25\%$ в рабочей точке $P_p = 0,07 \text{ кг/см}^2$ дает значительный разброс температуры закипания от $+30$ до $+45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тепловые трубки используются не только для передачи тепла, но и для создания областей с равномерным температурным полем (чтобы, например, снизить механические напряжения), для термостабилизации отдельных компонентов и узлов и для др. целей.

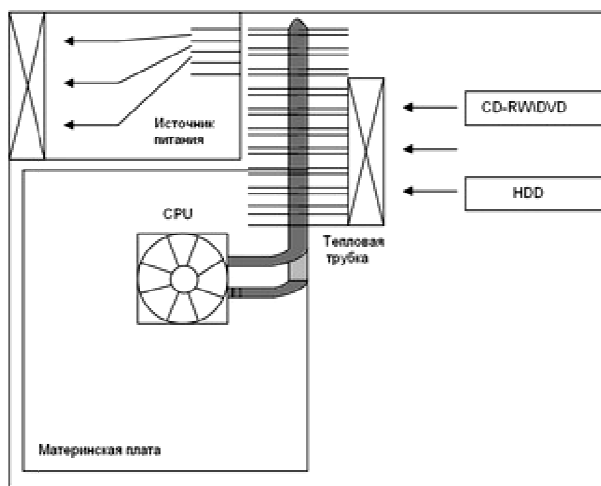


Рис. 7.18 – Пример использования ТТ в системе охлаждения компьютера

Радиаторы

Радиатор – устройство с очень развитой теплоотдающей поверхностью.

Главным показателем эффективности радиатора является тепловое сопротивление радиатор-среда $R_{p-c} = \Delta t/P$, град/Вт. Чем ниже его величина, тем выше эффективность радиатора.

Величина R_{p-c} определяется удельной теплопроводностью материала радиатора, площадью поверхности, геометрией пластин, интенсивностью обдува и др. факторами.

Радиаторы чаще всего изготавливаются из алюминиевых сплавов. В тех случаях, когда его эффективность недостаточна, используют медь. Однако медные радиаторы значительно тяжелее и дороже алюминиевых изделий. Компромиссным решением может стать гибридный радиатор (рис. 7.14).

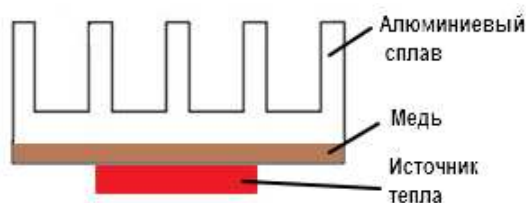


Рис. 7.14 – Устройство гибридного радиатора

Пример эффективности гибридного радиатора.

Пластинчатый радиатор с размерами основания 10×10 см, высотой 1 см, имеющий 900 штырей диаметром 0,18 см, выполнен в двух вариантах: из алюминиевого сплава и в виде гибридной конструкции (толщина слоя меди 0,25 см, слоя алюминия – 0,8 см). На радиатор устанавливается транзистор с размерами 1,3×1,3 см и мощностью 40 Вт. Результаты испытаний приведены в таблице 7.4.

Таблица 7.4.

Параметр	Al	Cu	Al + Cu
Перегрев Δt , °C	23,2	20,3	20,9
Тепловое сопротивление, °C/Вт	0,58	0,51	0,52
Масса, отн. ед.	≈0,6	1	0,76

На эффективность алюминиевого радиатора существенное влияние может оказать анодное оксидирование, которое обычно используется для повы-

шения коррозионной стойкости. Установлено, что покрытие *Ан.окс.* толщиной 12...15 мкм приводит к структурированию поверхности в нано метровом диапазоне. В результате при свободной конвекции теплоотдача улучшается приблизительно на 8 – 10 %. Теплопроводность анодированного слоя приблизительно в 10 раз меньше теплопроводности самого алюминия, поэтому с посадочного места радиоэлемента он должен быть удален.

Дополнительное охлаждение ЭРИ на печатных платах

Основные способы:

- снижение тепловых сопротивлений на участке компонент-среда/компонент-радиатор;
- распараллеливание тепловых потоков;
- принудительное охлаждение (обдув, водяное охлаждение и др.).

Первый способ заключается в увеличении теплопроводности отдельных элементов конструкции, а в ряде случаев - исключение некоторых из элементов из тепловой цепи. Примером может служить используемый в конструировании силовых модулей прием, когда мощный компонент устанавливают не на плату, а непосредственно на металлический корпус изделия с помощью пайки.

Радиаторы для поверхностно-монтируемых компонентов

На рис. 7.15 показана установка силового компонента SMD на площадку-радиатор. Если ее площади недостаточно, то дополнительно выполняют площадку на обратной стороне платы.

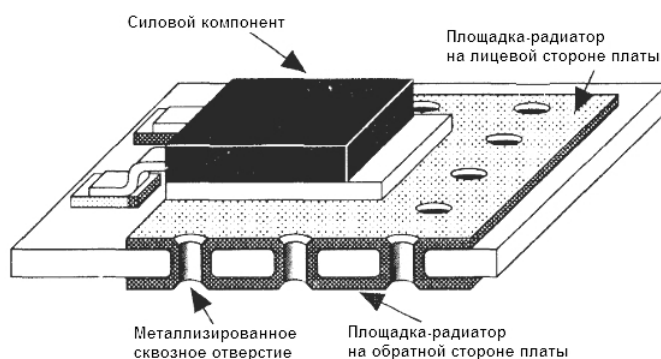


Рис. 7.15

Therma-Bridge (термо-мосты) предназначены для дополнительного охлаждения мощных ЭРЭ на печатных платах. Пример установки термомоста (ТВ) показан на рис. 7.16.

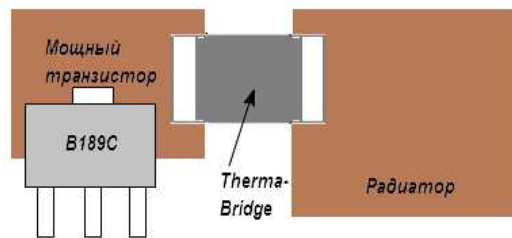


Рис. 7.16

ТВ имеют стандартные размеры как у SMD резисторов. Тепловое сопротивление в зависимости от типоразмера составляет 4,5...19 град/Вт, емкость от 0,075 до 0,48 пФ. В среднем использование ТВ позволяет понизить рабочую температуру термонагруженных чипов на 22...28 %

7.6.7 Термоэлектрические модули (ТЭМ) для охлаждения ЭС

Введение

В основе работы ТЭМ лежит несколько термоэлектрических эффектов, основными из которых являются эффекты Зеебека и Пельтье .

Эффект Зеебека заключается в генерации термоЭДС при нагреве контакта (спая) двух разнородных металлов или полупроводников. Напряжение термоЭДС E_t прямо пропорционально коэффициенту Зеебека ξ и разности температур Δt между холодным и горячим спаями термоэлемента:

$$E_t = \xi \cdot \Delta t.$$

Эффект Зеебека является основой функционирования термоэлектрических генераторов, а также датчиков температуры (термопар).

Эффект Пельтье заключается в том, что при пропускании электрического тока I через контакт (спай) двух проводниковых или полупроводниковых материалов на контакте, помимо джоулева тепла, происходит выделение дополнительного тепла Пельтье при одном направлении тока и его поглощение при обратном направлении.

Эффект назван по имени французского часовщика Пельтье, который в 1834 году его обнаружил.

Основная заслуга в разработке теории термоэлектрических эффектов принадлежит советскому ученому Иоффе и его ученикам (20-е, 30-е годы прошлого века).

Устройство охлаждающих ТЭМ

Термоэлектрический модуль (ТЭМ) – конструктивно завершённое термоэлектрическое устройство, в котором главным функциональным элементом является термопара, состоящая из двух полупроводниковых столбиков р- и n-типа проводимости. Количество термоэлементов (термопар) в разных модулях может меняться от нескольких штук до нескольких сотен. В электрическую цепь столбики соединяются последовательно с помощью медных проводников, выполненных на керамических подложках (рис. 1), а термически они соединены параллельно, чтобы увеличить возможности модуля по охлаждению.

При указанной на рисунке полярности питающего напряжения верхняя сторона ТМ будет горячей, а нижняя – холодной (тепло «качается» в направлении снизу-вверх). Если изменить полярность приложенного напряжения, то процесс пойдет в обратном направлении. Это свойство обратимости существенно расширяет возможности модуля.



Рис. 1 – Структура термоэлектрического модуля

Необходимо отметить, что ТЭМ не может эффективно и надежно работать без отвода теплоты от горячей стороны, поэтому нагретая сторона модуля должна дополнительно охлаждаться. На рис. 2 приведен пример конструкции

охлаждающего устройства, в котором для отвода тепла от ТЭМ (1) используется кулер процессора (2), состоящий из радиатора и вентилятора.

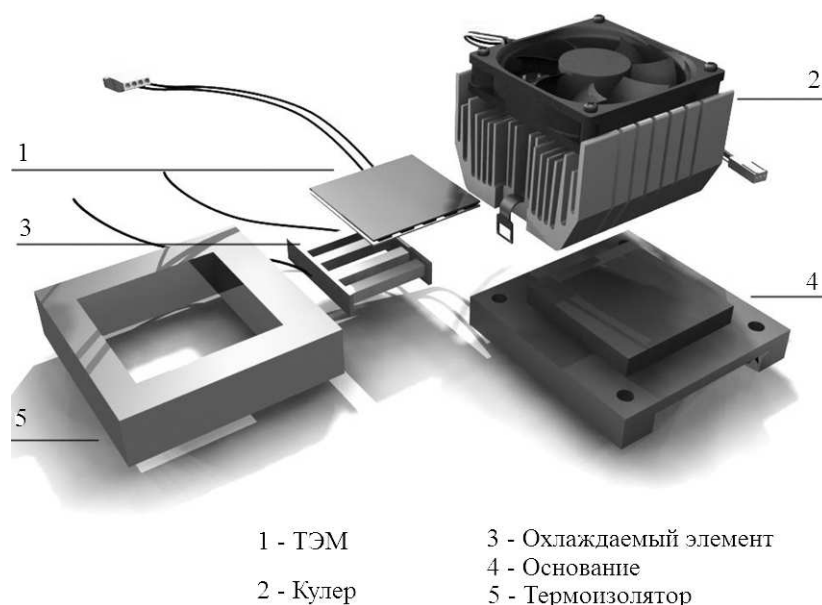


Рис. 2 – 3D модель охладителя процессора

Выпускаемые серийно в разных странах ТЭМ имеют примерно одинаковые типоразмеры. Лидерами в этой области являются компании: «Melcor» (США), «Криотерм» (Россия) и др.

Основные разновидности конструкций ТЭМ: однокаскадные и многокаскадные модули различных типоразмеров, прямоугольной или круглой формы, герметизированные или негерметизированные и др.

Сайт отечественной компании www.kryotherm.ru содержит необходимую информацию от изготовителя для выбора модуля и проектирования системы охлаждения. Кроме ТЭМ компания производит термоэлектрические сборки, генераторные модули, генераторы и др. ТЭ устройства. Принимаются заказы на нестандартные изделия.

Преимущества и недостатки ТЭМ охлаждения, перспективы развития

Охлаждающие устройства на основе термоэлектрических модулей (ТЭМ) выполняют те же функции, что и традиционные компрессионные или абсорбционные холодильные агрегаты, работающие на основе хладагентов. В отличие от этих агрегатов, в ТЭМ роль хладагента выполняет электронный газ

и, по сути дела, модули представляют собой твердотельные тепловые насосы. Основные преимущества ТЭМ по сравнению с другими типами охлаждающих устройств:

1. Возможность охлаждения объекта до температур значительно более низких, чем температура окружающей среды;
2. Отсутствие подвижных частей и рабочих жидкостей, абсолютная бесшумность работы;
3. Возможность работы в любом пространственном положении;
4. Возможность разработки миниатюрных охладителей;
5. Высокая надежность (среднее время наработки на отказ ТМ составляет не менее 200 000 часов, т.е. около 22 лет), неограниченный ресурс работы;
6. Возможность быстрого переключения охлаждения-подогрев путем изменения полярности напряжения питания модуля;
7. Простота управления и возможность прецизионной регулировки температуры (точность $\pm 0,1 \dots \pm 0,001$ °C)
8. Устойчивость к динамическим и статическим перегрузкам.

Недостатки ТЭМ:

1. Невысокий КПД (30 % – однокаскадные, 12 % – двухкаскадные, 3 % – трехкаскадные холодильники), поэтому их целесообразно использовать для холодильных мощностей примерно до 100 Вт. Вместе с этим при мощностях до нескольких Вт термоэлектрический метод во многих случаях считается безальтернативным.

2. Системы охлаждения (СО) на базе ТЭМ проигрывают по удельной массе другим видам СО, например, они имеют уд. массу 15 – 90 г/Вт, жидкостные бортовые системы – (9...11) г/Вт, тепловые трубки – (4...6) г/Вт.

Наибольшие перспективы развития ТЭМ охлаждающих и генераторных устройств связывают с появлением новых термоэлектрических материалов. Основная задача материаловедения – поиск или создание материалов с возможно более высокой добротностью. Это позволит повысить КПД и улучшить холодильные возможности ТЭМ. Определено несколько путей совершенствования термоэлектриков, среди которых самым успешным является создание

сверхрешеток с квантовыми ямами (QWSL), которые уже позволили повысить добротность сразу в 3-6 раз.

Конструкция современного ТМ изображена на рис. 7.19, РМ7.4. Она состоит из двух керамических пластин, между которыми помещено множество полупроводниковых «столбиков» р- и n-типа проводимости, соединенных последовательно. Такая пара материалов обладает наиболее сильно выраженным термоэлектрическим эффектом. Как правило, в ТМ используется легированный теллурид висмута.

Если полярность питающего напряжения будет такой, как показано на рис. 7.16 (РМ7.4), то верхняя сторона ТМ будет холодной, а нижняя – горячей (тепло «качается» в направлении сверху-вниз). Если поменять полярность приложенного напряжения, то процесс пойдет в противоположном направлении.

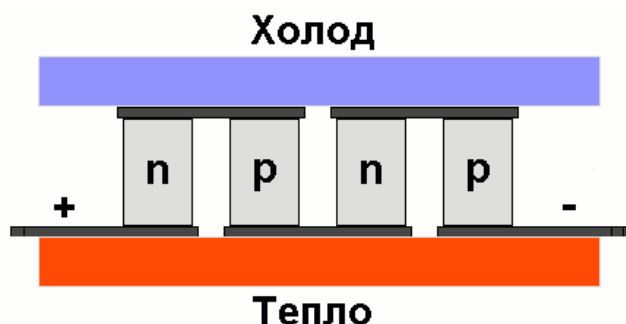


Рис. 7.19 – Устройство термоэлектрического модуля

Типичный модуль обеспечивает значительный температурный перепад, который составляет несколько десятков градусов. При соответствующем принудительном охлаждении нагревающегося радиатора второй радиатор - холодильник, позволяет достичь отрицательных значений температур. Для увеличения разности температур возможно каскадное включение термоэлектрических модулей Пельтье при обеспечении адекватного их охлаждения.

Отметим недостатки ТМ:

1) Невысокий КПД (30 % - однокаскадные, 12 % - двухкаскадные, 3 % - трехкаскадные холодильники), поэтому их целесообразно использовать для «перекачки» небольших мощностей (до нескольких десятков Вт).

2) Ввиду применения в конструкции материалов с высокой плотностью ТМ проигрывают по удельной массе некоторым другим системам охлаждения, например, ТМ имеют уд. массу 15 – 90 г/Вт, жидкостные бортовые системы – 9 – 11 г/Вт, тепловые трубки – 4...6 г/Вт.

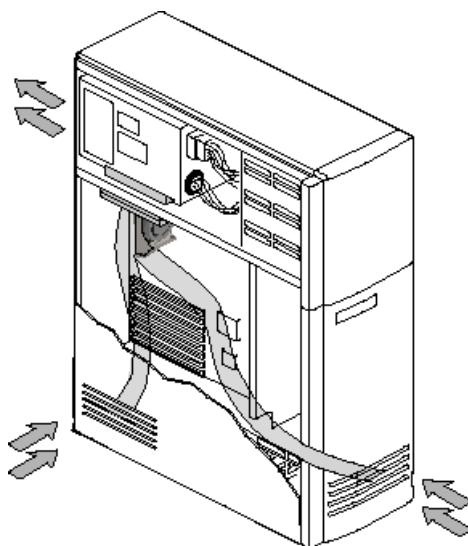


Рис. 7.17 – Направления основных тепловых потоков в ПК стандарта АТХ

7.6.6 Системы охлаждения в персональном компьютере

Начиная с 1997 года в ПК широко используется технология охлаждения сквозным воздушным потоком, направленным от передней стенки корпуса к задней (дополнительно воздух для охлаждения всасывается через левую стенку). Направления основных потоков охлаждающего воздуха в ПК стандарта АТХ показаны на рис. 7.17 (РМ7.1).

Как минимум один вентилятор установлен в блоке питания компьютера (многие модели имеют два вентилятора, что позволяет существенно снизить скорость вращения каждого из них, а, значит, и шум при работе). В любом месте внутри корпуса компьютера можно устанавливать дополнительные вентиляторы для усиления потоков воздуха.

В связи с очень высокой мощностью рассеивания, которую имеют некоторые БИС в ПК (процессор, видеопроцессор), для них необходимы локальные СО. Находят применение системы: воздушного типа, воздушного типа с применением ТТ (рис. 7.15), жидкостные, комбинированные (микрохолодильник + кулер), криогенные.

Воздушная локальная СО состоит из теплоотвода и вентилятора (кулера). В традиционной схеме отвода тепла от процессора (рис. 7.18,а; РМ7.2) имеет место очевидное короткое замыкание воздушных потоков. Выдуваемый вниз теплоотвода теплый воздух под действием конвекции поднимается вверх и опять засасывается вентилятором (имеет место так называемая рециркуляция). Соответственно, КПД кулера существенно падает. Элементарное перекрытие нижнего потока от теплоотвода позволяет выиграть 1-3 градуса, что часто недостаточно для обеспечения нормального ТР процессора. Горизонтальное расположение несколько улучшает ситуацию, и на данный момент является оптимальным при прочих равных условиях.

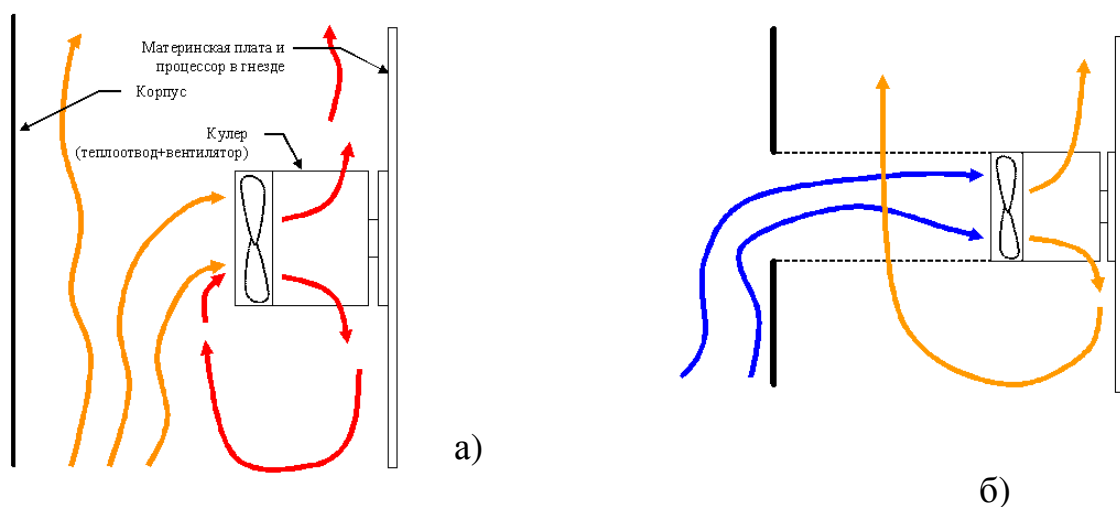


Рис. 7.18 – Традиционная (а) и усовершенствованная (б) схемы отвода тепла от процессора

Одно из простых решений по улучшению теплоотвода (рис. 7.18,б): небольшой патрубок квадратного сечения герметично закрепляется на кулере. В боковой панели системного блока вырезается отверстие соответствующих габаритов. Из рисунка ясно, что воздух в кулер поступает только из внешней

среды, где температура, как правило, на 10-20°C ниже, чем внутри системного блока.

В жидкостных системах охлаждения, схема которой приведена на рис. 7.20, на кристалле процессора монтируется герметично закрытый теплоотвод (рис. 7.19), имеющий входную и выходную трубки (штуцеры). Вне корпуса или в его свободной области устанавливается теплообменник с вентилятором, похожий на автомобильный радиатор. Вместе с водяным насосом эти устройства трубками соединяются в замкнутую цепь, которая заполняется теплоносителем (водой). Насос прокачивает холодную воду через теплоотвод на процессоре, где она забирает тепло и нагревается. По трубкам вода поступает далее в теплообменник вне корпуса, где охлаждается и возвращается опять к теплоотводу.

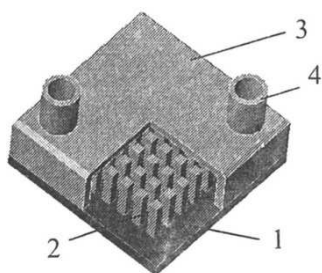


Рис. 7.19 – Конструкция первичного теплообменника:
1-контактная пластина;
2-штыри;
3-крышка;
4- штуцер

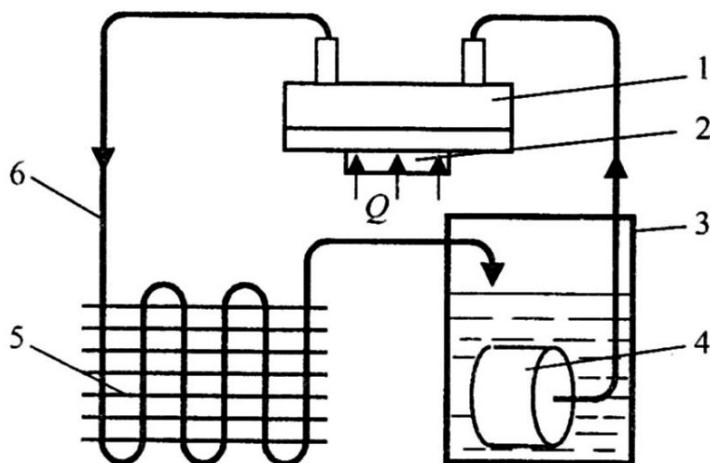


Рис. 7.20 – Схема системы водяного охлаждения:
1 – первичный теплообменник; 2 – процессор;
3 – бачок с водой; 4 – насос; 5 – радиатор;
6 – соединительные шланги

Расширительный бачок снабжают дыхательным и заливным отверстиями. Он обычно имеет объем в несколько раз превышающий изменение объема воды в рабочем диапазоне температур, которое зависит от объема воды в системе и степени ее нагрева. Бачок размещается выше всех узлов входящих в систему охлаждения, а при ее заполнении через него выходит воздух из системы. Кроме того он необходим для выравнивания давления в системе с атмосферным давлением.

Требования к теплоносителю:

- он не должен вызывать коррозию элементов системы;
- не должен проводить электричество;
- антисептические свойства;
- стабильность свойств.

В качестве теплоносителя чаще всего применяется дистиллированная вода. В тепличных условиях даже она со временем начинает заселяться микрофлорой, поэтому в нее добавляют антисептики. Обычно это этиловый спирт, в количестве 12 – 18% от объема воды.

Водяное охлаждение позволяет, образно говоря, вынести кулер на процессоре из корпуса. При цене порядка \$100, системы водяного охлаждения дают выигрыш примерно в 10°C по сравнению с наиболее совершенными кулерами воздушного охлаждения.

Пример.

Вспоминая школьный курс физики, количество теплоты Q полученное теплоносителем массой m при увеличении его температуры на Δt , град, равно:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t, \text{ Дж},$$

где $Q = P \cdot \tau$ – количество теплоты, Вт·с;

c – теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·град;

τ – время в секундах.

Дано: рассеиваемая мощность процессора $P=100$ Вт, емкость камеры первичного теплообменника $V_T=0,03$ л.

Определить температуру перегрева воды.

Масса воды $m = V_T \cdot \rho = 2,99 \cdot 10^{-2}$ кг, теплоемкость воды $c = 4190$ Дж/кг·град.

$$Q = P \cdot t = 100 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 100 \text{ Дж},$$

$$\Delta t = 100 / (2,99 \cdot 10^{-2} \cdot 4190) = 1,25 \text{ град.}$$

Следовательно, при обмене воды в первичном теплообменнике 1 раз в секунду ($0,03 \text{ л/с} = 1,8 \text{ л/мин}$) ее температура повысится на 1,25 град. При снижении расхода до 0,18 л/мин соответственно $\Delta t=12,5$ град.

Криогенные системы отличаются от водяных систем только тем, что в качестве теплоносителя вместо воды используется «прирожденный» термальный агент — фреон. Соответственно, контур охлаждения должен иметь очень хорошую герметичность, а насос и теплообменник должны быть приспособлены для работы с фреоном.

Эффективность этой системы выше, чем предыдущих, например, при тепловыделении 70 Вт температура процессора может поддерживаться в районе 5°C. Однако стоит криогенная система как минимум несколько сотен долларов.

Использование термоэлектрических модулей в ПК. Как правило, ТМ используются в системах охлаждения ПК в качестве теплового насоса, устанавливаемого между кристаллом процессора и кулером. Он позволяет поддерживать разность температур своих рабочих поверхностей в районе 40°C при отдаваемых кристаллом десятках ватт тепла.

Это не означает, что добавление ТМ автоматически снижает температуру процессора на эту величину. Применение микрохолодильника в некоторой степени повышают КПД кулера за счет увеличения эффективности теплообмена между теплоносителем (воздухом) и теплоотводом (радиатором), нагретым на дополнительные 40°C. Ведь известно, что эффективность теплообмена зависит от разности температур холодного теплоносителя и горячего источника тепла.

Недостатки:

1) ТМ потребляет от источника питания ПК большую мощность. Например, модуль CP1,4-127-06L имеет следующие предельными параметрами: $I_{MAX} = 6,0 \text{ А}$ при $E_{П.НОМ} = 12 \text{ В}$. Возможности: $Q_{MAX} = 53 \text{ Вт}$, $\Delta T_{MAX} = 72 \text{ град}$

2) В случае отключения ТМ радиатор сам начинает разогревать кристалл и в принципе может его «испечь». Поэтому необходима дополнительная система контроля.

8 ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЭС

8.1 Механические воздействия, их влияние на работоспособность ЭС

К основным механическим воздействиям относят: **линейные ускорения, вибрация, удары и акустические шумы.**

✓ Линейные ускорения характерны для всех объектов, движущихся с переменной скоростью (например, при разгоне и торможении). Их наличие обусловлено силами инерции, которые могут во много раз превышать силы тяготения. Также если объект движется по криволинейной траектории, например по дуге окружности, элементы конструкции ЭС будут испытывать центробежное ускорение.

Линейные ускорения, за исключением кратковременных ускорений, не могут быть устранены или ослаблены. Эта особенность характерна только для линейных ускорений. Работоспособность конструкций в этом случае может быть обеспечена только за счет повышения жесткости и прочности элементов, что обычно ведет к увеличению массы изделия.

✓ Под вибрацией ЭС понимают механические колебания конструкции в целом или её элементов. Вибрация может быть **периодической** или **случайной**. В свою очередь периодическая вибрация подразделяется на **гармоническую** и **полигармоническую**, а случайная – на **стационарную**, **нестационарную**, **узкополосную** и **широкополосную**.

Гармоническая вибрация в реальных условиях встречается редко, но широко используется при моделировании МВ.

При описании гармонической вибрации обычно пренебрегают начальной фазой колебаний:

$$z(t) = Z \sin \omega t, \quad (8.1)$$

где $z(t)$ - виброперемещение основания, м;

Z - амплитуда виброперемещения, м;

ω – круговая частота, 1/с.

Последовательно дифференцируя (8.1), определяем виброскорость

$$v(t) = \dot{z}(t) = \omega Z \cos \omega t,$$

и виброускорение

$$a(t) = \ddot{z}(t) = -\omega^2 Z \sin \omega t.$$

Амплитуды виброперемещения Z , виброскорости ωZ , виброускорения $\omega^2 Z$ и круговая частота колебаний ω являются основными характеристиками гармонической вибрации. Кроме них гармоническую вибрацию часто характеризуют **вибрационной перегрузкой**

$$n_g = |a| / g = \omega^2 Z / g \approx 4 Z f^2, \quad (8.2)$$

где f – частота вибраций, Гц.

Пример. Найти амплитуду колебаний резистора, если на него действует гармоническая вибрация с частотой $f=0,25$ кГц и виброперегрузкой $n_g=10$.

$$\text{Решение: } Z = \frac{n_g}{4 \cdot f^2} = \frac{10}{4 \cdot 250^2} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Кроме вибрации, конструкции ЭС часто подвергаются **ударным воздействиям**. Интенсивность ударного воздействия зависит от формы, амплитуды и длительности ударного импульса.

Формой ударного импульса называется зависимость ударного ускорения от времени $a(t)$. Импульс на практике имеет произвольную форму, но при расчетах и испытаниях для упрощения используют правильные формы, показанные на рисунке 8.1.

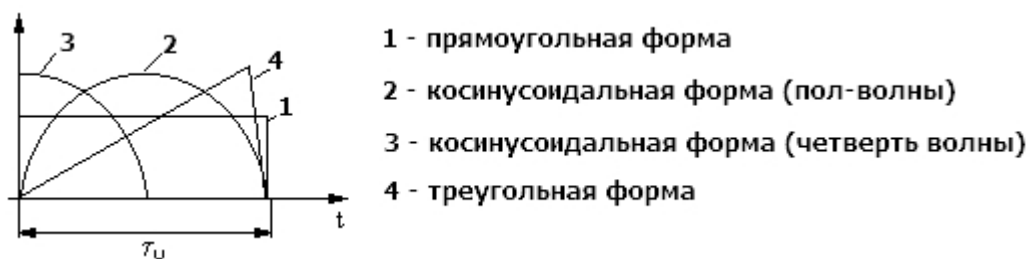


Рис. 8.1 – Формы импульсов, используемые для замены реального импульса

При замене реального импульса идеализированным особое внимание обращается на крутизну *фронта* и *среза*, так как от них зависит «жесткость» удара.

При периодическом приложении ударных импульсов блок ЭС на упругих опорах приходит в колебательное движение. Поэтому возникает необходимость его защиты не только от ударов, но и от вибраций.

Акустические воздействия характерны для ракетных и бортовых ЭС, иногда для наземной военной аппаратуры. Главное отличие данного вида воздействия от вибрации состоит в распределенном приложении сил, зависящих не только от уровня звукового давления, но и от эффективной площади изделия (вибрация и удары, как правило, воздействуют на изделие только через точки его крепления). Способы защиты от них особые и решаются индивидуальным порядком. В данном курсе не рассматриваются.

В результате механических воздействий в элементах конструкций ЭС могут происходить **обратимые** и **необратимые** изменения.

Обратимые изменения характерны для ЭРЭ и приводят к нарушению устойчивости и ухудшению качества функционирования аппаратуры. Это связано с деформациями в конструкциях ЭРЭ, приводящих к изменению их параметров (конденсаторы, кварцевые резонаторы, полупроводниковые приборы, кабели и др.); с нарушением разъёмных и неразъёмных контактов, а также с изменением параметров практически всех видов полей.

Необратимые изменения (разрушения) свойственны конструктивным элементам ЭС. Они происходят при превышении в этих элементах допустимых значений ускорений, перемещений и напряжений. Известно, что в первую очередь к разрушению склонны элементы, которые были предварительно нагружены при монтаже.

При вибрационных воздействиях в выводах ЭРЭ возникают знакопеременные механические напряжения, приводящие к усталостным разрушениям.

Усталостью называется процесс постепенного накопления повреждений в материале детали под действием переменных напряжений.

Наиболее жёсткие условиями эксплуатации свойственны бортовым ЭС. Например, на них могут воздействовать вибрации с частотами от нескольких до 2000 Гц, с уровнями ускорений до 50 g. В указанной полосе частот часто не удастся избавиться от резонансов элементов конструкции, при которых сильно возрастают ускорения, перемещения и напряжения в них, что может привести к их разрушениям.

По статистике на МВ приходится от 30% до 50% отказов бортовых ЭС, причем, из них 80% приходится на усталость. Приведенные цифры показывают актуальность обеспечения механической прочности конструкций ЭС.

Согласно ГОСТ 166019-2001 изделия ЭС должны отвечать требованиям **прочности, устойчивости и стойкости** к внешним воздействиям, включая механические воздействия.

Прочность ЭС – способность ЭС сохранять свои параметры в пределах установленных допусков после воздействия механических и климатических факторов. Более узкие понятия: **вибропрочность, ударопрочность**.

Устойчивость ЭС – способность ЭС сохранять свои параметры в пределах установленных допусков во время воздействия механических и климатических факторов. Более узкие понятия: **виброустойчивость, удароустойчивость**.

Стойкость ЭС – способность ЭС сохранять свои параметры в пределах установленных допусков, измеренные во время и после воздействия механических и климатических факторов. Более узкие понятия: **вибростойкость, стойкость к ударам**.

Разработчики ЭС очень часто ограничиваются только стендовыми испытаниями конструкций на прочность и устойчивость, не прибегая к математическому моделированию. Недостатками такого подхода являются:

- сами по себе испытания малоинформативны из-за невозможности установить датчики во многих точках изделия;
- испытания не позволяют провести исследования конструкции в критических режимах из-за её разрушения;
- результаты испытаний изделия нельзя распространить на другие образцы из-за случайных разбросов свойств материалов и др. параметров.

Оптимальный путь – интеграция математического моделирования с экспериментом.

8.2 Механические модели ЭС

Для определения динамических характеристик ЭС как сложной механической системы (МС) строится ее модель, которая должна быть достаточно



Моделью можно пользоваться,
но не следует ей верить
Генри Тиль

точной и в то же время достаточно простой для аналитического исследования. К важнейшим характеристикам МС относятся:

масса – мера ее инертности;

число степеней свободы N – определяется количеством координат, необходимым для однозначного задания положения системы в пространстве;

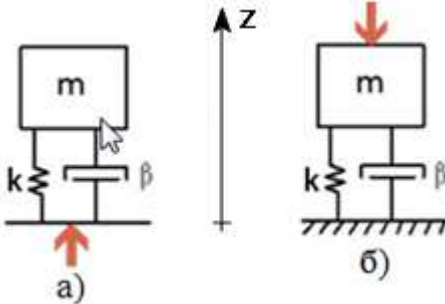
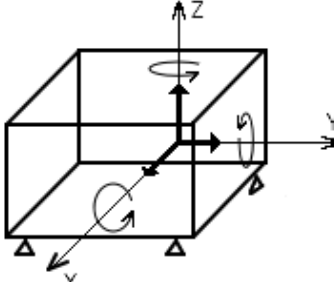
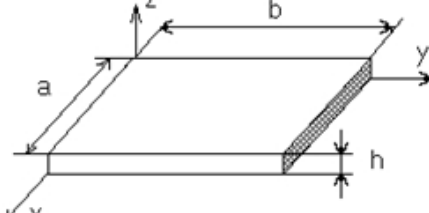
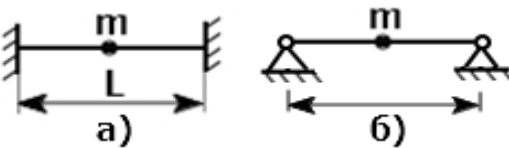
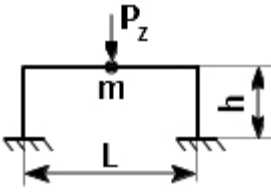
жѐсткость – отношение действующей силы к деформации конструкции, вызванной этой силой.

Число N в общем случае является бесконечно большим, так как любое тело состоит из бесконечного числа материальных точек, не имеющих между собой абсолютно жестких связей. При решении инженерных задач, реальные конструкции заменяется моделью с несколькими степенями свободы.

В таблице 1 на рис. Т.1.1 приведена наиболее простая модель блока на виброизоляторах с одной степенью свободы и с сосредоточенными параметрами, если он перемещается только вдоль одной оси Z . В этой модели вся масса конструкции **сосредоточена** в элементе массы m , жесткость конструкции – в элементе (пружине) с коэффициентом жесткости k , а демпфирующие связи – в элементе сопротивления (демпфирования) с коэффициентом β . Поведение такой модели определяется не только параметрами m , k , β и характером действующей силы, но и местом приложения этой силы. В связи с этим, различают модели с **кинематическим** и **силовым** возбуждением (рис. Т.1.1 а, б).

Для расчета изделия на виброизоляторах (амортизаторах) последнее рассматривается как абсолютно твердое тело, установленное на упругих связях, соединяющих изделие с основанием. Массой виброизоляторов по сравнению с массой изделия пренебрегают.

Таблица 1 – Примеры простых механических моделей

Модель	Рис.	Особенности	Пример использования
	Т.1.1	Элементарные модели с сосредоточенными параметрами, одна степень свободы, кинематическое (а) или силовое (б) возбуждение	Определение собственной частоты блока на виброизоляторах
	Т.1.2	Модель блока на виброизоляторах с шестью степенями свободы	Расчет системы виброизоляции блока
	Т.1.3	Модель блока, содержащего три ПУ. Она имеет сосредоточенные параметры, две степени свободы, кинематическое возбуждение	Расчет механических воздействий на печатные узлы в составе блока
	Т.1.4	Исходная геометрическая модель равномерно нагруженной пластины	Расчет механических характеристик ПУ, МСБ и др. плоских конструкций при заданных граничных условиях
	Т.1.5	Балка с жестко закрепленными концами (а) и с шарнирным креплением (б)	Расчет механических характеристик электрорадиоэлементов
	Т.1.6	Рама с жестко закрепленными концами и внешней силой, действующей вдоль оси Z	Расчет механических характеристик электрорадиоэлементов

Такие допущения позволяют считать изделие системой с 6 степенями свободы: три – при перемещении центра масс вдоль осей X , Y , Z , и еще три – при вращениях относительно этих осей (рис. Т.1.2). Принятые допущения приводят к тому, что амплитудно-частотные характеристики реального блока и расчетной модели будут различаться. Однако, если частотный диапазон возмущения узкий и элементы внутри блока достаточно жесткие, данные различия несущественны.

На рис. 8.2 представлен эскиз конструкции блока разъемного типа. Его модель на рис. Т.1.3 имеет две степени свободы:

- первую степень свободы по отношению к действующей извне вибрации вносит шасси;
- вторую степень свободы вносит печатный узел (ПУ) относительно шасси, поскольку динамические усилия могут быть переданы на печатные платы только через этот элемент конструкции.



Рис. 8.2 – Эскиз конструкции блока

Планарные конструкции, например, функциональные ячейки и микросборки обычно представляются в виде равномерно нагруженной пластины (рис. Т.1.4).

Пластиной принято считать планарную деталь или узел, высота которой как минимум в 10 раз меньше ее короткой стороны в плоскости.

Для расчета любой модели необходимо задать краевые условия, которые обычно определяются способом закрепления объекта моделирования. В моделях пластины обычно принимают варианты закрепления краев: жесткое защемление, свободное опирание края пластины, свободный край пластины.

Электрорадиоэлементы, а также многие элементы несущих конструкций ЭС, имеют стержневую конструкцию, которую обычно представляют балкой или рамой (рисунки Т.1.5 и Т.1.6).

Массу ЭРЭ в этих моделях допустимо считать сосредоточенной при условии: $m_K \geq 10 \sum_{i=1}^n m_{ei}$,

где m_K – масса корпуса ЭРЭ;

m_{ei} – масса одного вывода;

n – количество выводов ЭРЭ.

Концы моделей стержневых конструкций могут иметь жесткое или шарнирное закрепление, или свободное опирание.

Рассмотрим несколько примеров на рис. 8.3.

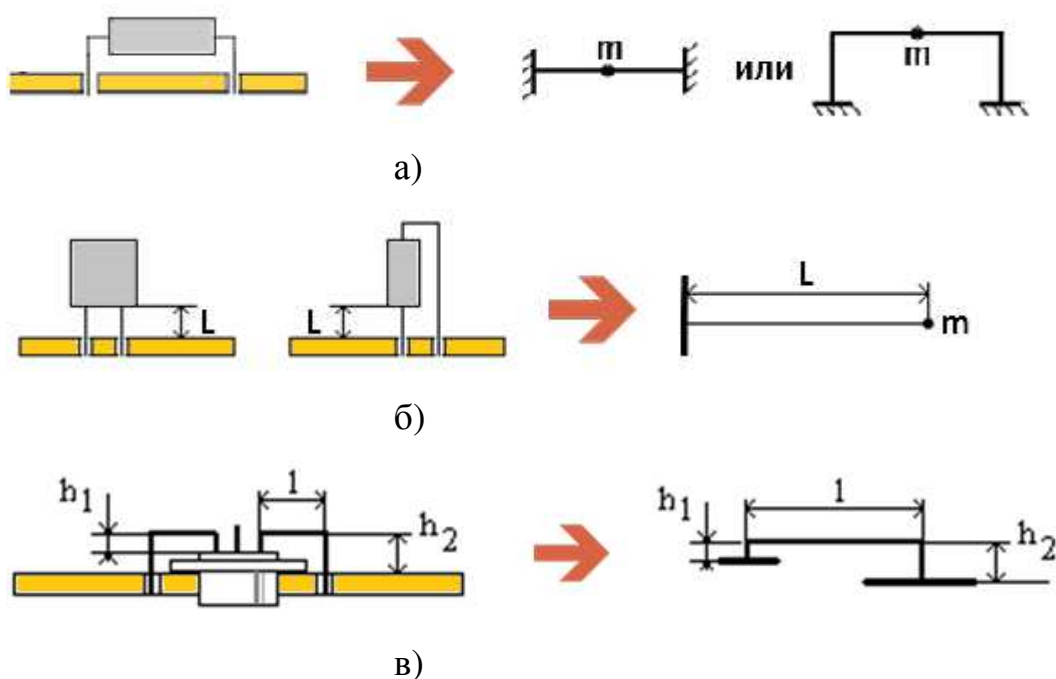


Рис. 8.3 – Примеры моделей ЭРЭ

В стержневых конструкциях могут возникать *продольные, крутильные и изгибные колебания*. Среди них изгибные колебания представляют наибольший интерес, т.к. жесткость стержня на изгиб значительно меньше жест-

кости на растяжение, сжатие и кручение. Поэтому обычно при моделировании конструкций ЭС учитываются только изгибные колебания.

8.3 Силы, действующие в МС

В общем случае в МС могут действовать следующие внешние и внутренние силы:

- вынуждающие силы, обусловленные внешними воздействиями
- восстанавливающие силы,
- диссипативные силы,
- силы инерции (добавить разъяснение).

Восстанавливающими силами наиболее часто являются силы упругости, которые могут быть линейными и нелинейными. Если между силой и вызванной ею деформацией имеется линейная зависимость, упругие свойства системы с одной степенью свободы характеризуются одним числом – коэффициентом жесткости k , который определяется как отношение действующей силы P к деформации z :

$$k = P/z$$

Для простых систем существуют стандартные формулы, позволяющие рассчитать коэффициент жесткости. Например, их можно найти в [].

Диссипативные силы вызывают необратимое рассеяние энергии механических колебаний, благодаря чему происходит уменьшение (демпфирование) вибрации. Примеры:

- силы трения в опорах и сочленениях;
- силы внутреннего трения в материалах опор (в амортизаторах).

Демпфирующие свойства конструкций часто характеризуют **коэффициентом механических потерь (КМП)**, который определяет, какую часть диссипативная сила составляет от силы упругости.

Результаты испытаний печатных узлов показывают, что их КМП лежит обычно в пределах $\eta = 0,025 - 0,07$. В таблице 2 приведены демпфирующие свойства некоторых материалов.

Таблица 2.

Материал	Напряжение $\sigma \cdot 10^7, \text{Н/м}^2$	$\eta \cdot 10^{-2}$
<i>Алюминиевые сплавы</i>		
АЛ-9	2 - 10	0,06 – 0,14
Д16	2 - 8	0,08 – 0,22
АМц	1,5 - 6	0,12 – 0,22
АМг	2 - 8	0,1 – 0,13
<i>Другие материалы</i>		
Латунь ЛС59-1	5 - 15	0,05 – 0,1
Гетинакс	1 - 4	0,05 – 0,3
Стеклотекстоит	0,5 - 4	0,3 – 1,3

8.4 Уравнения движения

Уравнения движения (уравнения динамики), описывающие колебательные процессы, называются также **уравнениями колебаний**. В общем случае на основе принципа Даламбера они включают восстанавливающие, диссипативные, вынуждающие силы и силы инерции. Имеются отличия в составлении уравнений движения систем с сосредоточенными и распределенными параметрами.

В наиболее общем случае трехмерной конструкции с распределенными параметрами колебания механической системы могут быть представлены через уравнения колебания отдельных точек системы, называемых **уравнениями Ламе**. Эти уравнения могут применяться для анализа как систем с распределенными параметрами, так и систем с дискретными (сосредоточенными) параметрами.

Решение уравнений Ламе в общем случае сложно, поэтому их упрощают используя различные гипотезы, и сводят трехмерную задачу к двухмерной или одномерной задачам.

Таким образом получены широко известные 2 уравнения для свободных изгибных колебаний:

- для пластин

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + D \left(\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} \right) = 0, \quad (8.3)$$

где $z=z(x,y,t)$ – виброперемещение пластины, определяемое в точке с координатами (x,y) при направлениях осей координат как на рисунке Т.1.4;

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\varepsilon^2)}$ – цилиндрическая жесткость пластины;

E – модуль упругости материала пластины;

ε – коэффициент Пуассона;

- для балок

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 z}{\partial z^2} \right) + m_0 \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = 0, \quad (8.4)$$

где EJ – жесткость балки на изгиб;

m_0 – распределенная масса балки [кг/м].

Методы решения уравнений движения могут быть **аналитическими** и **численными**. Аналитические методы, к которым относятся методы разделения переменных, позволяют получить решение в виде формулы или группы формул, анализ которых дает наглядное представление о влиянии конструктивных параметров на характеристики динамических процессов и оптимизировать конструкции. Основной недостаток аналитических методов в трудности математического описания собственной формы колебаний и граничных условий для сложных конструкций. Поэтому аналитические методы наиболее часто применяют для конструкций простой формы с “классическими” способами крепления типа жесткого защемления, свободного опирания или незакрепленного края пластины или конца балки.

Пример. Расчет СЧК плат сложных форм (неправильной формы, с вырезами, с крепежными отверстиями расположенными произвольно и т.п.) аналитическим путем в принципе возможен, но крайне сложен.

Численные методы, среди которых наибольшее применение получили методы конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР), граничных элементов, не имеют принципиальных препятствий для решения сложных конструкций со сложными способами крепления. Характерным для

этих методов является замена исходных дифференциальных уравнений алгебраическими уравнениями за счет дискретизации конструкции.

К недостаткам численных методов относятся:

- необходимость решения большой системы алгебраических уравнений;
- дискретизация приводит к погрешности, оценка которой часто более сложная задача, чем нахождение основного решения.

Поэтому применение численных методов целесообразно, если аналитические методы не пригодны. Это объясняет целесообразность параллельного развития как аналитических, так и численных методов. Наибольший эффект очевидно можно получить при разумном сочетании обоих методов.

8.5 Колебания систем с одной степенью свободы

Свободные колебания

Рассматривают свободные колебания *без затухания* и *с затуханием*. Свободные колебания без затухания в природе не встречаются, однако их анализ проводят с целью определения собственных частот колебаний системы.

Рассмотрим модель, изображенную на рисунке Т.1.1,б, но без элемента сопротивления β (*затухание отсутствует*). Уравнение, описывающее колебания этой модели имеет вид:

$$m \ddot{z} + kz = 0 \quad (8.5)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$z = \left(\frac{V}{\omega_0} \right) \cdot \sin \omega_0 t = Z \sin \omega_0 t ,$$

где ω_0 – собственная угловая частота колебаний;

$Z = \frac{V}{\omega_0}$ – амплитуда свободных колебаний;

V – мгновенная (начальная) скорость, которая была сообщена массе m в момент времени $t=0$.

Частота собственных колебаний находится по формуле:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8.6)$$

Собственными, или свободными, колебаниями называется движение при отсутствии внешних сил и сил демпфирования.

Частота ω_0 не зависит от начальных условий (от начальной скорости V) и определяется только собственными параметрами МС (k и m), поэтому она получила название **собственной частоты**. С увеличением массы или с уменьшением жесткости пружины k , частота ω_0 уменьшается.

Если $\beta \neq 0$ (в системе имеются потери), то будут наблюдаться затухающие колебания, показанные на рис. 8.5.

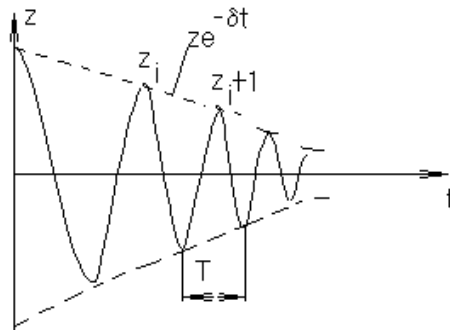


Рис. 8.5

Вынужденные колебания (модель на рис. Т.1.1, б).

В этом случае необходимо решить уравнение, полученное исходя из принципа Д'Аламбера:

$$m \ddot{z} + \beta \dot{z} + kz = P_0 \sin \alpha t, \quad (8.7)$$

где $P = P_0 \sin \alpha t$ – внешняя возбуждающая сила;

$P_u = m \ddot{z}$ – сила инерции;

$P_y = kz$ – сила упругости пружины;

$P_\delta = \beta \dot{z}$ – диссипативная сила (сила демпфирования).

В результате решения (8.7) можно получить выражение для амплитуды вынужденных колебаний:

$$Z_B = z_{cm.} / \sqrt{\gamma^2 \nu^2 + (1 - \nu^2)^2}, \quad (8.8)$$

где $z_{ст.} = P_0/k$ – статическое смещение системы под действием силы P_0 ;

$\nu = \omega/\omega_0$ – коэффициент расстройки, или частотное отношение;

$\gamma = \beta \cdot \omega_0/k$ – коэффициент механических потерь (КМП).

Из (8.8) находим одну из основных динамических характеристик системы – коэффициент динамического усиления, или *коэффициент динамичности*:

$$\mu = Z_B/z_{ст} = 1/\sqrt{\gamma^2\nu^2 + (1-\nu^2)^2}, \quad (8.9)$$

Коэффициент динамичности μ системы показывает, как в зависимости от частотной расстройки изменяется амплитуда вынужденных колебаний относительно ее статического смещения Z_{cm} .

Для расчета резонансных амплитуд необходимо в формулу (8.8) подставить значение $\nu=1$. Тогда получим: $\mu=1/\gamma$ независимо от принимаемой модели диссипативной силы.

Кинематическое гармоническое возбуждение

Пусть основание МС перемещается по гармоническому закону (рис. 11), тогда уравнение движения системы с демпфированием имеет вид:

$$m\ddot{z} + b(\dot{z} - \dot{z}_a) + k(z - z_a) = 0,$$

где $z - z_a = z_1$ – упругая деформация связей.

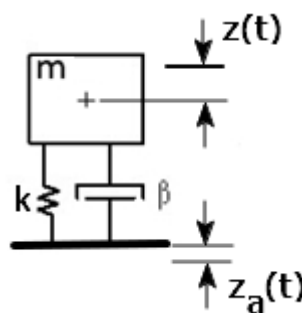


Рис. 8.6 – МС с одной степенью свободы при кинематическом возбуждении

Для этого случая выражение для определения амплитуды колебаний системы имеет вид:

$$Z_B = Z_a \frac{\sqrt{1 + \gamma^2\nu^2}}{\sqrt{(1-\nu^2)^2 + \gamma^2\nu^2}}, \quad (8.10)$$

Величина $\eta = \frac{Z_B}{Z_a} = \frac{\sqrt{1+\gamma^2 v^2}}{\sqrt{(1-v^2)^2 + \gamma^2 v^2}}$ носит название **коэффициента пе-**

редачи системы (др. название – **коэффициент динамического усиления** при кинематическом возбуждении системы). Этот параметр определяет АЧХ системы при кинематическом возбуждении (рис. 8.7).

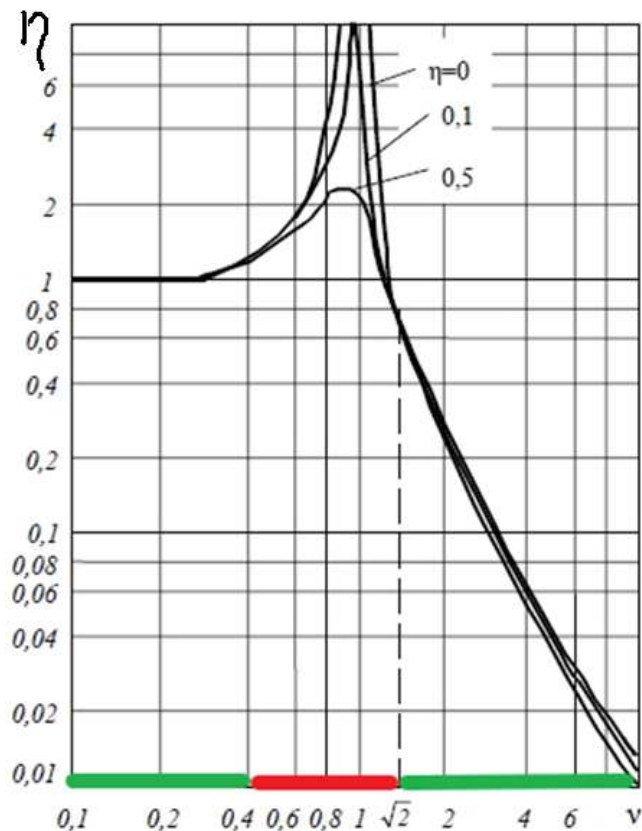


Рис. 8.7 – Зависимость коэффициента передачи МС от частотной расстройки

Пример. Слабо демпфированная конструкция печатного узла закреплена в четырех точках по углам. В местах крепления (на входе) плата совершает колебания с максимальной амплитудой равной **0,025 мм**, а в ее центре (на выходе) при резонансе ПУ вибросмещение достигает **2,5 мм**. Следовательно, коэффициент передачи системы **$\eta = 2,5:0,025 = 100$** .

На графике можно выделить три области.

1) Когда $v < 0,4$ и коэффициент передачи $\eta \approx 1$ интервал называется областью дорезонансных колебаний. Т.к. $v = f/f_0$, для этой области справедливо неравенство $f_0 > 2,5f$. То есть для исключения возможности резонансных колебаний необходимо, чтобы собственная частота колебаний f_0 в 2,5 раза превы-

шала частоту возбуждения. На практике чаще используют соотношение $f_0 > 2,0 \cdot f$. Этот способ устранения резонансных колебаний называется **частотной отстройкой**. Его обычно применяют, если частоты возбуждающих колебаний не превышают 500 Гц, так как при действии вибраций в более широком диапазоне для увеличения f_0 приходится повышать жесткость конструкции.

2) Если частотный диапазон возбуждения превышает 500 Гц, полностью устранить резонансные колебания не удастся, и конструкция будет находиться в области **резонансных колебаний**, когда $0,5 < f/f_0 < 1,5$. В этом случае обычно $\eta \gg 1$, что недопустимо, так как могут возникать отказы из-за многократного возрастания амплитуд колебаний. Уменьшить амплитуды можно увеличением КМП, то есть увеличением **демпфирующих** свойств конструкции. Этот способ особенно перспективен для бортовых ЭС.

3) На практике часто возникают ситуации, когда амплитуды возбуждающих колебаний превышают допустимые для ЭРЭ величины. Это требует изоляции изделия от виброактивного основания с целью обеспечения условия $\eta < 1$. Это достигается в **зарезонансной области**, когда $\nu > 2^{0,5}$ (рис.). Для обеспечения эффективной **виброизоляции**, когда $\eta < (0,1-0,2)$, необходимо выполнить условие $f/f_0 > 4 \div 5$.

8.6 Расчет собственной частоты моделей в виде балки и рамы

Рассмотрим балку с равномерно распределенной нагружающей массой (рис. 8.8).

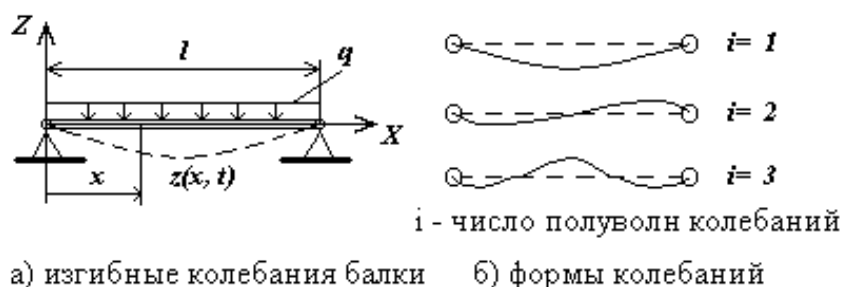


Рис. 8.8 – Колебания балки, $Z(x, t)$ – максимальный прогиб балки при вибрации

Балка считается равномерно нагруженной массой m , $q = m \ddot{z}/l$ – распределенная нагрузка балки. При составлении ее математической модели принимается ряд допущений, в том числе считается, что в системе действуют только силы инерции, направленные вдоль оси Z , и силы упругости, препятствующие деформации изгиба балки. В этом случае справедливо уравнение движения балки (2). Его решение с заданными граничными условиями представляет собой выражение для частоты свободных колебаний балки:

$$\omega_{0i} = \frac{\lambda_i^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m_0}}, \quad (8.11)$$

где λ_i – коэффициент определяющий форму колебаний и способ закрепления балки;

$E \cdot J$ – жесткость балки на изгиб;

m_0 – распределенная масса балки [кг/м];

i – номер тона колебаний.

Значения λ_i в зависимости от номера гармоники ($i=1,2,3,\dots$) и способа закрепления концов балки приводятся в справочной литературе. Например, для шарнирно закрепленных концов $\lambda_i = i\pi$, для жесткого закрепления $\lambda_1=4,73$; $\lambda_2=7,853$ и т.д.

Рассмотрим случай, когда балка наряду с распределенной массой, содержит несколько сосредоточенных масс (рис. 8.9).

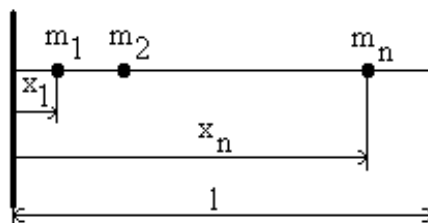


Рис. 8.9 – Балка с несколькими сосредоточенными массами

В этом случае в формулу (8.11) необходимо подставлять эквивалентную распределенную массу, определяемую по формуле

$$m_{\Sigma} = m_0 + \frac{1}{l} \sum_{n=1}^n K_n \cdot m_n,$$

где m_n - сосредоточенная масса;

n - число сосредоточенных масс;

K_n - коэффициент приведения сосредоточенной массы к равномерно распределенной массе.

Величина коэффициента K_n находится в таблице. Она зависит от отношения x_n/l , от вида расчетной модели балки и от номера гармоники.

Рассмотрим модель в виде рамы. Её особенностью является то, что частота свободных колебаний зависит не только от параметров модели, но и от направления действия внешней силы (Рис. 8.10).

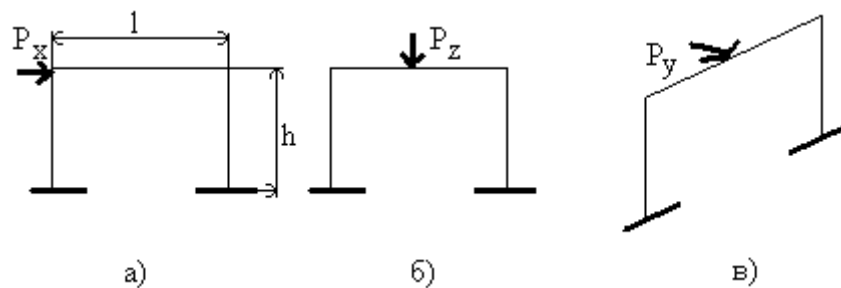


Рис. 8.10 – Схемы нагружения рамы

При горизонтальном направлении возбуждающей силы (рис. 8.10,а) в вертикальных звеньях возникают изгибные колебания, а в горизонтальном - продольные.

Для случая, изображенного на рисунке. 8.10,б, в горизонтальном звене возникают изгибные колебания, а в вертикальных звеньях – изгибные и крутильные.

В связи с тем, что жесткости элементов на изгиб, растяжение-сжатие и кручение различны, частота свободных колебаний рамы будет зависеть от направления внешнего воздействия.

Выражения для расчета f_{01} для случаев, соответствующих показанным на рисунках 4.15, а, б, в, приводятся в справочной литературе.

ПРИМЕР РАСЧЕТА 4.1

8.7 Расчет выводов ЭРЭ на усталостные разрушения

Цель расчета – определение времени работы ЭРЭ до отказа $t_p = N_p / f_{01}$.

Усталостные явления в выводах могут наблюдаться в двух случаях:

- 1) при резонансных колебаниях самого ЭРЭ, что соответствует условиям силового возбуждения системы;
- 2) при резонансных колебаниях печатной платы, что соответствует условиям кинематического возбуждения.

Для расчета выводов на усталость, как правило, используется модель в виде рамы, причем рассматриваются только области, в которых наиболее вероятны разрушения. Они показаны на рисунке 8.11.

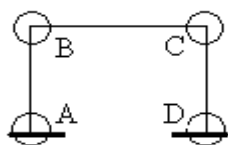


Рисунок 8.11

Первый случай.

Для нахождения t_p необходимо определить величины:

- 1) Инерционную силу по формуле

$$P_u = \mu_0 m g n_B,$$

где n_B – виброперегрузка,

$\mu_0 = \frac{\pi}{\Lambda}$ – коэффициент динамичности на резонансной частоте элемента,

Λ – логарифмический декремент затухания;

- 2) Механические напряжения в слабых сечениях по формуле

$$\sigma = \frac{M_u}{W_u},$$

где $W_u = \frac{J_x}{Y_{MAX}},$

J_x – момент инерции сечения относительно оси, перпендикулярной плоскости изгиба,

Y_{max} – расстояние от нейтральной линии сечения до поверхности упругого элемента.

Величину M_u рассчитывают в зависимости от направления P_u во всех опасных точках. Затем по кривой усталости материала вывода находят величину циклов до разрушения N_p . Вид кривой усталости для медной проволоки приведен на следующем рисунке

Второй случай.

Случай колебаний ЭРЭ на резонансной частоте платы иллюстрируется Рис. 8.12.



Рисунок 8.12.

На выводы элемента в этом случае действуют изгибающий момент, обусловленный поворотом платы на угол θ , и сила, определяемая прогибом платы на величину $Z(x)$. Эти величины (угол θ и перемещение $Z(x)$) проще всего найти для геометрического центра платы. Естественно, что их рассчитывают на резонансной частоте платы f_{01} .

Через найденные значения θ и $Z(x)$ определяются изгибающие моменты в опасных точках (формулы приведены в табл.). Далее расчет производится в том же порядке, что и для случая силового возбуждения системы.

8.8 Показатели вибропрочности конструкции ЭС

Механические воздействия от 30% до 50% отказов подвижных ЭС. Подавляющее большинство отказов ЭС из-за механических воздействий связано с выходом за пределы, установленные нормативно-технической документацией (НТД), механических характеристик конструкций ЭС – **ускорений, перемещений, напряжений**, что приводит к нарушению прочности и устойчивости их работы.

В НТД обычно указываются предельные значения критических параметров:

- для ЭРЭ – максимально допустимое ускорение $a_{\text{доп.}}$ или перегрузка $n_{\text{доп.}}$;
- максимально допустимое перемещение $z_{\text{доп.}}$ – в случае, если возможны опасные соударения между частями конструкции, или для используемого материала в ТУ установлен максимально допустимый прогиб;
- предел прочности используемого материала $[\sigma]_{\text{пред.}}$;
- суммарная длительность механических воздействий на изделие в условиях эксплуатации (для оценки времени до усталостного разрушения выводов ЭРЭ).

Механические воздействия задаются в ТЗ для верхнего уровня иерархии проектируемого изделия – шкафа, стойки, блока. Поскольку стоит задача проанализировать каждый ЭРЭ, то нужно получить коэффициенты передачи механических воздействий от мест крепления шкафа, стойки, блока к местам крепления ПУ, а от них – к местам крепления ЭРЭ.

При моделировании, расчетах и испытаниях ЭС на воздействие МВ определяются критичные механические характеристики конструкции. На основании их сравнения с допустимыми значениями принимается решение по обеспечению вибростойкости изделия. Оценка вибростойкости ЭРЭ, печатных узлов, микросборок, блоков и др. конструктивов, как правило, начинают с определения их частот собственных колебаний, т.к. в любых механических системах возможны резонансные явления, от которых и зависят критичные характеристики системы.

Для простых моделей обычно в первую очередь проверяется выполнение условия:

$$\omega_0 > \omega_{\text{в}} \text{ (или } \omega_0 < \omega_{\text{н}} \text{)},$$

где ω_0 – собственная частота модели;

$\omega_{\text{в}}, \omega_{\text{н}}$ - верхняя и нижняя частоты внешних воздействий.

В моделях с несколькими степенями свободы ситуация осложняется возможностью существования совместных резонансов.

Понятие **совместного резонанса** характеризует условия, когда две системы, объединенные вместе или связанные между собой, одновременно колеблются на частотах, близких к резонансной частоте.

Часто бывает так, что увеличенное за счет резонанса смещение на выходе первой системы является входным воздействием для второй системы, которая вторично усиливает это смещение. Например, если у конструкции, изображенной на рисунке 3 коэффициент передачи шасси равен **50**, а у печатных узлов также **50**, то общий коэффициент передачи объединенной системы необходимо определять следующим образом: $\eta_{\text{общ.}} = 50 \times 50 = 2500$. Если такое случится в реальной системе, как часто и бывает, вибропрочность системы окажется весьма низкой.

Совместные резонансы в большинстве случаев удастся исключить, применяя **«правило октавы»**. Оно рекомендует в системах с последовательным соединением упругих масс удваивать собственную частоту каждого элемента, вносящего дополнительную степень свободы. Например, если в системе на рисунке 3 собственная частота шасси равна **50 Гц**, то у каждого ПУ собственная частота должна быть как минимум вдвое выше (не менее **100 Гц**). Это разнесение резонансных частот предотвращает усиление колебаний в системе, что в конечном итоге увеличивает ее усталостную долговечность.

Основные показатели стойкости ЭС к МВ.

Для проверки выполнения условия вибропрочности сначала необходимо определить допустимое напряжение, которое может выдержать элемент конструкции

$$\sigma_{\text{доп}} = [\sigma]/n$$

где $[\sigma]$ – предельное значение напряжения (предел прочности) для материала, который берется из справочника;

n – запас прочности.

Механические напряжения, при которых образец из данного материала разрушается или в нем возникают значительные остаточные деформации, называют **предельными**.

Для пластичных материалов (медь, алюминий и др.) в качестве предельных обычно принимают предел текучести (в этом случае именно эта величина приводится в справочниках).

Для хрупких материалов (ситалл, стекло, стеклотекстолит и др.) в качестве предельных механических напряжений принимают $[\sigma_e]$ – предел прочности, значение которого при растяжении и сжатии различно. При расчетах можно принять:

- для алюминиевых сплавов типа АЛ5 $[\sigma] \approx 196 \text{ МПа}$,
- для стеклотекстолита $[\sigma] \approx 105 \text{ МПа}$.

Величина запаса прочности задается в пределах 1,5...6,8 в зависимости от степени ответственности детали, достоверности определения расчетных нагрузок и напряжений и др. факторов.

При механических воздействиях на конструкцию могут возникать напряжения связанные с изгибом, кручением и растяжением-сжатием ее элементов. Однако для ЭС, как уже отмечалось, наиболее опасны изгибные колебания. В этом случае напряжение на изгиб должно отвечать следующему условию

$$\sigma_u = \frac{M_u}{W_u} \leq [\sigma]_{u_{don}},$$

где M_u – изгибающий момент в наиболее опасном сечении элемента конструкции;

W_u – момент сопротивления при изгибе.

Условие вибропрочности конструкции ФЯ и ее элементов может быть также сформулировано следующим образом. Конструкция считается вибропрочной, если амплитуда Z и виброскорость V колебаний элементов конструкции ФЯ не превышают допустимых значений во всем диапазоне частот внешних вибраций.

Для печатных плат и ФЯ с бескорпусными МСБ, как правило, допустимы амплитуда колебаний $Z_{don} < (0,15...0,4) \text{ мм}$ и виброскорость $V_{don} < 800 \text{ мм/с}$. С учетом этого должны выполняться одновременно два неравенства:

$$\mu \cdot (n_{TV} \cdot g) \leq (2\pi \cdot f_0)^2 \cdot Z_{don} \quad (8.12)$$

$$\mu \cdot (n_{TV} \cdot g) \leq (2\pi \cdot f_0) \cdot V_{don} \quad (8.13)$$

где n_{TV} – виброперегрузка на объекте установки ЭС, устанавливаемая техническим заданием.

Поскольку n_{TV} зависит от объекта установки аппаратуры, а Z_{don} и V_{don} определяются стойкостью электрорадиоэлементов и материалов конструкции, вибропрочность конструкции будет обеспечена, если собственная частота печатного узла f_0 , удовлетворяют обоим неравенствам (8.12) и (8.13), то есть

$$f_0 \geq \max\{f_{0Z}, f_{0V}\} \quad (8.14)$$

где f_{0Z} – минимальное значение резонансной частоты из условия обеспечения допустимой амплитуды колебаний;

f_{0V} – минимальное значение резонансной частоты из условия обеспечения допустимой виброскорости.

Как уже отмечалось, при знакопеременных напряжениях после некоторого числа циклов нагружения может наступить поломка элемента из-за усталости в материале. В основе усталостных повреждений лежит процесс образования и развития микротрещин в наиболее нагруженном сечении, приводящий, в конечном счете, к разрушению элемента конструкции.

Чаще всего в ЭС разрушаются выводы ЭРЭ при наступлении в них высокочастотных резонансов. Если известно максимальное напряжение в выводах, то по кривой усталости для материала (рис. 8.8) можно определить число циклов до разрушения и, таким образом, сделать прогноз долговечности изделия.

Время работы элемента до разрушения выводов можно определить по формуле

$$t_p = N_p / f_{01},$$

где N_p – число циклов нагрузки до разрушения;

f_{01} – частота свободных колебаний основного тона элемента.

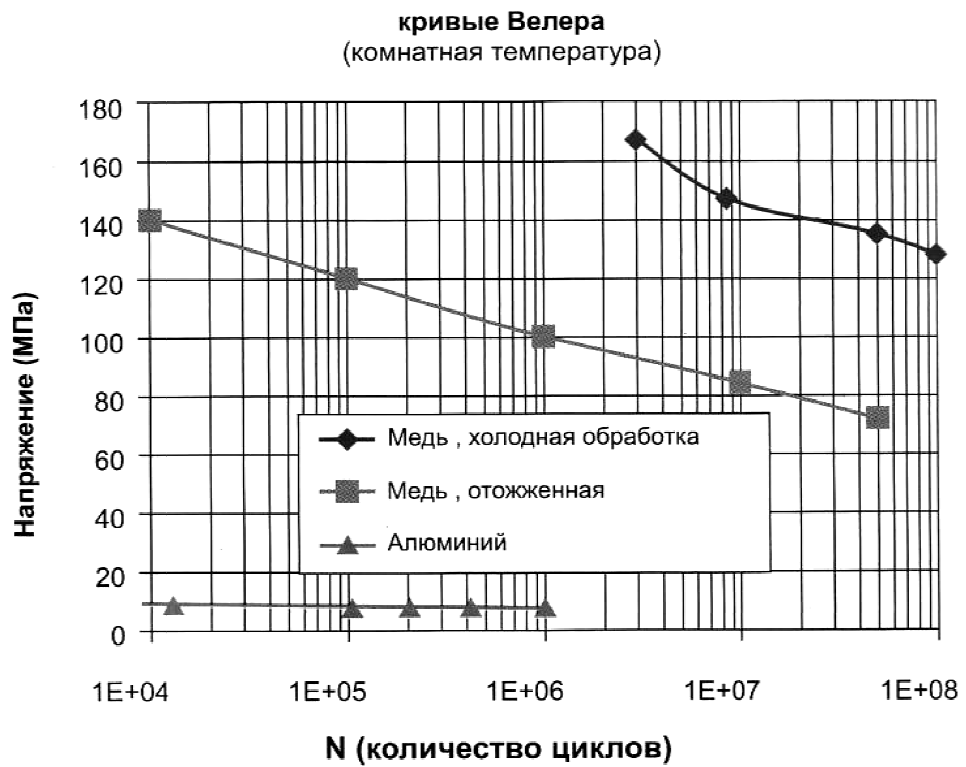


Рис. 8.13 – Кривые Велера для меди и алюминия.

На практике достаточно произвести расчеты вибропрочности только для самых «слабых» элементов конструкции. К ним можно отнести выводы слабо закрепленных ЭРЭ, тонкопроводные монтажные соединения, элементы типа пластин (платы, панели) и др.

ПРИМЕР РАСЧЕТА 4.2

8.9 Расчет собственной частоты конструкций, моделируемых пластиной

Планарные конструкции, например, функциональные ячейки и микросборки обычно представляются в виде пластины при определенном закреплении сторон (рис. 8.14).

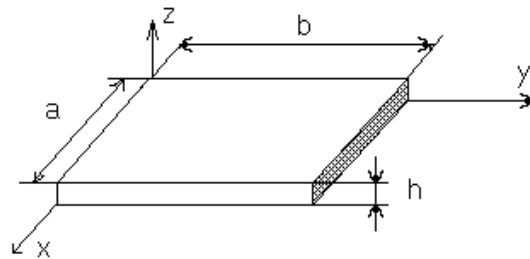


Рис. 8.14 – Размеры пластины

Собственные колебания пластины описываются дифференциальным уравнением

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + D \left(\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} \right) = 0, \quad (8.15)$$

где $z=z(x,y,t)$ – виброперемещение пластины, определяемое в точке с координатами (x,y) при направлениях осей координат как на рисунке 8.14;

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\varepsilon^2)}$ – цилиндрическая жесткость пластины;

E – модуль упругости материала пластины;

ε - коэффициент Пуассона.

Существует точный метод решения этого уравнения, однако он приемлем только для прямоугольных пластин при граничных условиях соответствующих свободному опиранию любых двух противоположных сторон и произвольному способу крепления двух других сторон.

Приближенный метод Рэлея позволяет определить частоту основного тона (основной гармоники) собственных колебаний пластины с учетом весовой нагрузки ее электрорадиоэлементами при любых вариантах закрепления сторон. Формулу Рэлея можно представить следующим образом:

$$f_{0_1} = \frac{1}{2\pi} \frac{k_\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{D}{m_0}}, \quad (8.15)$$

где $D = Eh^3 / 12(1 - \varepsilon_{II}^2)$ - цилиндрическая жесткость, н·м;

E - модуль упругости, н/м²;

h - толщина платы, м;

ε_{II} - коэффициент Пуассона);

$m_0 = (m_{II} + m_{PЭ}) / a \cdot b$ - приведенная масса платы ($m_{II}, m_{PЭ}$ - масса платы и общая масса радиоэлементов), кг/м²;

a и b - длина и ширина платы ($a \geq b$), м;

k_α - коэффициент, зависящий от соотношения сторон платы и способа их закрепления.

Коэффициент k_α определяется по формуле

$$k_\alpha = \kappa(\alpha + \beta \frac{a^2}{b^2} + \gamma \frac{a^4}{b^4})^{0.5}.$$

Значения коэффициентов $\kappa, \alpha, \beta, \gamma$ приведены в таблице [].

Для пластины, закрепленной в четырех точках по углам, частота первого тона собственных колебаний определяется по формуле:

$$f_{0_1} = \frac{\pi}{2a^2} \cdot (1 + \frac{a^2}{b^2}) \cdot \sqrt{\frac{D}{m_0}}. \quad (8.16)$$

Рассмотрим некоторые примеры определения расчетной модели. Плату, закрепленную в 4-ех точках по углам (рис.8.10) с приемлемой точностью можно моделировать пластиной со свободным опиранием всех ее сторон.



Рисунок 20

Плату, закрепленную в 6-ти точках, как показано на рисунке 8.11, можно представить пластиной с размерами $a/2$ и b свободно опирающуюся по контуру.

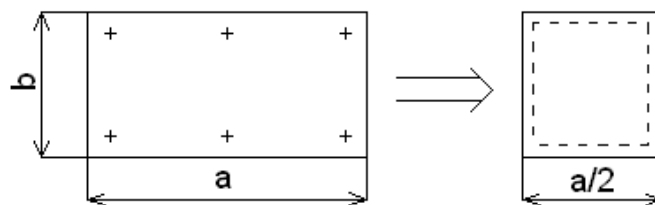


Рисунок 21

Ячейка блока кассетной конструкции, имеющая электрический соединитель и планку, может быть представлена моделью, изображенной на рисунке 8.12.

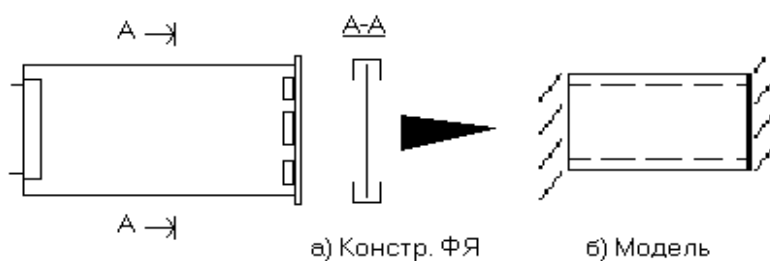


Рисунок 22.

8.10 Оценка усталостной долговечности печатного узла

При длительных воздействиях вибрации в конструкции печатного узла могут возникнуть усталостные отказы (обрывы проводников, разрушения паяных соединений, нарушение контактов в электрических соединителях и др.). Время до такого отказа значительно сокращается, если печатная плата вибрирует на частоте собственного резонанса.

Чтобы обеспечить значительную усталостную долговечность конструкции ПУ (свыше 10 млн. циклов) необходимо, чтобы его собственная частота превышала некоторую минимальную величину $f_{0\min}$, которую можно определить по формуле:

$$f_{0\min} \geq \sqrt[3]{\left(\frac{\gamma(f_0) \cdot g \cdot n_g}{0,003 \cdot b} \right)^2},$$

где $f_{0\min}$ – минимально допустимая собственная частота платы;

n_g – виброперегрузка;

b – размер короткой стороны платы, мм;

$\gamma(f_0)$ – безразмерная постоянная, значение которой зависит от f_0 и n_g .

Величина $\gamma(f_0)$ при виброперегрузках $n_g = 3...10$ определяется по следующей таблице

Собственная частота f_0 , Гц	50-100	100-400	400-700
$\gamma(f_0)$	17,5	25,0	35,0

Если усталостная долговечность ПУ не удовлетворительна, то необходимо увеличить его жесткость. Самый простой путь – увеличить толщину печатной платы. Если такой возможности нет, то можно увеличить число точек крепления платы, например, с 4-ех до 6-ти. Другие известные способы увеличения жесткости печатного узла потребуют изменения его конструкции.

8.11 Расчет частоты свободных колебаний ФЯ сложных конструкций

Одним из основных способов повышения жесткости конструкций ФЯ является использование рамок или элементов типа ребер жесткости. Примером является конструкция ФЯ на бескорпусных МСБ (рисунок 8.13).

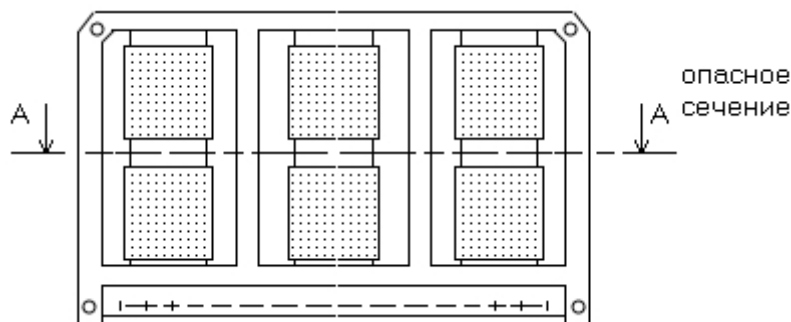


Рис. 23 - Конструкция ФЯ, снабженная рамкой.

Эта конструкция является сложной многослойной системой: микросборка–клей–рамка–клей–печатная плата. Причем рамка имеет сложную конфигурацию сечений. Однако частоту свободных колебаний ФЯ можно рассчитать по формуле Рэлея, если осуществить переход от сложной конструкции к модели эквивалентной прямоугольной пластины.

Для расчета собственной частоты, например по формуле (8.13), необходимо определить жесткость эквивалентной пластины. Достаточную точность результата дает модель

$$D = D_1 + D_2,$$

где $D_1 = D_{пл}$, а $D_2 = D_p$.

Цилиндрическую жесткость платы можно определить по формуле

$$D_{пл} = \frac{Eh^3}{12(1-\varepsilon^2)} = \frac{Eh^3 \cdot b}{12(1-\varepsilon^2) \cdot b} = \frac{EJ}{b(1-\varepsilon^2)} \approx \frac{EJ}{b},$$

где J – момент инерции платы.

Так как для материалов печатных плат характерны значения $\varepsilon = 0,2 \dots 0,3$, то $(1-\varepsilon^2) \approx 0,9 \dots 1$, поэтому погрешность от замены величины $(1-\varepsilon^2)$ на единицу составит не более 5%.

Для расчета D_p необходимо сначала выбрать наиболее слабое сечение (в нем жесткость на изгиб наименьшая). Для конструкции, изображенной на рисунке 8.13, таким сечением является сечение А-А (рис. 8.14).

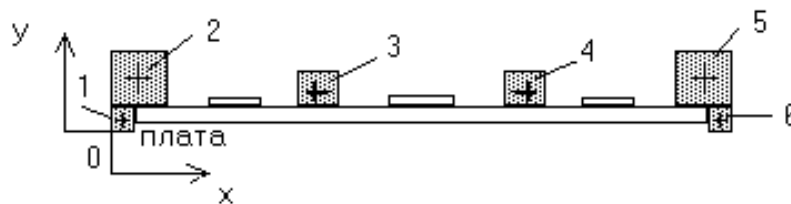


Рис. 24 – Сечение ячейки

В сечении рамки выделяются элементарные сечения правильной геометрической формы (в данном случае их шесть).

Далее определяется координата $y_{сл}$ – средней линии рамки, не испытывающей деформаций при изгибе рамки

$$y_{сл} = \frac{\sum y_{сли} \cdot S_i}{\sum S_i},$$

где $y_{сли}$, S – координата средней линии (на которой находится центр тяжести ячейки) элементарного сечения и его площадь сечения.

Определяется полный момент инерции рамки по следующей формуле:

$$J_{сл} = \sum_{i=1}^n J_i + \sum_{i=1}^n (y_{сл} - y_{сли})^2 \cdot S_i$$

Далее определяют жесткость рамки:

$$D_p = \frac{E_p J_\Sigma}{b_p},$$

где b_p – полная ширина пластины.

Затем рассчитывают приведенную массу ФЯ:

$$m_0 = \frac{m_p + m_{пл} + \sum m_{МСБ}}{ab}.$$

И, наконец, по формуле (8.10) - частоту f_{0l} .

8.12 Конструкторские способы защиты ЭС от механических воздействий

К основным способам вибро- и ударозащиты относятся:

- увеличение жесткости конструкции;
- увеличение степени демпфирования;
- использование виброизоляторов (амортизаторов).

Амплитудно-частотные характеристики, поясняющие эти способы защиты, приведены на рисунке 8.15.

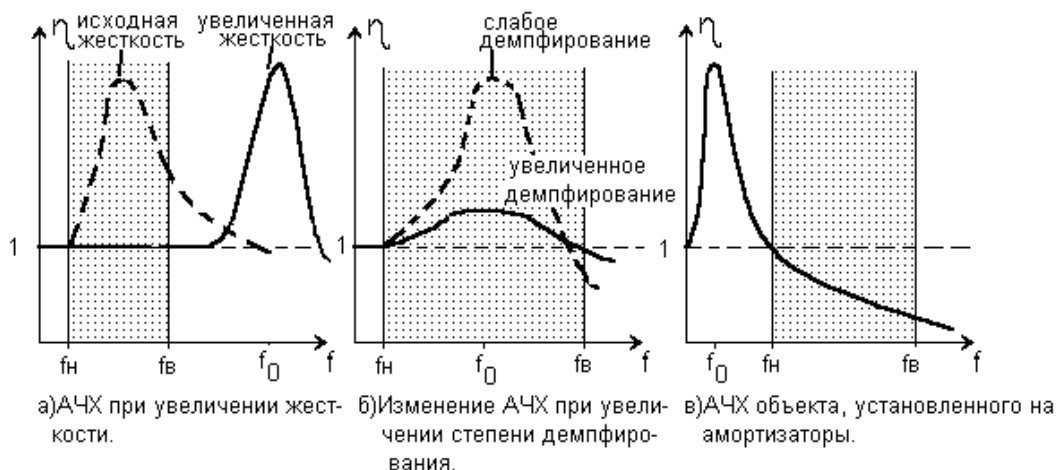


Рис.25 – АЧХ (η - коэффициент передачи вибраций)

8.12.1 Увеличение жесткости конструкций

Формула Рэлея показывает, что для повышения f_0 в 2 раза необходимо уменьшить массу или увеличить жесткость в 4 раза. Уменьшение массы почти всегда целесообразно, однако добиться значительного ее снижения (в ра-

зы) на практике очень сложно. Возможности же увеличения жесткости более широкие. К ним можно отнести:

- уменьшение длины и ширины пластины (отрицательный результат-уменьшение монтажной площади платы);
- увеличение толщины h (т.к. $D \approx 0,09Eh^3$, то этот размер имеет сильное влияние на значение f_0);
- изменение способа закрепления платы на более жесткое;
- использование дополнительных упоров, накладок и рамок;
- замена материала, например, стеклотекстолита на алюминий или эмалированную сталь.

К примеру, уменьшение длины и ширины платы вдвое уменьшает при резонансе длину волны в направлении x и y вдвое, при этом все резонансные частоты возрастают в 4 раза.

Из всех способов закрепления сторон самым выгодным является жесткое закрепление по контуру.

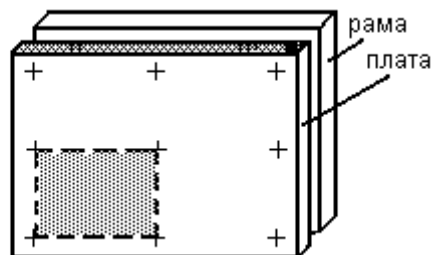


Рисунок 26 – Дополнительное крепление в центре платы (моделью для расчета в этом случае будет заштрихованный прямоугольник).

Если этот вид крепления дает недостаточный эффект, то используются различные виды дополнительного крепления по площади пластины (рис.8.16).

Если раму считать абсолютно жесткой, то фактически вместо одной пластины следует рассматривать 4 пластины меньших размеров.

Для увеличения жесткости конструктивных элементов широко практикуется введение ребер жесткости, отбортовок и выдавок (Рис.8.17).

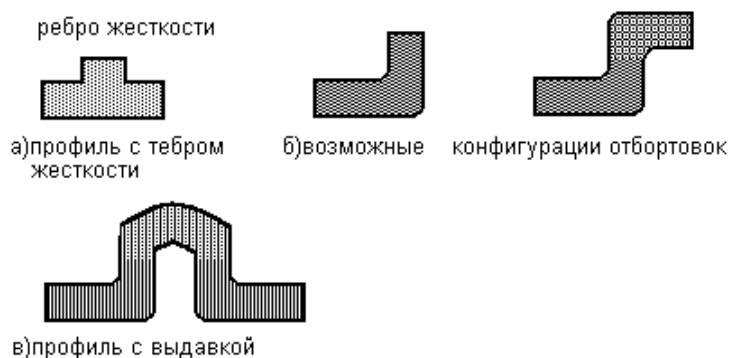


Рисунок 27 – Элементы повышения жесткости.

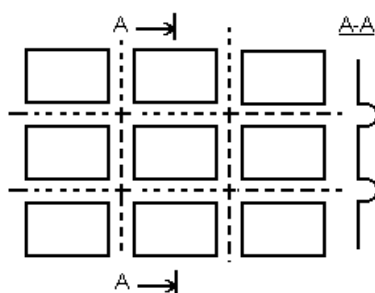


Рисунок 28 – Пример “вафельной” выдавки.

Выигрыш в жесткости от введения оребрения может достигать несколько десятков раз. Многие конструктивные элементы ЭС изготавливаются из тонколистового проката. При этом использование отбортовок и выдавок различной конфигурации дает возможность повысить жесткость элементов конструкции в десятки-сотни раз. Наибольшую жесткость позволяют получить “вафельные” выдавки (рисунок 8.18).

Важно, что использование фигурных ребер жесткости позволяет обеспечить значительное снижение массы конструкции и экономию материалов.

8.12.2 Виброизоляция

Виброизоляция – единственный способ виброзащиты, который дает возможность обеспечить в полосе частот внешних воздействий значение $\eta < 1$. Он осуществляется путем установки между ЭС и основанием системы амортизаторов (АМ).

Амортизатор представляет собой конструкцию, объединяющую упругий и демпфирующий элементы. Упругие силы в АМ создаются пружинами,

упругой составляющей жесткости резиновых или полимерных элементов, упругостью металлорезины или троса. Демпфирование в конструкциях АМ осуществляется за счет использования сил сухого или вязкого трения.

Примеры конструкций АМ см. на листе РМ-5 (см. ниже).

В число основных параметров АМ входят:

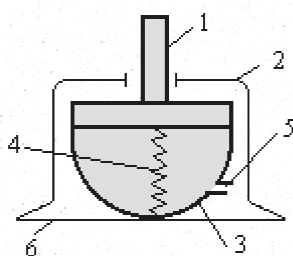
- номинальная нагрузка амортизатора P_n ;
- частота свободных колебаний АМ при номинальной нагрузке (вдоль основной оси);
- статический прогиб при номинальной нагрузке (z_{cm});
- жесткость амортизатора k ;
- эксплуатационные параметры.

Проектирование системы виброизоляции производится в следующей последовательности:

- 1) выбирают тип АМ с учетом допустимых нагрузок и условий эксплуатации;
- 2) выбирают схему расстановки (монтажа) АМ;
- 3) производят статический расчет системы виброизоляции;
- 4) выбирают конкретный тип АМ с учетом статического расчета;
- 5) производят динамический расчет системы виброизоляции.

Дополнительно: примеры конструкций амортизаций

Амортизатор демпфированный типа АД



1 - подвижный шток, крепится к объекту;

2 - корпус амортизатора жестко соединенный с основанием амортизатора 6 и крепится к раме;

3 - резиновый баллон с калиброванным отверстием 5;

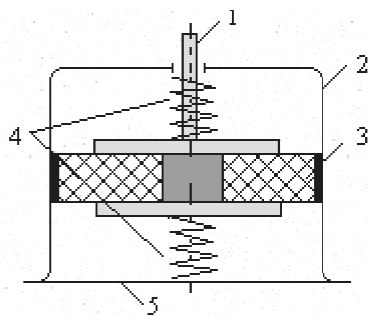
4 - металлическая пружина - упругий элемент, определяющий статическую и динамическую жесткость амортизатора.

При вибрационных нагрузках баллон деформируется и через калиброванное отверстие проходит воздух внутрь и в баллон, следовательно, происходит рассеивание энергии, т.е. осуществляется демпфирование. Данный вид амортизатора реализует диссипативную силу типа: вязкое трение. Недостатки этого амортизатора:

- наличие детали из резины, которая довольно быстро стареет и боится солнечной радиации.

- невозможность эксплуатации при большой разреженности атмосферы (непригоден для применения на борту самолетов и ракет, в высокогорной местности).

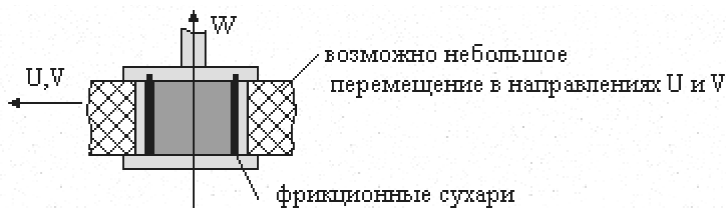
АФД - амортизатор фрикционного демпфирования



- 1 - шток, который крепится к блоку;
- 2 - корпус, соединённый с основанием амортизатора 5;
- 3 - фрикционная шайба;
- 4 - пружины (верхняя и нижняя).

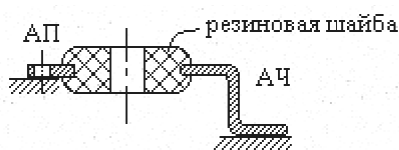
Упругие свойства определяются характеристиками пружин 4 (металлических). Рабочий диапазон температур - $60^{\circ}\text{C} \dots +150^{\circ}\text{C}$. Этот амортизатор лишён недостатков амортизаторов 1-го типа.

АПН - амортизатор пространственного нагружения (это модификация АФД)



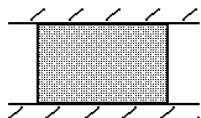
Дополнительные диссипативные силы образуются за счёт трения шайбы о сухари, следовательно, возможны нагрузки не только в направлении W – это является преимуществом перед выше рассмотренными амортизаторами.

Плоскостные или чашечные амортизаторы АП (АЧ)



Резиновая шайба определяет упругие силы и упругие свойства амортизатора. Основные параметры этого амортизатора совпадают с параметрами амортизаторов типа АД, кроме требований разрезания.

Сеточный амортизатор



Необычный амортизатор, упругий элемент которого получается пресованием тонкой проволоки (сталь, бериллиевая бронза). При больших деформациях отдельные спирали вытягиваются в одном направлении, что напоминает картинку деформации материалов с длинными волокнами - резины. Поэтому материал упругого элемента сеточного амортизатора обычно называют металлической резиной. Достоинство: небольшие масса и габариты.

При выборе АМ необходимо выполнять правило: каждый АМ должен работать при номинальной нагрузке, т.к. большая нагрузка приведет к снижению его надежности, а недостаточная - к повышению резонансной частоты. На практике достаточно выполнить условие $P_i = (0,7..1,3) P_n$. Число амортизаторов должно быть $n_{ам} \geq 3$.

При расстановке АМ обычно используют так называемую **рациональную схему**, которая должна отвечать следующим требованиям:

- а) общая статическая грузоподъемность всех АМ равняется весу блока;
- б) центр тяжести (ЦТ) блока и центр реакции (ЦР) амортизаторов, лежат на одной вертикальной оси.

Если ЦТ и ЦР совпадают, то схема расстановки называется **абсолютно рациональной**.

Примеры схем расстановки амортизаторов.

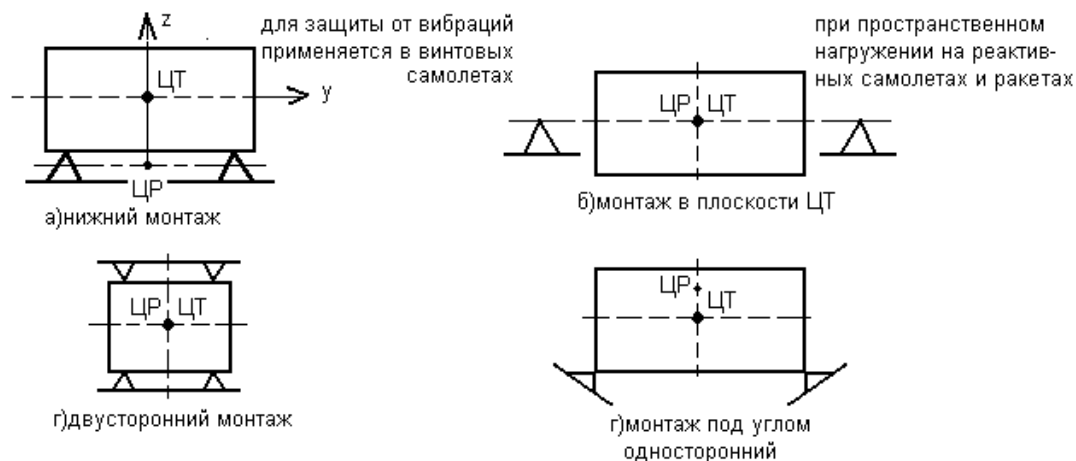


Рисунок 8.19 - Варианты размещения АМ.

Вариант с нижним монтажом (рисунок 8.19,а) получил широкое распространение, так как он позволяет разместить блоки ЭС рядом. Однако если действуют боковые нагрузки, то необходим достаточный зазор между блоками, чтобы избежать соударений. Если ЦТ блока смещен, то для устранения перекосов используют компенсирующие прокладки (рисунок 8.20).

Если все амортизаторы имеют одинаковую жесткость K_z , то смещение блока вдоль оси z будет происходить без перекосов, т.е. исключаются повороты относительно осей x и y . Частота собственных колебаний вдоль оси z в этом случае определяется по формуле:

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_{AM} K_z}{m}},$$

где m -масса блока.



Рисунок 8.20 – Выравнивание блока с помощью прокладки

Использование в системе АМ у которых $K_x = K_y$ приводит к возникновению в ней сложных (связанных) колебаний. Чтобы избежать этого явления АМ устанавливаются в плоскости ЦТ (рисунок 8.19,б). При этом схема размещения АМ будет абсолютно рациональной. Такой же результат достигается при двустороннем монтаже АМ (рисунок 8.19,в). Монтаж АМ под углом наиболее эффективен при изоляции пространственных колебаний, однако и наиболее сложен, т.к. при небольшом нарушении симметрии в системе возникают связанные между собой колебания.

При разработке схемы расстановки АМ их стремятся расположить так, чтобы движения в направлении всех шести степеней свободы были независимыми (чтобы возникали только несвязные колебания). Это дает возможность для каждого АМ обеспечить движение только вдоль оси, т.к. движения и повороты АМ в двух других направлениях для них являются неблагоприятными.

Статический расчет системы виброизоляции сводится к определению статических прогибов в амортизаторах и выбору конкретных типов АМ.

В результате расчета получают значения координат каждого из амортизаторов, их реакции P_i и статические прогибы z_{cmi} . Если z_{cmi} неодинаковы, то производят расчет компенсирующих прокладок.

Динамический расчет производится с целью определения эффективности системы виброизоляции. Эффективность определяется следующим соотношением:

$$\mathcal{E} = (1 - \eta) \cdot 100\%,$$

где η - коэффициент передачи вибраций.

Сначала определяют частоту свободных колебаний блока:

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_{AM} K_z}{m}}$$

где $K_z = \sum_{i=1}^{n_{AM}} K_i$ – суммарная жесткость АМ, величины K_i определяются по справочнику.

Далее проверяют выполнение условия $\frac{f_n}{f_0} \geq 5..6$, где f_n – нижняя частота внешних воздействий.

Фактически это означает, что система амортизации проектируется с запасом 5...6 раз.

Если запас обеспечен, то, определив η , рассчитывают величину эффективности $\mathcal{E}$. Она должна быть не ниже требуемого значения (обычно 90...95 %). Если эффективность недостаточна, то выбирают другие АМ.

8.8.3 Использование в конструкциях ЭС вибропоглощающих материалов

Амортизаторы имеют большие габариты и массу, кроме этого при интенсивной работе АМ сильно нагреваются. Если использовать эти устройства для виброизоляции небольших блоков, то они оказываются недогруженными и поэтому неэффективны.

Пример. Жесткости стандартных АМ колеблются в пределах $10^5 \dots 5 \cdot 10^5$ н/м. Если установить блок массой 10 кг на 4 самых мягких амортизатора, то резонансная частота системы составит

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4 \cdot 10^5}{10}} \approx 32 \text{ Гц}.$$

В большинстве случаев это слишком большая величина, т.к. диапазоны частот внешних вибраций обычно начинаются с 0...20 Гц. Если же массу блока уменьшить до 1 кг, то резонансная частота возрастет до 100 Гц. В обоих случаях возможен резонанс в области низких частот.

Установлено, что для уменьшения амплитуд резонансных колебаний печатных узлов, работающих в широком диапазоне частот (до 2000 Гц), прак-

тически единственным способом обеспечения виброзащищенности является увеличение демпфирующих свойств конструкции. Суть метода заключается в использовании специальных элементов, выполненных из материалов с большим внутренним трением. Введение подобных элементов значительно увеличивает потери энергии колебаний, снижая амплитуды колебаний в области резонанса. Наиболее перспективными вибропоглощающими материалами являются полимеры. Полимерные демпферы могут исполняться в виде внешних и внутренних демпфирующих слоев, демпфирующих ребер, вставок и динамических гасителей колебаний с демпфированием.

Для неремонтируемых ячеек применяют заливку вибропоглощающими материалами (рис.8.21).

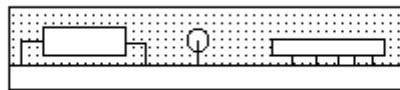


Рисунок 8.21 – Односторонне залитая конструкция ячейки

Используется одно- или двусторонняя заливка. Залитая конструкция способна выдержать очень большие механические нагрузки. Амплитуда колебаний при резонансе уменьшается более чем в 10 раз.

Недостатки этого решения: невозможность ремонта, резкое ухудшение теплообмена, увеличение массы.

Для защиты отдельных компонентов и микросборок используют приклейку к плате или металлической раме вязкоупругими клеями КТ-102, «Эластосил» и др. К примеру это позволяет понизить коэффициент динамичности ячейки с микросборками, установленными на раме с 40 до 3 единиц. Оптимальная толщина клея составляет 0,1...0,3 мм. Степень демпфирования пропорциональна площади и толщине склеивания, последняя может быть увеличена за счет многослойного склеивания.

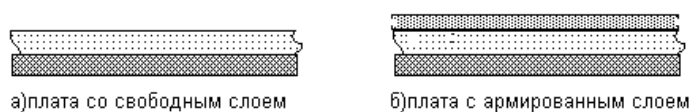


Рисунок 8.22 – Вибропоглощающие слои в печатной плате

Еще одним способом демпфирования является введение вибропоглощающих слоев в структуру конструкции, например, печатной платы (рисунок 8.22). Преимущество этого варианта состоит в том, что по сравнению с односторонней заливкой всего модуля толщина демпфирующего слоя может быть уменьшена в 5..10 раз при одном и том же эффекте.

Одним из наиболее эффективных способов уменьшения резонансных колебаний ячеек в широком диапазоне частот является применение полимерных демпфирующих вставок (ДВ). Они позволяют снизить амплитуды резонансных колебаний до приемлемого уровня часто без изменения конструкции, существенного увеличения массы, не ухудшая при этом ремонтпригодность и тепловые режимы ЭС. Необходимым условием для установки ДВ является наличие параллельно расположенных элементов конструкций – ячеек, стенок корпуса и т.д., – **обладающих различными собственными частотами колебаний.**

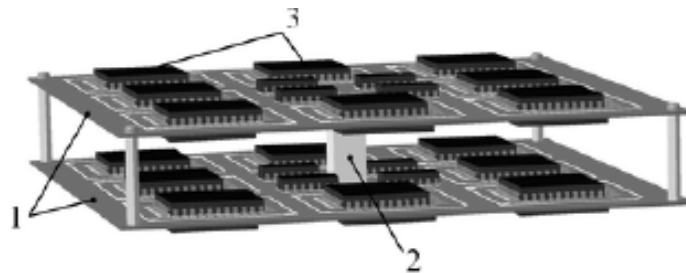


Рис. 8.23 – Конструкция ячейки с ДВ: 1 – печатные узлы; 2 – демпфирующая вставка; 3 - радиоэлементы

Принцип работы ДВ заключается в том, что при резонансах плоских элементов конструкции ДВ деформируется, что приводит к поглощению энергии колебаний, и, как следствие, к уменьшению амплитуд колебаний.

Проблема использования ДВ: для эффективного подавления резонансных колебаний необходимо применять не только полимеры с высокими демпфирующими свойствами, но и конструктивно обеспечивать оптимальные соотношения жесткостей ДВ и ячеек, что требует немалой экспериментальной или расчетной отработки.

При применении демпфирования в конструкциях ЭС следует учитывать, что демпфирующие свойства полимеров сильно зависят от температуры и радиации.

Защита ЭС при транспортировании осуществляется упаковочной тарой с помощью прокладок, пружин или стандартных виброизоляторов.

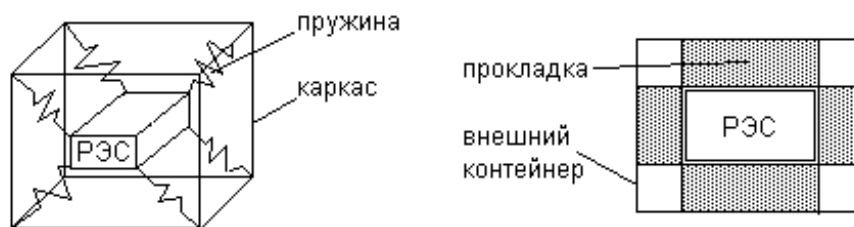


Рис. 8.24 – Варианты защиты ЭС при транспортировании

В настоящее время для изготовления прокладок применяется картон, пенополистирол, пенополиуретан и др. Эффективность их защитных свойств определяется механическими свойствами материала, толщиной и площадью прокладок. Для каждого конкретного случая прокладки необходимо рассчитывать. Цель этого расчета состоит в определении оптимальных геометрических размеров прокладок, т.к. при недостаточной толщине защитный эффект может быть мал, а при повышенной – происходит удорожание не только упаковки, но и самого транспортирования.