

Министерство образования Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра радиоэлектроники и защиты информации (РЗИ)

А.П. Бацула

КОНСТРУИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Учебное пособие

2002

Бацула А.П.

Конструирование радиоэлектронных устройств: Учебное пособие. –
Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2002. –
231 с.

© Бацула А.П., 2002

© Томский межвузовский центр
дистанционного образования, 2002

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС	8
1.1. Основные этапы разработки РЭС	10
1.1.1. Проведение НИР	10
1.1.2. Проведение ОКР.....	11
1.1.3. Комплектность конструкторских документов.....	17
1.2. Классификация РЭС	19
2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ.....	23
2.1. Печатная плата.....	23
2.2. Печатный узел.....	34
2.3. Методы изготовления печатных плат	35
2.4. Расчет электрических параметров ПП	38
2.4.1. Постоянный ток в печатном проводнике	39
2.4.2. Переменный ток в печатном проводнике.....	39
2.5. Рекомендации по конструированию ПП.....	40
3. ТЕПЛОМАССООБМЕН В РЭС	42
3.1. Процессы теплообмена в природе	42
3.2. Расчет теплового режима плоской пластины	44
3.3. Элементы теории тепловых цепей.....	45
3.4. Конвективный теплообмен.....	48
3.4.1. Порядок расчета теплообмена свободной конвекцией с помощью критериев.....	51
3.4.2. Теплообмен при вынужденной конвекции.....	51
3.4.2.1. Продольный обдув.....	52
3.4.2.2. Поперечный обдув.....	52
3.4.3. Свободная конвекция в ограниченном пространстве	52
3.4.4. Конвективный теплообмен при давлениях воздуха, отличных от нормального	54
3.5. Передача тепла излучением.....	54
3.6. Коэффициентный метод расчета тепловых режимов РЭС.....	55
3.7. Порядок расчета тепловых режимов РЭС в корпусах при естественной конвекции.....	57
3.7.1. Порядок расчета теплового режима блока в герметичном корпусе.....	58
3.8. Системы охлаждения РЭС.....	62
4. ЗАЩИТА РЭС ОТ КОМПЛЕКСА ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.....	64
4.1. Влияние механических воздействий на надежность РЭС.....	64
4.2. Устойчивость элементов конструкции РЭС к механическим нагрузкам.....	65
4.3. Колебания линейной системы с одной степенью свободы	67
4.4. Конструкция и параметры амортизаторов.....	71

4.5. Проектирование систем амортизации РЭС	74
4.6. Расчет резонансной частоты ПП.....	78
4.7. Расчет системы амортизации	78
4.7.1. Статический расчет системы амортизации	79
4.7.2. Динамический расчет системы амортизации на воздействие вибраций	80
4.7.3. Динамический расчет системы амортизации на воздействие ударов.....	81
4.8. Защита РЭС от влаги.....	83
4.8.1. Влияние влаги на надежность РЭС.....	83
4.8.2. Законы проникновения влаги	85
4.8.3. Расчет толщины влагозащитного покрытия	86
4.8.4. Способы защиты РЭС от влаги.....	86
5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РЭС	92
5.1. Сущность обеспечения ЭМС.....	92
5.2. Основные понятия ЭМС	93
5.3. Нормативно-техническая документация по ЭМС	96
5.4. Принципы обеспечения ЭМС при разработке и эксплуатации РЭС.....	98
5.5. Основные принципы электродинамики	101
5.5.1. Электромагнитное поле и его характеристики	101
5.5.2. Электромагнитные свойства сред	102
5.5.3. Уравнения Максвелла и их физический смысл	103
5.5.4. Классификация электромагнитных полей	105
5.5.5. Электромагнитное поле в диэлектриках и проводниках. Основные характеристики электромагнитного поля	107
5.6. Конструирование электромагнитных экранов	112
5.6.1. Структура помехонесущих электромагнитных полей	112
5.6.2. Виды и сущность электромагнитного экранирования.....	115
5.6.3. Основные характеристики экранов.....	117
5.6.4. Расчет и конструирование электростатических экранов.....	120
5.6.5. Расчет и конструирование магнитостатических экранов	124
5.6.6. Многослойное экранирование	131
5.6.7. Расчет и конструирование электромагнитных экранов.....	132
5.6.8. Перфорированные экраны.....	134
5.6.9. Сетчатые экраны	136
5.6.10. Контактные соединения и эффективность экранирования	137
5.7. Инженерные формулы расчета эффективности экранирования реальных конструкций экранов	138
5.7.1. Расчет ЭЭ электрически толстых экранов.....	138
5.7.2. Расчет ЭЭ электрически тонких экранов.....	139
5.7.3. Расчет ЭЭ перфорированных экранов	139
5.7.4. Расчет ЭЭ сетчатых экранов.....	140

5.7.5. Расчет ЭЭ токопроводящей краски.....	140
5.8. Материалы для экранов	143
5.8.1. Металлические материалы.....	143
5.8.2. Металлизированные поверхности.....	143
5.8.3. Стекла с токопроводящим покрытием.....	144
5.8.4. Специальные ткани.....	144
5.8.5. Радиопоглощающие материалы (РПМ).....	144
5.8.6. Токопроводящие краски.....	145
5.8.7. Электропроводный клей.....	145
5.9. Фильтрация электрических цепей	145
5.9.1. Элементы фильтров	147
5.10. Заземление.....	150
5.10.1. Способы заземления	151
6. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СХЕМАХ	155
6.1. Виды и типы схем.....	155
6.2. Общие требования к выполнению схем.....	156
7. НАДЕЖНОСТЬ РЭС	158
7.1. Основные понятия и определения теории надежности.....	158
7.2. Показатели надежности	160
7.2.1. Плотность распределения вероятности безотказной работы	160
7.2.2. Вероятность безотказной работы	161
7.2.3. Интенсивность отказов.....	162
7.2.4 Средняя наработка на отказ	164
7.3. Оценка структурной надежности.....	166
7.3.1. Оценка надежности по интенсивности отказов.....	167
7.3.2. Учет условий работы аппаратуры.....	169
7.3.3. Расчет показателей надежности	169
8. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ «КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ РЭС».....	174
8.1. Краткая программа лекционного курса	174
8.2. Список рекомендуемой литературы.....	175
8.3. Контрольные работы.....	177
8.3.1. Контрольная работа № 1	179
8.3.2. Контрольная работа № 2	186
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	200
ПРИЛОЖЕНИЕ	202

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина "Конструирование радиоэлектронных средств (РЭС)" (КРЭС) основывается на курсах начертательной геометрии и инженерной графики, прикладной механики, основ радиоэлектроники и радиоэлектронных устройств, автоматизации конструкторского и технологического проектирования, конструирования и технологии микросхем и микропроцессоров, физико-химических основ конструирования и технологии РЭС.

Задачей дисциплины "Конструирование радиоэлектронных средств" является обучить студента основным методам, средствам инженерного расчета элементов, узлов, блоков и систем РЭС различного назначения.

В результате изучения дисциплины студент должен уметь создавать конструкторские решения, удовлетворяющие конструкторско-технологическим требованиям и готовить на них исходную техническую документацию.

Рассмотрим основные термины, определения и понятия /1- 4/.

Конструирование – процесс поиска, нахождения и отражения в конструкторской документации формы, размеров и состава изделия (входящих в него деталей и узлов, используемых материалов, комплектующих изделий), взаимного расположения частей и связей между ними, указаний на технологию изготовления с целью обеспечения производства изделия с заданными свойствами при наименьшей трудоемкости изготовления.

РЭС – изделия, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и радиоэлектроники.

Радиоаппаратура – аппаратура, используемая для связи.

Радиотехническая аппаратура – аппаратура, используемая для обнаружения целей, наведения и навигации и т.д.

Электронная аппаратура – аппаратура, в которой передача и преобразование информации осуществляется методами электроники.

Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) – аппаратура в которой прием, обработка, хранение и передача информации осуществляется методами радиотехники и электроники.

Таким образом, термины РЭС и РЭА являются синонимами.

В настоящее время при решении задач проектирования, исследований, разработки и производства РЭА успешно используется системный подход /4,5/.

Система – это совокупность взаимосвязанных разнородных устройств (частей, подсистем), совместно решающих общую задачу в условиях взаимодействия с окружающей средой с учетом развития и противоречий.

Системный подход рассматривает проектируемую систему РЭС как систему, состоящую из взаимосвязанных частей (подсистем). В свою оче-

редь, сама РЭС может входить в систему более высокого уровня, которую называют суперсистемой.

При системном подходе к конструированию ведется поиск оптимальных вариантов с учетом всех факторов, определяющих качество РЭС. К этим факторам относятся:

- элементная база (электрорадиоэлементы (ЭРЭ) и радиокомпоненты);
- конструкционные материалы;
- виды электрических соединений;
- способы достижения механической прочности;
- обеспечение теплового режима, герметичности и т.п.

При системном подходе к конструированию необходимо учитывать ограничения, накладываемые условиями эксплуатации, технологичностью схемы и конструкции, надежностью, объектом установки и пр.

Таким образом, системный подход к конструированию РЭС заключается в поиске и нахождении оптимального варианта решения поставленной задачи с учетом всех факторов и ограничений, определяющих качество и надежность РЭС с применением высших достижений науки и техники.

1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС

Проектирование и разработка РЭС – сложный комплекс теоретических, схемотехнических, проектно-конструкторских, технологических, производственных и испытательных работ. Успешному решению способствует применение системного проектирования РЭС, которое состоит из трех этапов:

- системного проектирования;
- функционального проектирования;
- технического проектирования.

Системный подход базируется на рассмотрении изучаемого объекта во взаимосвязи с окружающими объектами. Его задачами являются исследование специфических связей, установление закономерностей, присущих отдельным типам систем, разработка на этой основе определенных методов их описания и изучения.

Сформулируем основные положения системного подхода.

1. Параметрическое описание, которое является простейшей формой научного анализа и представляет собой исследование любого объекта, которое базируется на эмпирических наблюдениях, описании свойств, признаков и отношений исследуемого объекта к другим.

2. Структурное описание исследуемого объекта, которое выполняют после выявления параметров. Предусматривает переход к определению поэлементного строения исследуемого объекта. Основная задача состоит в том, чтобы установить взаимосвязи свойств, признаков, выявленных при параметрическом описании исследуемого объекта.

3. Функциональное описание исследуемого объекта, которое может быть выполнено исходя из функциональных зависимостей между параметрами (функционально-параметрическое описание) или частями объекта (функционально-структурное описание). Специфика состоит в том, что функция части объекта задается на основе характеристики всего объекта.

Приведенные положения показывают постепенное усложнение подхода к исследуемому объекту, так как каждый последующий этап включает все предыдущие и, кроме того, решает некоторые новые задачи.

Использование системного подхода должно упрощать процесс исследования. Особенность системного подхода заключается в новой ориентации всего хода исследования, которая состоит в стремлении построить целостную картину исследуемого объекта.

Системный подход базируется на следующих принципах.

1. При исследовании объекта как системы, описание его частей не имеет самостоятельного значения, так как каждая часть объекта описывается не отдельно, а с учетом ее роли во всем объекте.

2. Специфика системного объекта не исчерпывается особенностями составляющих его частей, а связана с характером взаимосвязей между отдельными частями.

3. Один и тот же исследуемый объект выступает как обладающий одновременно разными характеристиками, параметрами, функциями, структурой. Проявлением этого является иерархичность строения систем.

4. Исследование системы, как правило, неотделимо от исследования условий ее функционирования.

5. При исследовании сложного объекта учитывается зависимость состояния частей от состояния всей системы.

6. Анализ функциональной характеристики исследуемого объекта может оказаться недостаточным, так как весьма важно установить целесообразность функционирования системы.

Использование системных методов позволяет избегать односторонних ошибочных представлений, заключений и решений. При конструировании РЭС системный подход является средством анализа и синтеза при одновременном использовании большого числа компонентов и факторов, а также взаимосвязей, образующих данную систему. Он позволяет рассматривать РЭС как единое целое при анализе и проектировании ее частей. При этом необходимо иметь способ объединения частей в одно целое.

Свойства РЭС описываются совокупностью электрических, конструктивно-технологических, эксплуатационных и экономических параметров и характеристик. Для исследования и проектирования целесообразно разделять РЭС, как систему на устройства (подсистемы):

- по выполняемым функциям;
- по физической сущности процессов и особенностям их закономерностей.

По выполняемым функциям устройства РЭС делятся на антенно-фидерные, передающие, приемные, источники вторичного электропитания, устройства управления функционированием аппаратуры (пульта управления), устройства вторичной обработки и выдачи информации, контроля состояния и обнаружения неисправностей, соединительные устройства (механические и электрические), устройства сопряжения РЭА с потребителями информации (операторами, объектами).

При системном проектировании определяют структуру и состав РЭС. При функциональном проектировании разрабатывают функциональную и принципиальную схемы РЭС. На этапе технического проектирования ведется конструкторско-технологическая проработка РЭС.

Проектирование РЭС, как и любой системы, заключается в решении поставленной задачи методами анализа и синтеза.

Анализ – метод познания при помощи декомпозиции или разложения предметов исследования (объектов, свойств и т. д.) на составные части. В связи с этим анализ составляет основу аналитического метода исследований.

Синтез - соединение отдельных сторон предмета в единое целое.

Анализ и синтез взаимосвязаны, они представляют собой единство противоположностей. Различают следующие виды анализа и синтеза:

- прямой или эмпирический метод (используют для выделения отдельных частей объекта, обнаружения его свойств, простейших измерений и т.п.);
- возвратный или элементарно теоретический метод (базирующийся на представлениях о причинно-следственных связях различных явлений);
- структурно-генетический метод (включающий вычленение в сложном явлении таких элементов, которые оказывают решающее влияние на все остальные сторонние объекты).

При анализе определяются функциональные параметры и возможности реализации конкретной структуры РЭС. Синтез предполагает построение РЭС по заданным функциям решения поставленной задачи на основании разработки оптимальной структуры, схемных решений и конструкции.

Задача синтеза РЭС возникает в том случае, когда в результате анализа установлено, что существующее РЭС не соответствует предъявляемым требованиям. В результате синтеза создается новое РЭС и путем анализа оценивается его соответствие новым требованиям.

Таким образом, проектирование РЭС следует рассматривать как итеративный процесс последовательного чередования анализа и синтеза.

1.1. Основные этапы разработки РЭС

Разработка новых или модификация существующих РЭС начинается с этапов научно-исследовательской (НИР), а затем опытно-конструкторской разработок (ОКР). Иногда НИР и ОКР могут быть совмещены в научно-исследовательскую опытно-конструкторскую разработку (НИОКР).

1.1.1. Проведение НИР

На этапе НИР проводятся всесторонние научно-исследовательские работы, которые должны подтвердить возможность создания или модификации РЭС. Результатом НИР обычно является научно-технический отчет, в котором содержатся выводы и рекомендации о принципах построения РЭС, на основании теоретических и экспериментальных исследований обоснованы алгоритмы функционирования узлов, систем и РЭС в целом, доказана адекватность полученных теоретических результатов физической

реальности параметров средства. Как правило, в результате проведения НИР вырабатываются требования к Техническому заданию (ТЗ) на ОКР РЭС. НИР может иметь и отрицательный результат, показывающий, что на современном уровне развития науки и техники реализация поставленной задачи невозможна.

1.1.2. Проведение ОКР

Решение о проведении ОКР принимается, как правило, на основании результатов НИР и является процессом воплощения теоретических результатов в схемы и конструкцию и, в конечном итоге, в готовое изделие.

На этапе ОКР на первый план выступают экономические задачи, т.к. именно здесь формируется основная конструкция РЭС, влияющая как на ее стоимость в целом, так и на длительность и стоимость ее разработки.

Как правило, результатом ОКР является представление опытных образцов изделий, которые должны пройти заводские испытания, а в ответственных случаях – государственные испытания (бортовая, морская, космическая и наземная РЭА).

На основании заводских и государственных испытаний делается заключение о начале производства данного РЭС.

В соответствии с ГОСТ 2.103-68 НИР и ОКР включают в себя следующие стадии (таблица 1).

Таблица 1. Стадии разработки НИР и ОКР

№ п.п.	Стадии разработки	Этапы работ
1	Техническое задание	Разработка технического задания
2	Техническое предложение	Подбор материалов. Разработка и утверждение технического предложения по результатам анализа ТЗ и литературы. Конструкторской документации (КД) присваивается литера "П"
3	Эскизный проект	Разработка эскизного проекта с присвоением КД литеры "Э". Изготовление и испытание макетов. Рассмотрение и утверждение эскизного проекта
4	Технический проект	Разработка технического проекта с присвоением КД литеры "Т". Изготовление и испытание макетов. Рассмотрение и утверждение технического проекта

5	Разработка рабочей документации (рабочий проект): а) опытный образец (партия) б) установочная серия в) серийное или массовое производство	Разработка КД для изготовления и испытания опытного образца (партии). Изготовление и заводские испытания опытного образца. Корректировка КД по результатам изготовления и испытаниям с присвоением КД литеры "О". Государственные, межведомственные, приемочные и др. испытания опытного образца. Корректировка КД по результатам этих испытаний с присвоением литеры "О". При проведении повторных испытаний и корректировке КД присваиваются литеры "О₁", "О₂" и т.д. Изготовление и испытание установочной серии. Корректировка КД по результатам этих работ и оснащение технологического процесса с присвоением КД литеры "А" Изготовление и испытание головной (контрольной) партии изделия. Корректировка КД по результатам этих работ с присвоением КД литеры "Б". КД должна быть окончательно отработана и проверена по зафиксированному и полностью оснащённому технологическому процессу
---	---	---

Рассмотрим кратко характеристики каждой стадии разработки РЭС.

Техническое задание – стадия на которой разрабатывается, составляется и утверждается техническое задание на проектирование разработку, изготовление, испытания и выпуск изделия.

ТЗ составляется по требованиям ГОСТ 15.001-88 (ГОСТ 15.003-79 – для бытовой РЭА) и должно содержать, как минимум, следующие разделы:

1. Наименование и область применения.
2. Основание для разработки.
3. Цель и назначение разработки.
4. Источники разработки.
5. Технические требования.

6. Экономические показатели.
7. Стадии и этапы разработки.
8. Порядок контроля и приемки.

ТЗ должно содержать основное назначение, тактико-технические характеристики, показатели качества, надежности и экономические показатели. В ТЗ указываются специальные, конструктивные, технологические, эксплуатационные требования. Как правило, ТЗ разрабатывают и согласовывают совместно Разработчик и Заказчик, но ведущая роль принадлежит Разработчику.

После утверждения ТЗ руководителями организаций Заказчика и Разработчика (Исполнителя) приступают к выполнению следующей стадии разработки РЭС – техническому предложению (ПТ).

Техническое предложение представляет собой совокупность КД, в которых отображаются различные варианты схемного и конструкторского построения разрабатываемой РЭС и дается сравнительная оценка этих вариантов между собой и с аналогами отечественного и зарубежного исполнения. Полный объем работ и требований к этапу определяет ГОСТ 2.118-73.

На стадии технического предложения проводится технико-экономическое обоснование целесообразности проведения разработки. Основное в ПТ – построение и обоснование выбора структурной (функциональной) схемы РЭС, из которой должна быть видна картина функционирования и взаимодействия всех основных блоков и устройств по каждому варианту. Проверяется патентная чистота и конкурентоспособность, оформляются заявки на изобретения, изготавливаются макеты и проводятся натурные испытания, оформляется комплект КД с literой "П".

После согласования и утверждения ПТ в установленном порядке оно является основанием для разработки эскизного проекта (ЭП).

Эскизный проект – совокупность КД, содержащих принципиальные и конструктивные решения, общие представления об устройстве и принципах работы РЭС, о данных по назначению, по основным параметрам и массогабаритным показателям. Полный объем требований к ЭП устанавливает ГОСТ 2.119-73.

В общем случае объем работ на стадии ЭП следующий:

- выполняются варианты возможных решений и их конструктивная проработка;
- решают предварительные вопросы упаковки и транспортировки узлов, блоков и РЭС в целом;
- изготавливают и испытывают макеты с целью проверки принципов работы или его основных частей;
- проверяют соответствие вариантов построения РЭС требованиям техники безопасности (ТБ) и промышленной санитарии (ПС);

- выбирают оптимальные варианты построения РЭС;
- выявляют использование новых материалов и изделий, которые должны быть изготовлены сторонними организациями, составляют ТЗ на них;
- прорабатывают основные вопросы технологии изготовления РЭС по показателям стандартизации и унификации, по эргономическим и эстетическим характеристикам;
- проверяется патентная чистота и конкурентоспособность, оформляются заявки на изобретения;
- изготавливаются макеты и проводятся натурные испытания;
- выбирается оптимальный вариант построения РЭС;
- оформляют комплект КД с литературой "Э".

После согласования и утверждения ЭП в установленном порядке он служит основанием для разработки технического проекта (ТП).

Технический проект – совокупность КД, содержащих окончательные технические решения и дающих полное представление об устройстве и составе РЭС. Полный объем требований к ЭП устанавливает ГОСТ 2.120-73.

В общем случае на стадии технического проекта проводят следующие работы:

- разработку конструктивных решений РЭС и ее составных частей;
- выполнение необходимых расчетов;
- выполнение необходимых принципиальных схем, схем соединений и т.п.;
- разработку и обоснование технических решений и надежности;
- анализ конструкции РЭС на технологичность в условиях данного производства;
- разработку и испытание макетов;
- оценку эксплуатационных данных (ремонтпригодность, устойчивость против внешних воздействий, взаимозаменяемость, контроль качества и др.);
- оценку возможностей транспортировки, хранения, монтажа на месте применения РЭС;
- согласование необходимых габаритных, установочных и присоединительных размеров с Заказчиком или основным потребителем;
- проверяется патентная чистота и конкурентоспособность, оформляются заявки на изобретения;
- оценку технического уровня и качества и определения покупных изделий;
- разработку чертежей сборочных единиц и деталей;
- окончательную проработку на соответствие РЭС требованиям техники безопасности и промышленной санитарии;

- оформление КД с литерой "Т".

После согласования и утверждения технического проекта в установленном порядке он служит основанием для разработки рабочего проекта.

Рабочий проект – создание и отработка полного комплекта КД (литера "О") на РЭС (см. ГОСТ 2.102-68).

На этой стадии разрабатывается технология изготовления составных частей и РЭС в целом. При создании рабочего проекта предусматривается, в первую очередь, разработка схемной части устройства. На базе принципиальных схем разрабатываются чертежи устройств, узлов и деталей.

Опытный образец изготавливается с целью;

- окончательного определения технических характеристик аппаратуры в процессе проведения испытаний;
- проверки показателей эксплуатационной надежности (помехозащищенности, радиационной стойкости, ремонтпригодности) РЭС и безопасности его эксплуатации;
- проверки и отработки технической документации;
- определения необходимости составления дополнительной документации (инструкций по настройке, монтажу, регулировке и др.) для изготовления опытной партии, эксплуатации и ремонта изделия.

В процессе изготовления РЭС проводятся приемо-сдаточные испытания отдельных функциональных узлов и блоков, а после их изготовления – приемо-сдаточные испытания опытного образца по электрическим, механическим, климатическим, радиационным и другим требованиям. Испытания проводятся представителями отдела технического контроля (ОТК) предприятия-разработчика и представителями Заказчика в соответствии с техническими условиями ТЗ на разработку РЭС в целом, а также в соответствии с ТЗ на узлы, блоки в частности. Технические условия входят обязательно в состав КД, передаваемой на завод-изготовитель.

По результатам испытаний и опытной эксплуатации КД корректируется и в ней проставляется литера "О₁", "О₂" и т.д.

Откорректированная документация уже с литерой "А" передается предприятием-разработчиком на завод-изготовитель для выпуска установочной партии и запуска ее в серийное производство.

После выпуска установочной партии РЭС разработчик передает все оригиналы КД заводу-изготовителю, который при необходимости перевыпускает ее с литерой "Б".

В процессе эксплуатации и ремонта серийной РЭС часто возникает необходимость в корректировке функциональных, принципиальных, монтажных и других схем КД. Эти изменения вносят и оформляют в соответствии с ГОСТ 2.503-74.

Эти этапы и стадии разработки приведены для сложных РЭС. При разработке простых РЭС или при модернизации ряд стадий может быть опущен, и это должно быть указано в ТЗ на разработку.

ОКР может проводиться без предварительной НИР, если не ведется разработка новых принципов, а только совершенствование имеющейся РЭС.

Стадии разработки конструкторской документации (КД) установлены ГОСТ 2.103-68; виды конструкторских документов - ГОСТ 2.102-68, 2.701-84, 2.601-68, 2.602-68 (СТ СЭВ 208-75, 4768-84, 651-77, 1798-79, 857-78).

ГОСТ 2.101-68 (СТ СЭВ 364-76) устанавливает виды изделий при разработке конструкторской документации.

Изделие - любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии.

Изделия различают по видам:

деталь - изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций;

сборочная единица - изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями;

комплекс - два и более изделий (состоящих, в свою очередь, из двух и более частей), не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций;

комплект - два и более изделий, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера.

К конструкторским документам относят графические и текстовые документы, которые определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта.

При разработке систем автоматизированного проектирования (САПР) также следует руководствоваться стандартами, не относящимися к ЕСКД (ГОСТы на САПР, ЕСПД (Единая система программной документации), ЕСТПП (Единая система технологической подготовки производства) и др.). Например, ГОСТ 22487-77 «Проектирование автоматизированное. Термины и определения», ГОСТ 23501.0-79, ГОСТ 23501.17-82 устанавливают правила разработки, согласования и утверждения технического задания, технического предложения, эскизного проекта, технического проекта, предпроектных исследований, документов рабочего проекта; состав и содержание работ, порядок оформления и утверждения документов при изготовлении, отладке и испытаниях САПР; общие требования к программ-

ному обеспечению, банкам данных, диалоговым средствам, техническому обеспечению и др.

1.1.3. Комплектность конструкторских документов

Комплектность конструкторских документов для каждой стадии разработки конструкторской документации устанавливают ГОСТ 2.102-68, 2.118-73 ...2.120-73, 2.601-68 и техническое задание на разрабатываемое изделие. Так, на стадии разработки рабочей документации обязательными являются документы:

- чертеж детали, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля;
- сборочный чертеж (СБ), содержащий изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для ее сборки и контроля;
- спецификация - документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса или комплекта.

К обязательным проектным документам относятся следующие:

- ведомости технического предложения (ПТ), эскизного проекта (ЭП), технического проекта (ТП) - перечни соответствующих документов;
- пояснительная записка (ПЗ);
- чертеж общего вида (ВО).

Чертеж общего вида определяет конструкцию изделия, взаимодействие его основных составных частей и поясняет принцип работы изделия (включая форму деталей и характерные размеры, которые облегчают уяснение формы элементов деталей, например, обозначение диаметра для деталей круглой формы); на нем указывают посадки; предельные отклонения сопрягаемых поверхностей; сопровождается техническими требованиями к изделию (например, по покрытию, пропитке обмоток, методам сварки); содержит технические характеристики, необходимые для разработки рабочих чертежей.

Чертеж должен содержать сведения о составных частях изделия в таблице, выполненной на том же листе или на отдельных листах формата А4, обозначаемых как последующие листы того же чертежа. Конструктор составляет таблицу по своему усмотрению; рекомендуется вести запись последовательно: изделия заимствованные, покупные, вновь разрабатываемые. Можно приводить соответствующие сведения на полках линий-выносок или оформлять их в виде спецификаций. Чертеж общего вида является обязательным документом только на этапе «Технический проект» и необязателен на этапах «Техническое предложение» и «Эскизный проект».

По усмотрению заказчика при проектировании разрабатывают:

- графические конструкторские документы и схемы (преимущественно на рабочей стадии и не обязательно на проектной);

- габаритный чертеж (ГЧ) - контурное (упрощенное) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами;
- электромонтажный чертеж (МЭ) - документ, содержащий данные, необходимые для выполнения электрического монтажа изделий;
- монтажный чертеж (МЧ) - контурное (упрощенное) изображение изделия с данными для его установки (монтажа) на месте применения;
- упаковочный чертеж (УЧ) - документ, содержащий данные, необходимые для выполнения упаковки изделия;
- схемы - документы, на которых показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними.

Пояснительная записка (ПЗ) составляется по окончании работ на всех стадиях проектирования и включает в себя следующие разделы:

- введение;
- назначение и область применения;
- технические характеристики;
- описание и обоснование выбора конструкции;
- расчеты;
- выводы.

Введение содержит наименование, номер и дату утверждения ТЗ.

Назначение и область применения содержит: сведения из ТЗ, а также конкретизирующие и дополняющие их сведения по области и условиям применения изделия, основные данные по обеспечению стабильности показателей качества в условиях эксплуатации.

Технические характеристики содержат: основные (из ТЗ) и дополнительные к ТЗ тактико-технические характеристики, сведения о соответствии или обоснованных отклонениях от требований ТЗ, данные сравнения характеристик отечественных и зарубежных аналогов, результаты анализа технического уровня и качества.

Описание и обоснование выбора конструкции содержит: описания и анализ рассмотренных вариантов конструктивных и научно-технических решений, в том числе, на патентную чистоту и конкурентоспособность изделия, сведения об использованных изобретениях и заявках, справочные сведения по основным КД, результатам испытаний, требованиям ТБ и ПС. В ПЗ эскизного проекта рассматривается дополнительно соответствие макетов требованиям эргономики.

Расчеты содержат: ориентировочные (на стадиях ПТ и ЭП) и окончательные (на стадии ТП) расчеты (кинематические, электрические, тепловые, компоновочные, надежности, ремонтпригодности и пр.).

Выводы содержат краткий перечень основных результатов работ и рекомендаций о дальнейших действиях по проектированию или выпуску изделия.

1.2. Классификация РЭС

Все виды конструкций РЭС можно разделить по назначению, тактике использования и виду объекта установки /2/. В соответствии с этим принята следующая классификация РЭС:

1. Бортовые РЭС.
2. Морские РЭС.
3. Наземные РЭС.
4. Бытовые РЭС.

Каждая из этих категорий, в зависимости от объекта установки, делится на группы (рисунок 1.1).

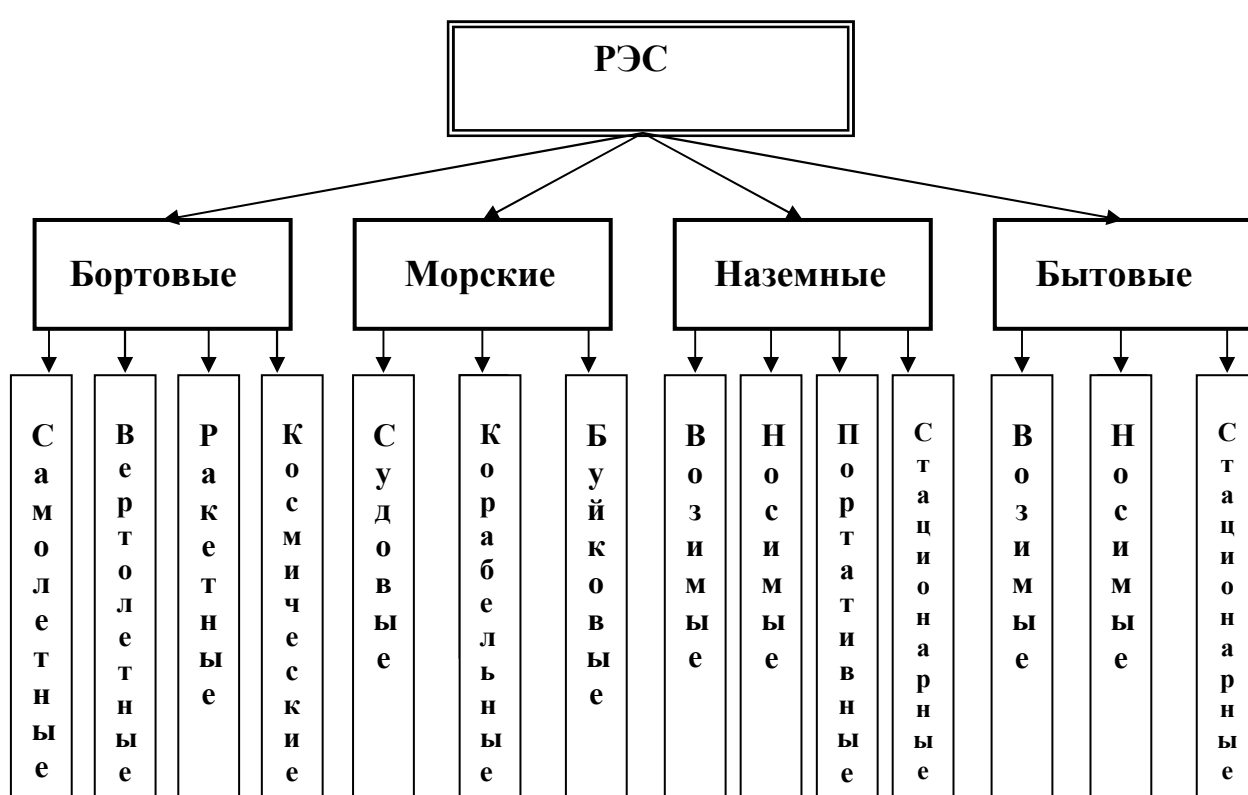


Рисунок 1.1. Классификация РЭС

Конструкция таких РЭС должна обеспечивать свободный доступ к внутренним частям изделия. РЭС, устанавливаемое на самолетах и вертолетах, выполняется обычно в виде блоков, которые имеют законченное конструктивное оформление с элементами быстросъемного механического крепления. Как правило, бортовые РЭС монтируются либо на групповой раме, либо на стеллажах, снабженных амортизаторами (рисунок 1.2).

Разъемы и распределительные коробки для межблочного монтажа находятся на тыльной стороне блоков. На стеллажах, например, РЭС из 16 блоков различной ширины, собирается в три этажа.

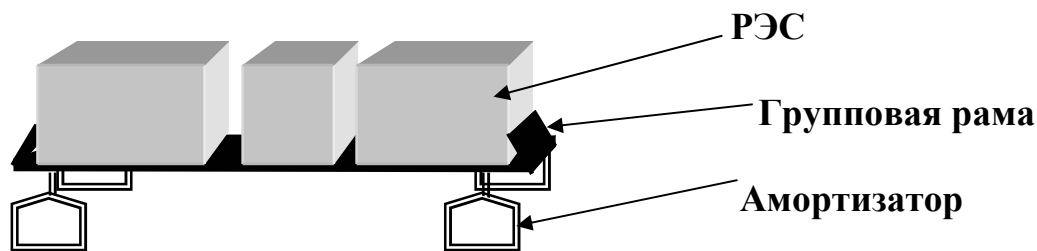


Рисунок 1.2. Размещение бортового РЭС на ЛА

В основном блоки бортовых РЭС конструируются прямоугольной формы, за исключением тех, которые устанавливаются в специальных отсеках (хвостовое оперение, концы крыльев).

В **космических** и **ракетных** РЭС, помимо общих требований к бортовой аппаратуре, предъявляют ряд особых требований, связанных с высокой безотказностью работы: высокая ремонтпригодность в предстартовый период, большие ударные и вибрационные нагрузки и линейные ускорения, а также работа в условиях термоударов, невесомости, особые ограничения по объему и массе.

Несущие рамы, на которых устанавливаются такие РЭС, бывают плоскими и объемными. Сама рама крепится к носителю болтами. Для надежности используют двойное резервирование, термостатирование, хранение в специальных контейнерах с нейтральным газом и т.д.

Требования к условиям эксплуатации бортовых РЭС приведены в Приложении 1 (табл.1).

Морские РЭС устанавливаются на речных судах, кораблях, подводных лодках и надводных и подводных буях.

Конструктивное исполнение такой аппаратуры определяется классом корабля, местом ее установки (снаружи, внутри). Для малых кораблей (катера, суда на подводных крыльях и т.п.) по своему исполнению аппаратура напоминает самолетную, но отличается наличием уплотняющего кожуха высокой прочности.

Эти морские РЭС должны выдерживать вибрации, линейные ускорения, ударную нагрузку, ботовую и килевую качку, высокую влажность.

Все это требует создание конструкций, имеющих высокую и надежную виброизоляцию, удароустойчивость, термоизоляцию, водо- и брызгозащищенность (см. табл.2 Приложения).

На крупных судах для размещения РЭС обычно предусматривается специальные помещения с мощной вентиляцией и температурой $t = 18^{\circ} \div 23^{\circ} \text{C}$. Расположение и крепление аппаратуры должно обеспечивать легкий и быстрый доступ для обслуживания и ремонта, исключать перемещение при крене, дифференте, ускорении и т.п.

Конструкции РЭС больших судов во многом похожи на земные стационарные РЭС и отличаются от них устройствами влаго- и брызгозащитности, высоким уровнем типизации, блочно-разборными конструкциями РЭС небольших размеров (из-за ограниченности размеров люков корабля), защищенностью от сильных ВЧ (электромагнитных), НЧ (гидроакустических) помех. Такая аппаратура конструируется в виде шкафов (стоек).

Буйковые РЭС служит навигационным и другим целям и характеризуется:

- особой продолжительностью необслуживаемой эксплуатации;
- работой в морской воде в плавающем и подводном состоянии;
- воздействием сильных ударов (волнение моря и при установке бую);
- высокой прочностью, герметичностью и коррозионной стойкостью.

Требования к условиям эксплуатации судовых РЭС приведены в Приложении (табл.2).

Наземные РЭС – наиболее широкий и разнообразный класс РЭС.

Наземные РЭС делятся на стационарные, возимые, носимые и портативные.

Стационарные РЭС устанавливаются в отапливаемых наземных и подземных помещениях, на открытом воздухе или в неотапливаемых наземных и подземных сооружениях. Условия эксплуатации для стационарных РЭС приведены в таблице 3 Приложения.

Возимые РЭС устанавливаются на транспортных средствах, в кузовах и кабинах автомашин, на железнодорожном транспорте, танках и т.д. Аппаратура должна работать в условиях высокой запыленности, влаги, вибраций и динамических перегрузок.

В возимых РЭС применяют следующие принципы конструктивных построений (блочно-шкафное и ячеечно-шкафное):

- блочный, с размещением блоков в шкафах;

- автономное размещение блоков в различных местах корпуса или кузова транспортного средства.

Условия эксплуатации для возимых РЭС приведены в таблице 4 Приложения.

Носимые и портативные РЭС обычно переносятся человеком или транспортируются на животных или иных транспортных средствах.

Значения дестабилизирующих факторов для носимых и портативных РЭС приведены в таблице 5 Приложения.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ

2.1. Печатная плата

Печатный монтаж представляет собой монтаж, при котором электрическое соединение элементов электронного узла выполняется с помощью плоских (печатных) проводников.

При производстве РЭС печатный монтаж позволяет обеспечить:

- повторяемость монтажного рисунка схемы, а следовательно, идентичность параметров монтажа;
- автоматизацию сборки, монтажа (пайки) и контроля на базе использования промышленных роботов;
- высокую плотность расположения проводников, их малые габариты и массу;
- низкую стоимость при массовом производстве;
- большую механическую прочность и стойкость к климатическим и тепловым воздействиям.

К недостаткам печатного монтажа следует отнести:

- большая длительность циклов подготовки производства;
- принципиальная невозможность полного экранирования;
- ограничение максимальных габаритов печатной платы (ПП) из-за уменьшения их жесткости;
- плохая ремонтопригодность.

Термины и определения по ПП и печатным узлам, содержащим ПП с навесными элементами, приведены в ГОСТ 20406-75 /7/. Методы конструирования и расчета содержит ОСТ 4.010.022-85 /8/. Общие технические условия приведены в ГОСТ 23752-79 /9/. Содержание, формы КД на разработку и производство ПП и РЭС приведены в /10/.

Рассмотрим основные термины и определения.

Печатная плата – материал основания - диэлектрик (стеклотекстолит, керамика, гетинакс), вырезанный по размеру и содержащий необходимые отверстия и проводящий рисунок.

Основание ПП – элемент конструкции ПП, на поверхности или объеме которого выполнен проводящий рисунок.

Печатный проводник ПП – одна проводящая полоска или площадка в проводящем рисунке.

Контактная площадка ПП – часть проводящего рисунка, используемая для подсоединения элементов.

Монтажное отверстие ПП – отверстие для соединения выводов навесных элементов.

Свободное место ПП – участок ПП, где элементы проводящего рисунка и расстояния между ними могут быть выполнены номинальной величины.

Узкое место ПП - участок ПП, где элементы проводящего рисунка и расстояния между ними могут быть выполнены только с минимально допустимыми значениями.

Оригинал рисунка ПП – изображение рисунка ПП, выполненное с необходимой точностью в заданном масштабе.

Печатный узел – ПП с помещенными на ней навесными элементами (резисторами, конденсаторами, микросхемами и т.п.).

Односторонняя ПП (ОПП) – ПП, имеющая одно основание, на одной стороне которого выполнен проводящий рисунок (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1. Односторонняя печатная плата:
1 - материал основания; 2 - проводящий рисунок

ОПП характеризуются:

- повышенной точностью выполнения проводящего рисунка;
- отсутствием металлизированных отверстий;
- установкой электрорадиоэлементов на поверхности ПП со стороны проводящего рисунка (с противоположной от пайки стороны) без дополнительного изоляционного покрытия;
- низкой стоимостью.

Двухсторонняя ПП (ДПП) – ПП, на обеих сторонах которой выполнены проводящие рисунки и все требуемые соединения (рисунок 2.2).

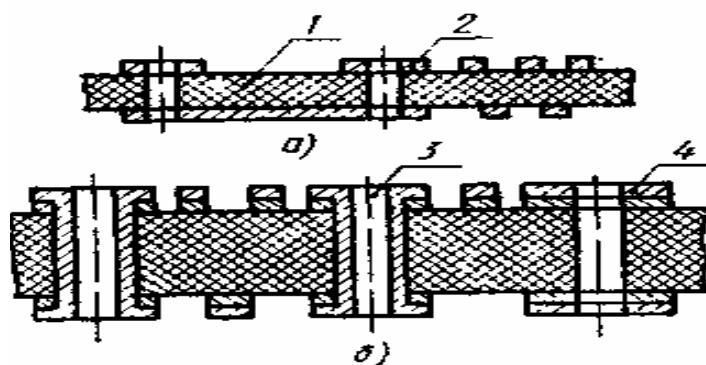


Рисунок 2.2. Двухсторонняя печатная плата
а) - без металлизации отверстий; б) - с металлизацией отверстий;
1- материал основания; 2 - проводящий рисунок; 3 - металлизированное отверстие; 4 - химико-технологическое покрытие

ДПП без металлизации монтажных и переходных отверстий (рисунок 2.2,а) характеризуется:

- высокой точностью выполнения проводящего рисунка;
- использованием объемных элементов конструкции (штыри, отрезки проволоки, арматура переходов и т.п.) для соединений элементов проводящего рисунка, расположенных на противоположных сторонах ПП;
- низкой стоимостью.

ДПП с металлизацией монтажных и переходных отверстий (рисунок 2.2,б) характеризуется:

- высокими коммутационными возможностями;
- повышенной прочностью сцепления выводов навесных элементов с проводящим рисунком ПП;
- повышенной стоимостью по сравнению с ПП без гальванического соединения слоев.

Многослойная ПП (МПП) – ПП, состоящая из чередующихся слоев изоляционного материала с проводящим рисунком на двух и более слоях, между которыми выполнены требуемые соединения (рисунок 2.3).

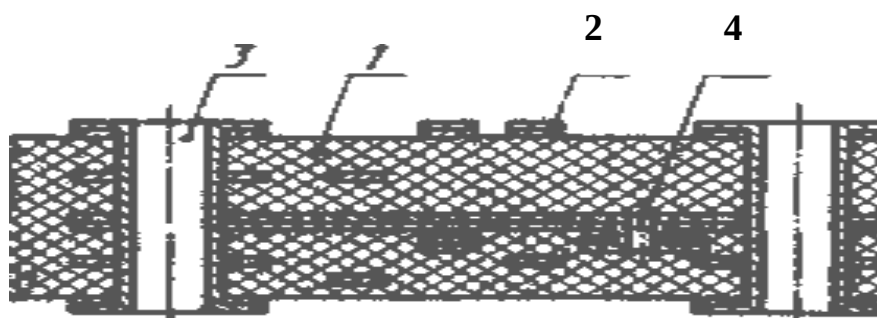


Рисунок 2.3. Многослойная печатная плата

1 - материал основания; 2 - проводящий рисунок;

3 - сквозное металлизированное отверстие; 4 – переходное отверстие

Многослойные ПП с металлизацией сквозных отверстий (ОСТ 4.010.022-85) характеризуются:

- хорошими коммутационными свойствами;
- наличием межслойных соединений, осуществляемых с помощью сквозных металлизированных отверстий, а также, в особых случаях, с помощью переходных отверстий, соединяющих только внутренние слои;
- предпочтительным использованием одностороннего фольгированного диэлектрика для наружных и двустороннего для внутренних слоев, обязательным наличием контактных площадок на любом проводящем

слое, имеющем электрическое соединение с переходными отверстиями;

- низкой ремонтпригодностью;
- высокой помехозащищенностью электрических цепей;
- высокой стоимостью конструкции.

Гибкий печатный кабель (рисунок 2.4) характеризуется:

- высокой гибкостью;
- малыми толщинами;
- возможностью подключения к ПП без использования соединителей;
- использованием одно- и двусторонних тонких фольгированных диэлектриков на лавсановой и полиамидной основах;
- одно- и двурядным расположением лепестков;
- возможностью автоматизации процессов изготовления.

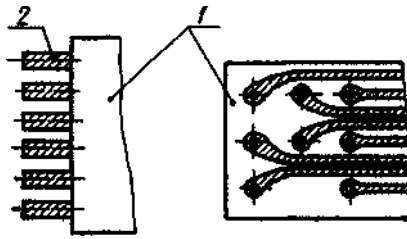


Рисунок 2.4. Гибкий печатный кабель
1 - материал основания; 2 - концевой контакт

Конструирование ПП и гибких печатных кабелей осуществляют ручным, полуавтоматизированным и автоматизированным методами.

При **ручном методе** размещение ЭРЭ на ПП и трассировку печатных проводников осуществляет непосредственно конструктор. Данный метод обеспечивает оптимальное распределение проводящего рисунка.

Полуавтоматизированный метод предусматривает:

- размещение навесных ЭРЭ с помощью ЭВМ при ручной трассировке печатных проводников;
- ручное размещение ЭРЭ при автоматизированной трассировке печатных проводников;
- ручное размещение ЭРЭ при ручной трассировке печатных проводников с автоматизированным переносом рисунка на машинные носители.

Метод обеспечивает высокую производительность труда.

Автоматизированный метод предусматривает:

- кодирование исходных данных;
- размещение навесных элементов;
- трассировку печатных проводников с помощью ЭВМ. Допускается доработка отдельных соединений вручную.

Метод обеспечивает высокую производительность труда.

При конструировании ПП проектировщик решает следующие взаимосвязанные задачи:

1. **Схемотехнические** - прокладка трасс печатных проводников, минимизация числа слоев ПП и др.

2. **Радиотехнические** - расчет паразитных параметров, решение вопросов электромагнитной совместимости (ЭМС), расчет параметров линий связи и электропитания и т.п.

3. **Теплотехнические** – обеспечение нормального теплового режима проводников и элементов, организация теплоотвода и др.

4. **Конструктивные** – размещение элементов на ПП, контактирование, способы крепления элементов и пр.

5. **Технологические** – выбор метода изготовления, защиты от внешних воздействий и травящих растворов.

Согласно ГОСТ 10317-79 «Платы печатные. Основные размеры» размеры каждой стороны ПП должны быть кратными:

- 2,5 при длине до 100 мм;
- 5,0 - 350 мм;
- 10,0 - более 350 мм.

Максимальный размер любой из сторон должен быть не более 470 мм. Таблица 6 Приложения составлена согласно ОСТ 4.010.020-83, ограничивающего ГОСТ 10317-79.

Допуски на линейные размеры платы должны соответствовать установленным стандартами ГОСТ 25346-82 и ГОСТ 25347-82 (СТ СЭВ 145-75 и СТ СЭВ 144-75). Соотношение линейных размеров сторон не более 3:1. Количество типоразмеров ПП в одном изделии следует ограничивать. Рекомендуется разрабатывать ПП прямоугольной формы. Стандарт ОСТ 4.070.010-78 "Платы печатные под автоматическую установку элементов. Конструкция и основные размеры" содержит специальные указания для выбора диаметров отверстий и контактных площадок под выводы устанавливаемого элемента (табл.2.1), а также другие сведения.

Таблица 2.1. Диаметры отверстий и контактных площадок, мм

Диаметр			Максимальное расстояние между цен- трами отверстий
вывода элемента	отверстия	контактной площадки	
0,4; 0,5	0,9	3,0	2,5
0,6; 0,7	1,1		
0,8; 0,9	1,3		3,75
1,0; 1,1	1,5		
1,2; 1,3; 1,4	1,8		
1,5; 1,6	2,0	4,0	5,0
1,7; 1,8; 1,9	2,2		

Примечания:

1. При любой установке элементов диаметры монтажных, переходных металлизированных и неметаллизированных отверстий следует выбирать из ряда: 0.4, 0,5; 0.6; 0,7; 0,8; 0,9; 1.0; 1,1; 1,2; 1.4; 1,4, 1,5, 1.6; 1,7; 1,8; 2.0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,6. 2,7; 2,8; 3,0.

2. Центры отверстий должны располагаться в узлах координатной сетки.

Стандарт ГОСТ 23751-86 устанавливает пять классов точности ПП и гибких печатных кабелей в соответствии со значениями основных параметров и предельных отклонений элементов конструкции (оснований ПП, проводников, контактных площадок, отверстий).

Область применения классов точности по ГОСТ 23751-86:

- 1,2 - для ПП с дискретными ЭРЭ при малой и средней насыщенности поверхности ПП навесными изделиями;
- 3 - для ПП с микросборками и микросхемами, имеющими штыревые и пленарные выводы, а также с безвыводными ЭРЭ при средней и высокой насыщенности поверхности ПП навесными изделиями;
- 4 - для ПП с микросхемами, имеющими штыревые и пленарные выводы, а также с безвыводными изделиями ЭРЭ при высокой насыщенности поверхности ПП навесными ЭРЭ.

Стандарт ГОСТ 2.417-78 (СТ СЭВ 1186-78) устанавливает основные правила выполнения чертежей ПП-детали. Чертежи ОПП и ДПП именуют

«Плата печатная», а чертеж МПП - «Плата печатная многослойная. Сборочный чертеж». Чертеж слоя МПП с проводящим рисунком, расположенным с одной или двух сторон, именуют «Слой многослойной печатной платы». Чертеж слоя МПП без проводящего рисунка именуют "Прокладка". Допускается не выпускать чертеж на прокладку при задании в спецификации ее материала. Чертежи выполняют в масштабах 4:1, 2:1, 1:1. На чертеже изображают одну проекцию с печатными проводниками и отверстиями.

Чертежи односторонних ПП следует выполнять групповым или базовым методом по ГОСТ 2.113-75 (СТ СЭВ 1179-78). Чертеж слоя МПП помещают на отдельном листе и проставляют габаритные размеры. Рекомендуемые масштабы: 1:1; 2:1; 4:1; 5:1; 10:1.

Основной шаг координатной сетки - 2,5 мм, допускаются шаги 1,25 и 0,625 мм. **Применение различных шагов координатной сетки на чертеже одной ПП недопустимо!**

Размеры отверстий, их количество, размеры контактных площадок и другие сведения помещают в таблице на чертеже. Рекомендуемая форма приведена в виде таблицы 2.2.

Таблица 2.2. Форма таблицы отверстий

Условное обозначение отверстий	Диаметры отверстий, мм	Наличие металлизации в отверстиях	Диаметры контактных площадок, мм	Количество отверстий

На чертеже платы отверстия показывают упрощенно - одной окружностью (без окружности зенковки и контактной площадки). Чтобы их различать, применяют условные обозначения (рисунок 2.5).

Диаметр, мм	0,6	0,8	1,0	1,3	1,5
Условные обозначения отверстий					

Рисунок 2.5. Условное обозначение отверстий

Контактные площадки выполняют прямоугольной, круглой или близкой к ним формы. На рисунке 2.6. показаны рекомендуемые формы контактных площадок на широких проводниках. На рисунке 2.7 дан пример простановки размеров для группы монтажных и контактных отверстий, предназначенных для установки на плате одного элемента, прибора (реле, микросхемы, соединителя и др.).

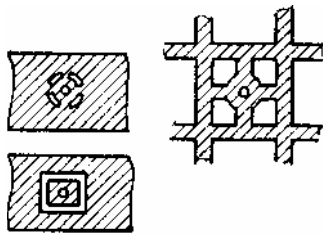


Рисунок 2.6. Контактные площадки и форма вырезов в проводниках

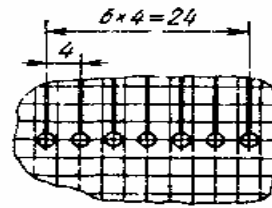


Рисунок 2.7. Разметка отверстий на плате для установки ЭРЭ, приборов, деталей

Отверстия, расстояния между которыми кратны шагу координатной сетки, располагают в ее узлах, остальные - согласно установочным размерам. Вынесенный элемент используют для облегчения чтения чертежа. Как показано на рисунке 2.8, а, отдельные печатные элементы (проводники, экраны, контактные площадки и др.) допускается штриховать. Проводники шириной менее 2,5 мм изображают сплошной толстой основной линией (рисунок 2.8, б), являющейся осью симметрии проводника.

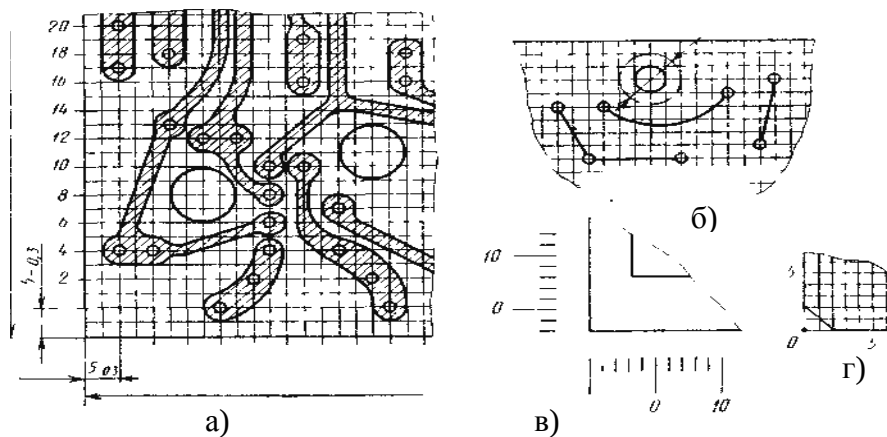


Рисунок 2.8. Варианты изображений проводников (а, б), контактных площадок (а) на чертеже ПП, нумерация координатной сетки (в, г)

Действительная ширина оговаривается в технических требованиях (п.4, Таблица 2.2). Проводники шириной более 2,5 мм можно изображать двумя линиями; при этом, если они совпадают с линиями координатной сетки, указание ширины на чертеже не требуется. На чертеже ПП размеры указывают одним из способов:

- в соответствии с ГОСТ 2.307-68;
- нанесением координатной сетки в прямоугольной или полярной системе координат;
- комбинированным способом с помощью размерных и выносных линий и координатной сетки в прямоугольной или полярной системе координат.

Координатную сетку наносят либо на всем поле чертежа (рисунок 2.8,а), либо на части поверхности ПП, либо рисками по периметру ее контура (см. рисунок 2.8, в). Линии сетки должны быть пронумерованы подряд или через определенные интервалы (см. рисунок 2.8,а). За нуль в прямоугольной системе координат на главном виде ПП следует принимать:

- центр крайнего левого нижнего отверстия, находящегося на поле платы, в том числе, технологического;
- левый нижний угол ПП (см. рисунок 2.8);
- левую нижнюю точку, образованную линиями построения (рисунок 2.8, г).

Изображение ПП с повторяющимися элементами допускается выполнять не полностью, без ущерба для однозначности восприятия чертежа. При этом должна быть указана закономерность расположения таких элементов.

Монтажные отверстия должны располагаться в узлах координатной сетки. Если шаг расположения вводов ЭРЭ не соответствует шагу сетки, то один из выводов (желательно первый от точки отсчета начала координат) должен обязательно располагаться в узле координатной сетки.

Конденсаторы, резисторы, интегральные схемы (ИС) и другие навесные элементы следует располагать параллельно координатной сетке. Расстояние между корпусами ЭРЭ должно составлять при этом не менее 1 мм.

Указания о маркировании ПП составляют в соответствии с ГОСТ 2.314-68. Маркировку располагают на чертеже с одной или с двух сторон. Она подразделяется на основную и дополнительную. Основная маркировка наносится обязательно и содержит:

- обозначение ПП или ее условный шифр;
- дату изготовления (год, месяц);
- порядковый номер изменения чертежа, относящийся только к изменению проводящего рисунка;
- буквенно-цифровое обозначение слоя многослойной платы.

Дополнительная маркировка наносится при необходимости и содержит:

- порядковый или заводской номер ПП или партии плат;
- позиционное обозначение навесных ЭРЭ;
- изображение контуров указанных навесных изделий;

- цифровое обозначение первого вывода навесного ЭРЭ, точек контроля;
- обозначение положительного вывода полярного ЭРЭ (знак «+»).

По периметру ПП предусматривают технологическую зону шириной не менее 1 мм, свободную от печатных проводников.

Обозначение ПП должно быть выполнено шрифтом размером не менее 2,5 мм, остальные маркировочные символы - не менее 2,0 мм.

Рекомендуемый состав и последовательность записи технических требований чертежа:

Печатную плату изготовить ... методом.

Печатная плата должна соответствовать ГОСТ 23752-79, группа жесткости....

Шаг координатной сетки ..., мм.

Сведения об элементах рисунка печатной платы, не указанные на чертеже.

Параметры элементов рисунка рекомендуется группировать в виде таблиц и размещать на свободном поле чертежа. В таблице можно указывать минимально допустимые значения элементов проводящего рисунка (ширина печатного проводника, диаметр контактной площадки и др.):

Размеры для справок.

Покрытие ... (по ГОСТ 9.306-85, ОСТ 4 ГО.014.000).

Масса покрытия ..., кг (только для драгоценных металлов).

Маркировать ... шрифт по

Дополнительные указания.

Порядковый номер изменения чертежа, относящейся только к изменению проводящего рисунка, записывают над основной надписью на свободном поле чертежа по типу: «*Номер изменения проводящего рисунка ...*».

Для ПП и гибких печатных кабелей, имеющих одинаковые технические требования, допускается записывать их на отдельных листах формата А4 (второй, третий и т. д. листы с соответствующей основной надписью по ГОСТ 2.104-68).

Комплектность конструкторских документов на ПП и требования по их выполнению при автоматизированном проектировании устанавливает ГОСТ 2.123-83. Предпочтительным способом изготовления документации является базовый. В состав постоянных данных, помещаемых на базовом чертеже, могут быть включены: изображение платы, указания для механической обработки и для разметки под установку электрического соединителя и крепежных отверстий, сведения о материале, технические требова-

ния, расположение печатных проводников, маркировка и т.д. В состав переменных данных, помещаемых на чертеже исполнения, могут быть включены:

- упрощенное изображение платы,
- расположение печатных проводников,
- маркировка, обозначение платы и сборочной единицы,
- технические требования и др.

При автоматизированном методе изготовления ПП в состав конструкторской документации допускается включать документы на магнитных носителях, определяющие конструкцию и метод изготовления ПП и их составных частей.

ГОСТ 23751-86 устанавливает четыре класса точности ПП соответствия значениям основных параметров и предельных отклонений элементов конструкции (оснований ПП, проводников, контактных площадок, отверстий).

1 класс – для ПП с дискретными ЭРЭ при малой и средней насыщенности поверхности ПП навесными изделиями.

2 класс – для ПП с микросборками и микросхемами, имеющими штыревые и планарные вводы, а также с безвыводными элементами (бескорпусными) при средней насыщенности поверхности ПП навесными изделиями.

3 класс - для ПП с микросборками и микросхемами, имеющими штыревые и планарные вводы, а также с безвыводными элементами при высокой насыщенности поверхности ПП навесными изделиями.

4 класс - для ПП с микросхемами, имеющих штыревые и планарные вводы, а также с безвыводными элементами при высокой насыщенности поверхности ПП навесными изделиями.

Установлены три класса ПП по плотности проводящего рисунка:

1 класс (А) – характеризуется номинальной плотностью проводящего рисунка и является предпочтительным для ПП всех размеров;

2 класс (Б) - характеризуется повышенной плотностью проводящего рисунка;

3 класс (В) - характеризуется высокой плотностью проводящего рисунка.

Допустимые значения параметров по классам плотности приведены в таблице 2.3.

При разбиении принципиальной электрической схемы по слоям ПП следует стремиться к минимизации числа слоев. В МПП каждый слой должен нести определенную функциональную нагрузку (слой цепей питания, слой сигнальных цепей и т.п.).

Таблица 2.3. Допустимые значения параметров по классам плотности ПП

Наименование параметров	Значение параметров классов в мм		
	1	2	3
Минимальная ширина проводника	0,5	0,25	0,15
Расстояние между проводниками, контактными площадками, проводником и контактной площадкой или проводником и металлизированным отверстием	0,5	0,25	0,25
Минимальное расстояние от края просверленного отверстия до площадки данного отверстия	0,05	0,035	0,025
Максимальный размер печатной платы	470x470	240x240	170x170

2.2. Печатный узел

Печатным узлом называют печатную плату с навесными элементами (см. Приложение, рисунок 1). Сборочный чертеж печатного узла «Плата печатная. Сборочный чертеж» должен давать полное представление о навесных радиоэлементах и других деталях, их расположении и установке на плате, а также сведения о:

- маркировке позиционных обозначений ЭРЭ;
- условных обозначениях выводов приборов (трансформаторов, реле и др.);
- нумерации выходных контактов, полярности элементов согласно электрической принципиальной схеме на печатный узел.

В местах крепления установочных деталей (стоек, втулок, скоб) производят местные разрезы. На чертеже наносят позиционные обозначения, габаритные и установочные размеры, а также размеры, определяющие положение элементов над платой. Чертеж содержит технические требования.

Навесные элементы изображают упрощенно, если это не мешает правильному пониманию чертежа. Их размещают параллельно поверхности платы рядами в определенном порядке с зазором 2-3 мм между платой и элементом (если это расстояние не оговорено в нормативно-технической документации (НТД) на элемент). Выводы элементов припаивают к плате. На выводы транзисторов рекомендуется надевать электроизоляционные трубки разного цвета.

Указания применительно к автоматизированной технологии дает ОСТ 4.091.124-79 «Размещение навесных элементов печатной платы под автоматическую установку элементов», используемый вместе с ОСТ 4.070.010-78.

2.3. Методы изготовления печатных плат

В настоящее время существует два основных технологических направления получения проводящего рисунка ПП:

- субтрактивные методы;
- аддитивные методы.

Субтрактивные методы основаны на избирательном удалении проводящего покрытия с металлизированного изоляционного основания.

Аддитивные методы основаны на нанесении проводящего рисунка на неметаллизированное диэлектрическое основание.

В производстве ОПП, ДПП, а также слоев МПП наиболее широко используют два способа изготовления (субтрактивные методы):

- химический или негативный;
- комбинированный позитивный.

Химический метод. Изображение проводящего рисунка обычно наносится на заготовку ПП фотоспособом. В качестве фотошаблона используется негатив рисунка ПП (пробельные места затемнены так, что фотоэмульсия засвечивается и закрепляется в местах расположения печатных проводников, предохраняя их от последующего химического травления).

Последовательность основных операций при химическом методе изготовления ПП следующая:

1. Заготовка основания ПП из фольгированного диэлектрика по заданным размерам.
2. Нанесение защитного фоторезистивного печатного рисунка.
3. Травление проводящего рисунка.
4. Удаление защитного фоторезистивного покрытия.
5. Механическая обработка монтажных и прочих отверстий (сверление).
6. Нанесение лаковой (эпоксидной) маски.
7. Облуживание контактных площадок.
8. Пайка выводов ЭРЭ и лакирование ПП.

Преимуществом данного метода является простота и малая длительность технологического цикла, что облегчает автоматизацию изготовления. Метод обеспечивает высокую точность размеров проводников.

Недостатком является отсутствие металлизации отверстий, что снижает прочность крепления печатных проводников к основанию ПП.

Химический метод используется в основном для изготовления ОПП и ДПП без металлизации отверстий неответственного применения или простых условий эксплуатации.

Комбинированный позитивный метод – в отличие от химического метода, в качестве защитного покрытия используется металл (серебро, золото, сплавы на основе олова), а травливание меди с незащищенных участков производится на последнем этапе изготовления ПП.

Виды покрытий и их основные характеристики приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Вид покрытий для проводящего рисунка

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

В качестве фотошаблона используется позитивное изображение проводящего рисунка (проводники затемнены).

Последовательность основных операций при позитивном методе изготовления ПП следующая:

1. Заготовка ПП заданного размера из фольгированного диэлектрика.
2. Нанесение фоторезистивного печатного рисунка.
3. Сверление монтажных и переходных отверстий.
4. Химическое меднение поверхности ПП.
5. Гальваническое усиление медного слоя проводников.

6. Нанесение защитного покрытия из металла на проводники.
7. Удаление фоторезиста.
8. Травление печатного рисунка.
9. Пайка выводов и лакирование ПП.

Преимущество позитивного метода заключается в повышении максимальной прочности проводников: диэлектрик, защищенный в процессе ПП медной фольгой, не подвергается воздействию химикатов при травлении и лучше сохраняет свои электрические свойства.

Основным недостатком субтрактивных методов является большая потеря меди (60–80%) при травлении. От этого недостатка свободны аддитивные методы изготовления ПП.

Аддитивные методы изготовления ПП используют следующие способы:

- перенос (наклеивание предварительно выполненных гальваническим способом на временном металлическом основании проводников и контактных площадок на основание ПП);
- создание печатного рисунка с помощью токопроводящей пасты через сетчатый трафарет с последующей термической обработкой;
- создание печатного рисунка с одновременной металлизацией отверстий химическим и гальваническим методом осаждения меди.

Методы изготовления МПП изложены в /4/. Остановимся только на основных методах и их краткой характеристике. МПП представляют собой монолитную плоскую конструкцию, изготовленную из нескольких слоев диэлектрика, каждый из которых имеет свой печатный рисунок. В современных МПП число слоев может достигать 16, но наиболее широко используют 4-слойные МПП, поскольку менее дороги. Монтажные отверстия одновременно служат и элементами электрической связи между слоями проводников.

МПП позволяют резко увеличить число навесных многополюсных элементов, снижают объем монтажного провода, имеют хорошие экранирующие свойства, теплоотвод и защиту электромонтажа от механических и вредных воздействий внешней среды.

Основными методами изготовления МПП являются:

- метод попарного прессования;
- метод послойного наращивания;
- метод открытых контактных площадок и внутренних выводов;
- метод металлизации сквозных отверстий.

Метод попарного прессования наиболее простой и основан на выполнении межслойных соединений по типу изготовления ДПП с металлизированными отверстиями. Затем производится склеивание и прессование

пары заготовок печатными слоями внутрь. На полученной четырехслойной заготовке (как на ДПП) делают наружные рисунки печатных проводников и металлизированные отверстия, соединяющие 1 и 4 слои.

Методы послойного наращивания и открытых контактных площадок более сложны и, в силу ряда недостатков, широко не используются.

Наиболее перспективным является **метод металлизации сквозных отверстий**. Он заключается в склейке необходимого количества слоев диэлектрика с нанесенным на них двухсторонним печатным монтажом. В полученном монолите в местах межслойных контактных площадок сверлят и металлизуют сквозные отверстия. Метод требует особо тщательного соблюдения установленных допусков и технологических режимов.

В качестве оснований МПП служат обычные и фольгированные стеклоэпоксидные диэлектрики. Токопроводящим материалом служит медь, а для покрытий проводников используют золото, никель и оловяно-свинцовые припои. Материалы для изготовления ПП приведены в табл. 7 Приложения.

2.4. Расчет электрических параметров ПП

Размеры элементов ПП влияют на параметр ПП и должны обязательно учитываться при разработке ее конструкции. К таким параметрам относятся: омическое сопротивление проводников, допустимая токовая нагрузка, электрическая емкость, электрическая прочность. Удельное электрическое сопротивление ρ материалов проводников и покрытий приведено в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Удельное электрическое сопротивление ρ материалов проводников и покрытий

Металл	$\rho, 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/см}$
Медная фольга	1,72
Гальваническая медь	2,80
Химическая медь	1,59
Олово	12,0
Серебро	1,59
Золото	2,22
Никель	7,80
Палладий	10,80

При низких частотах и малых временах переключения параметр печатных проводников не оказывает заметного влияния друг на друга и на быстродействие всей схемы в целом.

При увеличении быстродействия схемы большое значение приобретают проблемы ВЧ связей между элементами (паразитная емкость, взаимдуктивность и т.п.).

2.4.1. Постоянный ток в печатном проводнике

Постоянный ток в проводнике распределяется равномерно по всему его сечению. При ширине проводника **a** (мм) и **b** (мкм) сопротивление **R** определяется по формуле

$$R = \frac{\rho \cdot L}{a \cdot b}, \quad (2.1)$$

где ρ – удельное объемное электрическое сопротивление проводника [Ом·мм²/м];

L - длина проводника, мм.

Исходя из допустимого перегрева проводников ПП ($t = 80^\circ \text{C}$), установлена допустимая плотность тока $\gamma_{\text{доп}} = 20 \text{ А/мм}^2$ для медных проводников, полученных гальваническим методом, и $\gamma_{\text{доп}} = 30 \text{ А/мм}^2$ для медных проводников, полученных химическим методом (см табл.2.7).

Расчет на допустимую плотность тока необходимо проводить для узких проводников (**a** < **1 мм**), в которых величина тока **I** > **2А**. При токах меньших **2 А**, ширине проводника **a** > **1 мм** и толщине **b** > **50мкм** расчет можно не проводить.

Падение напряжения на печатном проводнике рассчитывается по формуле

$$\Delta U = \rho \frac{L \cdot I}{a \cdot b}. \quad (2.2)$$

Для приближенных расчетов можно принять, что на **1 см** проводника из гальванической меди шириной **1 мм** и толщиной **50 мкм** теряется около **6 мВ**. Для проводника из химической меди (с теми же параметрами) – до **4 мВ**.

2.4.2. Переменный ток в печатном проводнике

При протекании ВЧ переменного тока в поверхностных слоях проводника возникают эффекты, которые приводят к перераспределению тока по сечению проводника. Его плотность в периферийных областях сечения возрастает, а ближе к центру уменьшается (рисунок 2.8).

$$f_3 > f_2 > f_1$$

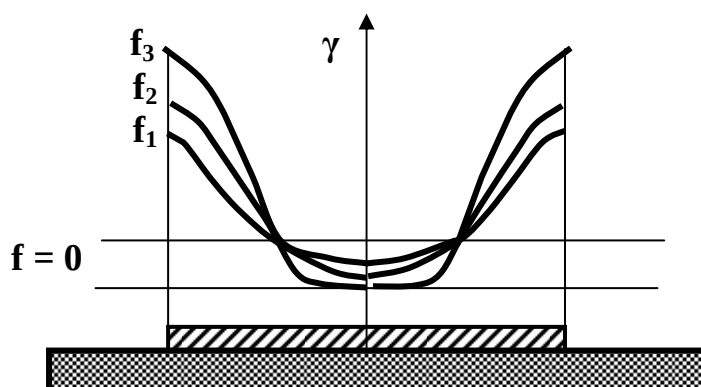


Рисунок 2.8. Зависимость распределения плотности тока по сечению проводника от частоты

Сопротивление в наиболее распространенных ПП плоских медных проводников на ВЧ определяется по выражению

$$R_f = 0,013 \frac{\delta \cdot \sqrt{f} \cdot L}{a \cdot b}, \quad (2.3)$$

где δ – коэффициент концентрации тока на углах сечения проводника;
 f – частота, МГц.

Паразитная емкость между параллельными проводниками $L=100$ мм и расстоянием между ними $S = 2$ мм при диаметре провода 0,1 мм составляет $C_{\text{пар}} = 0,75$ пф, а при диаметре 2 мм – $C_{\text{пар}} = 5$ пф.

Паразитная индуктивность параллельных проводников при $L=50$ мм и $S = 2$ мм – $L_{\text{пар}} = 0,03$ мкГн, а при $L = 200$ мм – $L_{\text{пар}} = 0,17$ мкГн.

2.5. Рекомендации по конструированию ПП

В результате обобщения опыта конструирования ОПП, ДПП и МПП были выработаны следующие правила, которые учитываются при трассировке и конструировании:

- печатные проводники должны быть минимальной длины;
- число пересечений проводников должно быть минимальным;
- прокладка рядом входных и выходных проводников одного каскада не рекомендуется из-за возникновения паразитных связей;
- проводники входных и выходных цепей, связанных в систему для присоединения к разъему, целесообразно разделить экранирующими про-

водниками или шинами с нулевым потенциалом. В этом случае паразитная емкость уменьшится;

- цепи земляных шин, по которым текут суммарные токи, следует выполнять максимальной ширины или в виде сетки. При ширине земляного или экранирующего проводника более 5 мм в металлическом слое следует предусматривать перфорацию во избежание вспучивания фольги при пайке;

- печатный проводник, проходящий между двумя контактными площадками, следует располагать так, чтобы его ось была перпендикулярна линии, соединяющей центр отверстий;

- при ручной трассировке следует выполнять проводники без резких перегибов, острых углов, т.к. это затрудняет технологию изготовления ПП и приводит к отслаиванию при пайке. При машинной разводке допускаются прямые углы;

- на каждой плате рекомендуется предусмотреть не менее 2-х технологических отверстий диаметром $\geq 1,5$ мм, расположенных в узлах координатной сетки по углам плат (для крепления ПП);

- все ЭРЭ желательно располагать с одной стороны ПП по координатной сетке, что позволяет автоматизировать их установку.

3. ТЕПЛОМАССООБМЕН В РЭС

РЭС должны сохранять свои тактико-технические характеристики (ТТХ) в широком диапазоне тепловых воздействий в соответствии с требованиями по условиям эксплуатации (см. раздел 1). Перегрев ЭРЭ и механических узлов составляет для различных случаев от единиц до десятков градусов.

С ростом температуры увеличивается удельное сопротивление металлов. Так, у меди перегрев в 100^0 К приводит к увеличению сопротивления на 40%. У диэлектриков уменьшается сопротивление и пробивное напряжение, возрастает $\text{tg}\delta$ и в большинстве случаев уменьшается диэлектрическая проницаемость.

С повышением температуры полупроводники значительно увеличивают свою проводимость. У конденсаторов растет $\text{tg}\delta$, уменьшается пробивное напряжение, изменяется величина емкости. При отрицательных температурах плохо работают электролитические конденсаторы.

Углеродистые резисторы при повышении температуры уменьшают свое сопротивление, а композиционные резисторы увеличивают. Моточные изделия изменяют свою индуктивность и добротность за счет изменения магнитной проницаемости сердечника, геометрических размеров обмотки и их сопротивления.

При повышении температуры с 20^0 С до 80^0 С интенсивность отказов возрастает у:

- электронно-выпрямительных приборов в 1,5 – 2 раза;
- резисторов в 2 – 3 раза;
- полупроводников в 3 – 4 раза;
- конденсаторов в 6 – 8 раз;
- микросхем в 6 – 10 раз.

Таким образом, учет воздействия тепловых процессов необходим для обеспечения надежного функционирования РЭС.

3.1. Процессы теплообмена в природе

Тепломассообмен – раздел физики, в котором рассматриваются процессы переноса тепла (энергии) и массы (вещества).

Явления теплообмена связаны с необратимым переносом энергии в пространстве за счет разности температур.

Различают три вида переноса энергии:

- теплопроводность;
- конвекция;
- тепловое излучение.

Теплопроводность – молекулярный перенос теплоты в сплошной среде за счет разности температур.

Конвекция – процесс переноса теплоты при перемещении макроскопических объемов жидкости или газа из области повышенной температуры в область с пониженной температурой. При этом перенос тепла неразрывно связан с переносом вещества.

Процесс конвекции сопровождается теплопроводностью. Этот совместный процесс называется конвективным теплообменом.

Тепловое излучение – процесс переноса тепла за счет энергии электромагнитного излучения.

Введем некоторые термины и определения, используемые в тепло-массообмене.

1. Совокупность тел с различными теплофизическими параметрами и явно выраженными границами раздела называются системой тел или неоднородным телом, а каждая часть такой системы – однородным телом. Однородные тела могут быть изотропными и анизотропными.

2. Температурное поле – совокупность числовых значений температур в различных точках системы в данный момент времени. Температурное поле характеризует количественно тепловое состояние тела.

3. Тепловой поток P – количество тепла, переносимое в единицу времени через какую-либо поверхность. Тепловой поток направлен в сторону убывания температуры.

4. Удельный тепловой поток q – плотность теплового потока:

$$q = \frac{P}{S}, \quad (3.1)$$

где S – площадь тела.

Количественная связь между тепловым потоком и градиентом температуры устанавливается законом Фурье (т не зависит от времени, т.е. установившийся режим) [11]:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \left(\frac{dt}{dx} \vec{i} + \frac{dt}{dy} \vec{j} + \frac{dt}{dz} \vec{k} \right), \quad (3.2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/мК, x, y, z – координаты, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы.

Таким образом, удельный тепловой поток прямо пропорционален градиенту температуры. Численные значения λ для различных веществ приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Значения λ для различных веществ

Вещество	λ , Вт/мК
Газы	0,05 – 0,5
Жидкости	0,07 – 0,7
Диэлектрики	0,02 – 3
Металлы	20 - 430

Для материалов, наиболее часто используемых на практике, для расчетов РЭС значения λ приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Значения λ для различных материалов

Материал	λ , Вт/мК	Материал	λ , Вт/мК
Медь	390	Асбест	0,11
Алюминий	210	Оргстекло	0,19
Латунь	105	Слюда	0,45
Серебро	420	Резина	0,15
Железо	74	Стеклотекстолит	0,37 – 0,74
Сталь 20	50	Гетинакс	0,17
Кремний	23,3	Поликор	35

Уравнения для расчета теплового потока P получают интегрированием уравнения (3.2). Для стационарного режима ($t = \text{const}$) необходимо учитывать значения t на границах объекта. Рассмотрим основные методы расчета тепловых режимов для наиболее распространенных случаев.

3.2. Расчет теплового режима плоской пластины

Для плоской пластины (рисунок 3.1) при $t = \text{const}$ и при отсутствии источника тепла внутри стенки тепловой поток за счет процесса теплопроводности определяется:

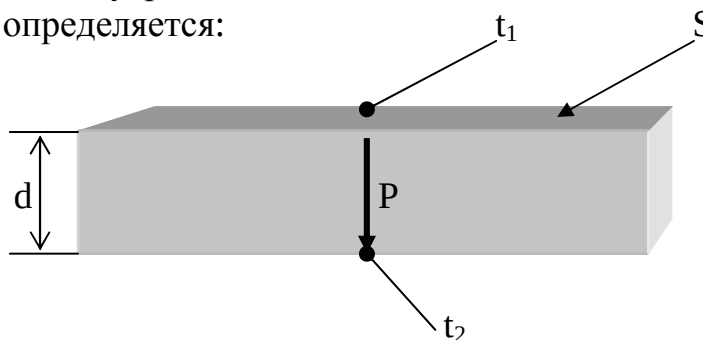


Рисунок 3.1. Тепловой процесс в плоской пластине

$$P_t = \frac{\lambda \cdot S}{d} (t_1 - t_2), \quad (3.3)$$

где t_1 и t_2 – температура на поверхности стенки, град. С;
 d – толщина стенки в направлении, перпендикулярном потоку P , м;
 S – площадь стенки в направлении, параллельном потоку P , м².

3.3. Элементы теории тепловых цепей

Рассмотрим аналогию теплотехнических процессов с электротехническими процессами.

Если под тепловым током I_t будем понимать тепловой поток P_t , а под разностью потенциалов U_t – разность температур $\Delta t = (t_1 - t_2)$, то уравнение (3.3) может быть представлено как "тепловой закон Ома":

$$P_t = \frac{\Delta t}{R_t}, \quad (3.4)$$

где $R_t = \frac{d}{\lambda \cdot S}$ – тепловое сопротивление, К/Вт.

Тогда для тепловой цепи, также как и для электрической цепи, справедливы законы Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа для тепловой цепи звучит следующим образом: **Алгебраическая сумма тепловых потоков P_i в узле тепловой цепи равна 0.**

Второй закон Кирхгофа для тепловой цепи будет звучать следующим образом: **Алгебраическая сумма разностей температур в любом замкнутом контуре тепловой цепи равна 0.**

Таким образом, представляя реальную конструкцию в виде параллельных и последовательных тепловых соединений, можно свести тепловой расчет к расчету тепловых потенциалов схем с помощью известных методов электротехники. Рассмотрим простейшую тепловую цепь, приведенную на рисунке 3.2.

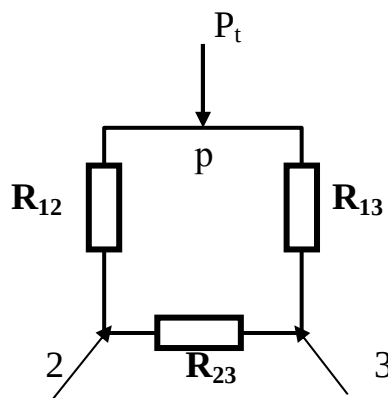


Рисунок 3.2. Схема тепловой цепи

Из рисунка 3.2 следует, что $R = R_{12} + R_{23} + R_{13}$.

Рассмотрим расчет теплового режима на примере крепежного соединения полупроводникового прибора (мощного транзистора) к шасси прибора (рисунок 3.3).

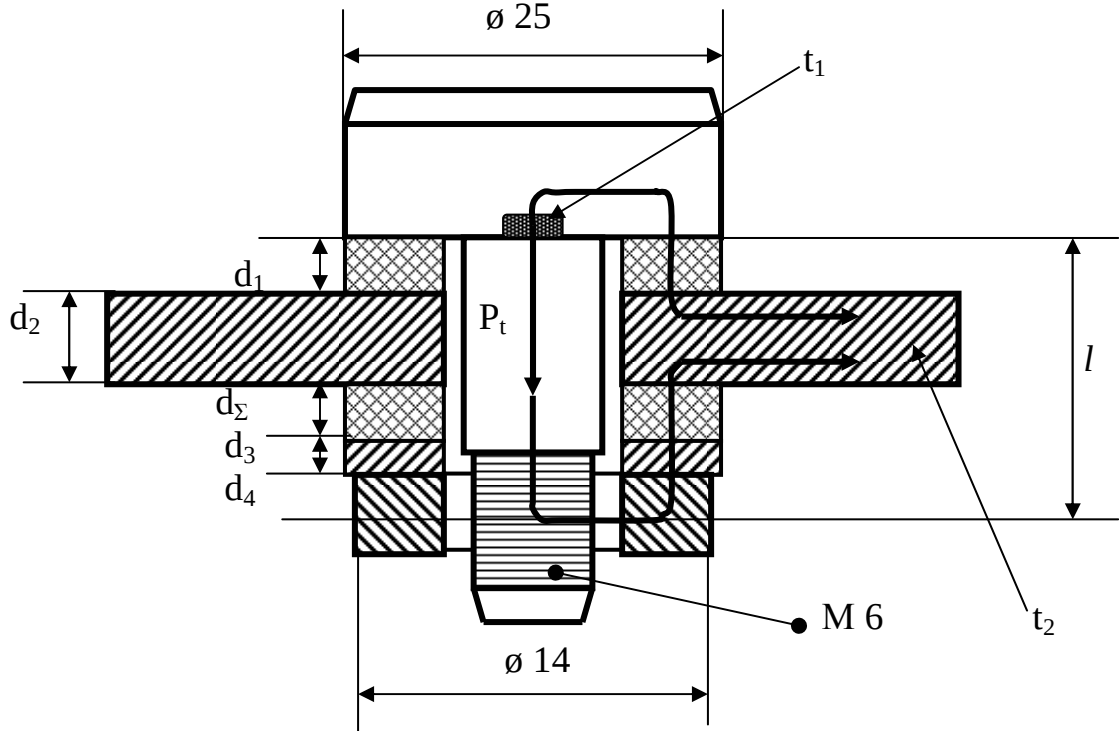


Рисунок 3.3. Схема теплового режима транзистора, закрепленного на шасси прибора

Исходные данные к расчету теплового режима.

Транзистор с диаметром 25 мм, с винтовым исполнением ввода базы (с резьбой М6 и длиной стального болта $l = 26$ мм) закреплен через диэлектрические прокладки (толщиной $d_1 = 0,5$ мм из слюды и $d_3 = 1$ мм из гетинакса) стальной гайкой (диаметром 14 мм) и стальной шайбой (толщина $d_4 = 1$ мм) к корпусу металлического шасси (толщина d_2). Болт отделен от шасси воздушной прослойкой. Напряжение питания транзистора $U = 60$ В, рабочий ток транзистора $I = 5$ А.

Решение. Тепловой поток от кристалла транзистора (нагретая зона полупроводникового элемента - t_1) к шасси поступает двумя путями.

Первый поток идет по пути: переход кристалл-корпус – слюдяная прокладка - шасси.

Второй поток идет по пути: переход кристалл-корпус – болт – гайка – стальная шайба – прокладка из гетинакса – шасси (нулевой потенциал $R = 0$).

Составим тепловую схему этого соединения по следующей схеме (рисунок 3.4).

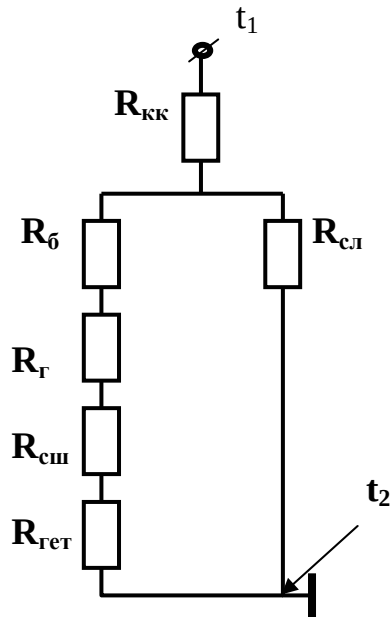


Рисунок 3.4. Эквивалентная схема соединения тепловых сопротивлений соединения

По закону Кирхгофа находим результирующее тепловое сопротивление

$$R_{\Sigma} = R_{кк} + R_{об}, \quad (3.4)$$

где $R_{об}$ – общее сопротивление параллельной цепи.

Подставляя для каждого из сопротивлений параметры в соответствии с формулой 3.4, получим численное значение R_{Σ} .

Для частных случаев тепловое сопротивление цилиндрической стенки (рисунок 3.5а) и полого шара (рисунок 3.5б) определяется выражениями

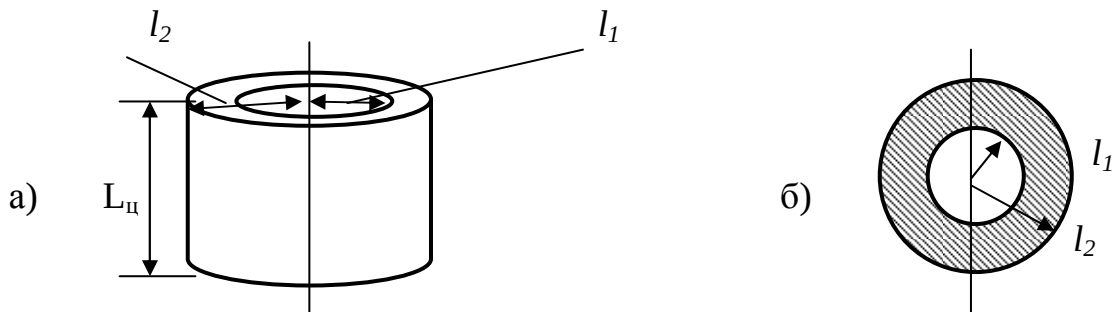


Рисунок 3.5. Тепловое сопротивление полого цилиндра и шара

$$R_y = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda \cdot L_y} \ln \frac{l_2}{l_1}; \quad R_{\text{ш}} = \frac{1}{4\pi \cdot \lambda} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} \right) \quad (3.5)$$

3.4. Конвективный теплообмен

При конвективном теплообмене за счет неоднородности веса различных нагретых зон передача тепла обеспечивается естественным или вынужденным путем. Конвекция присуща как жидкостям, так и газообразным средам. Свойства сред для свободной конвекции и процесс теплоотдачи описывается формулой Ньютона:

$$P_k = \alpha_k S(t_1 - t_2), \quad (3.6)$$

где P_k - тепловой поток, переносимый через поверхность S , когда температура твердого тела, от которого отводится тепло - t_2 , а температура окружающей среды - t_1 ;

α_k - коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м²К.

Таким образом, зная α_k , можно решить задачу передачи тепла конвекцией. Однако этот коэффициент зависит от нескольких физических параметров, описывающих свойства среды.

$$\alpha_k = f(a; \beta; \lambda; \nu; \rho; c_p; g; L; t_1; t_2), \quad (3.7)$$

где a - коэффициент температуропроводности, м²/с:

$$a = \lambda / c_p \rho;$$

β - коэффициент термического расширения среды, 1/К;

λ - коэффициент теплопроводности;

ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

ρ - плотность среды, кг/м³;

c_p - удельная теплоемкость среды, кДж/кг·К;

g - ускорение сил тяжести, м/с²;

L - параметр формы тела.

Значения коэффициента теплопередачи α_k для различных сред приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Значения α_k для различных сред

Среда	α_k , Вт/м ² К	
	Свободная конвекция	Вынужденная конвекция
Газы	2 - 10	10 - 100
Вязкие жидкости (масла)	200 - 300	300 - 1000
Вода	200 - 600	1000 - 3000
Кипение воды	500 - 45 000	
Конденсация капле водяного пара	1000 - 100 000	
Конденсация органических паров	500 - 2000	

Таким образом, мы видим, что на теплопередачу конвекцией влияют около десятка параметров, и это, практически, делает невозможным решение задач теплообмена.

Однако если объединить эти параметры в безразмерные критерии, то теплообмен при естественной конвекции в неограниченном пространстве определяется тремя критериями:

$$\begin{array}{ll}
 1. & Nu = \frac{\alpha_k L}{\lambda} \quad - \text{критерий Нуссельта;} \\
 2. & Gr = \frac{\beta g L^3 (t_1 - t_2)}{\nu^2} \quad - \text{критерий Грасгофа;} \\
 3. & Pr = \frac{\nu}{a} \quad - \text{критерий Прандтля.}
 \end{array} \quad (3.8)$$

Тогда зависимость между критериями будет иметь следующий вид:

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)_m^n, \quad (3.9)$$

где m – индекс, указывающий, что значения физических параметров среды (a ; λ ; β ; ν) берутся для усредненной температуры $t_m = 0,5(t_1 + t_2)$.

Каков же физический смысл критериев?

Критерий Нуссельта (Nu) характеризует соотношение интенсивностей конвективного теплообмена и теплопроводности в пристеночном слое жидкости или газовой среды.

Критерий Грасгофа (Gr) характеризует соотношение подъемной и вязкой сил в потоке жидкости или газа.

Критерий Прандтля (Pr) характеризует физические свойства среды.

Вернемся к выражению (3.9). Для вычислений значения C и n, берутся из таблицы 3.4.

Таблица 3.4. Значения коэффициентов для расчета теплообмена конвекцией

(Gr · Pr)	C	n	Режим движения
$1 \cdot 10^{-3}$	0,5	0	Пленочный
$1 \cdot 10^{-3} - 500$	1,18	1/8	Переход к ламинарному
$500 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	Ламинарный
$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$	0,135	1/3	Турбулентный

При $n = 0$ теплообмен обусловлен в основном теплопроводностью.

При $n = 1/8$ (закон 1/8) теплообмен типичен для среды, омывающей тонкие проводники.

При $n = 1/4$ (закон 1/4) – теплообмен, который имеет место при охлаждении аппаратуры средних размеров.

При $n = 1/3$ (закон 1/3) теплообмен происходит в РЭС больших размеров.

Формула 3.9 была получена на основании обобщенных опытов, проводившихся в различных средах с объектами различной формы и размеров.

Для более простых случаев, широко встречающихся в радиоэлектронике, для воздуха и тел простой формы (плоские, цилиндрические и сферические поверхности) можно использовать более простые формулы.

В случае, если критерий

$$(t_1 - t_2) < \left(\frac{840}{L \cdot 10^{-3}} \right)^3 \quad (3.10)$$

выполняется, то расчет α_k следует проводить по формуле

$$\alpha_k = (1,42 + 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot t_m) N \left(\frac{t_1 - t_2}{L} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (3.11)$$

где N – коэффициент ориентации.

Если неравенство 3.10 не выполняется, то расчет проводят по формуле

$$\alpha_k = (1,67 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot t_m) N \left(t_1 - t_2 \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3.12)$$

Значения параметров L и N берутся из таблицы 3.5.

Таблица 3.5. Значения параметров L и N для расчета теплообмена конвекцией

Поверхность	Определяющий размер, L	Ориентация, N
Шары, горизонтальные цилиндры	Диаметр	1
Вертикальные пластины и цилиндры	Высота	1
Горизонтальные пластины с нагретой поверхностью вверху внизу	Максимальный размер пластины	1,3 0,7

3.4.1. Порядок расчета теплообмена свободной конвекцией с помощью критериев

1. Необходимо определить усредненную температуру t_m .
 2. Найти из справочной литературы значения α ; β ; λ ; ν ; ρ ; c_p .
 3. По значениям коэффициентов найти величину произведения ($Gr \cdot Pr$), по которому из таблицы 3.4 найти значения C и n.
 4. По формуле 3.9 рассчитать критерий Нуссельта и α_k по формуле 3.8 (1) или формулам 3.11-3.12.
 5. По формуле Ньютона найти R_k .
- Значения коэффициентов приведены в таблице 8 Приложения.

3.4.2. Теплообмен при вынужденной конвекции

При вынужденной конвекции вид формул для расчета критерия Нуссельта зависит от числа Рейнольдса

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu}, \quad (3.13)$$

где v – скорость обдува, м/с; L – размер тела в направлении обдува, м.

При вынужденной конвекции значения параметров в критерии Прандтля берутся при *температуре нагрева стенки объекта*, а остальных критериев – *при температуре среды!*

3.4.2.1. Продольный обдув

При продольном обдуве и при ламинарном движении жидкости или газа ($Re < 5 \cdot 10^5$) в диапазоне температур $0 \div 1000^0$ С критерий Нуссельта определяется по выражению

$$Nu = 0,57Re^{0,5}. \quad (3.14)$$

При значении $Re > 5 \cdot 10^5$ критерий Нуссельта рассчитывается по выражению

$$Nu = 0,032Re^{0,8}. \quad (3.15)$$

3.4.2.2. Поперечный обдув

При поперечном обдуве в теплоотдаче важную роль играет форма тела. Определяющим размером L является длина обтекания l' .

Для шара и цилиндра $l' = 0,5\pi d$, а для пластины – $l' = l$. Для пластины размером ($a \times b$), ориентированной под углом к потоку (рисунок 3.6), $l' = a + b$.

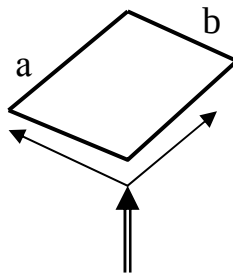


Рисунок 3.6. Направление обдува пластины, ориентированной под углом к потоку

При значении числа Рейнольдса $10 < Re < 10^5$ критерий Нуссельта с точностью до 20% можно определить по формуле

$$Nu = 0,8Re^{0,5}. \quad (3.16)$$

3.4.3. Свободная конвекция в ограниченном пространстве

При передаче тепла за счет теплопроводности и конвекции через ограниченные прослойки (толщина прослойки много меньше ее размеров) тепловой поток рассчитывается по выражению

$$P_k' = kS(t_1 - t_2), \quad (3.17)$$

где t_1 и t_2 – температура нагретой и более холодной границ прослойки;
 k – коэффициент конвективно-кондуктивной теплопередачи.

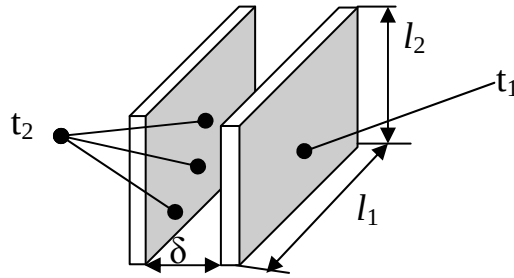


Рисунок 3.7. Ограниченная прослойка

Для воздуха в узких прослойках ($\delta < 5$ мм) при небольших перепадах Δt между поверхностями свободная конвекция отсутствует, и теплота переносится через среду только за счет теплопроводности.

Для прослоек тел простой формы, заполненных жидкостями или газами, можно использовать следующие выражения:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для плоской прослойки} \quad k_{nl} = 0,45 \sqrt[4]{\frac{t_1 - t_2}{\delta}}, \\ \text{для цилиндрической прослойки} \quad k_y = 0,91 \frac{\delta}{d_1 \cdot \ln(d_2/d_1)} \sqrt[4]{\frac{t_1 - t_2}{\delta}}, \end{array} \right\} (3.18)$$

где d_1, d_2 – диаметры цилиндрических тел прослойки.

В ограниченном параллелепипеде

$$k = N \left[6,25 - 5,25 \left(1 + \frac{\delta}{\sqrt{l_1 \cdot l_2}} \right)^{\frac{-5}{3}} \right] B \sqrt[4]{\frac{t_1 - t_2}{\delta}}, \quad (3.19)$$

где $N = 1$ в случае вертикальной ориентации прослойки;

$N = 1/3$ в случае горизонтальной ориентации прослойки, причем нагретая зона расположена снизу.

Значения коэффициента B приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6. Зависимость значений коэффициента B от температуры воздуха

$t_m^0, ^\circ\text{C}$	0	50	100	200
B	0,63	0,58	0,56	0,44

3.4.4. Конвективный теплообмен при давлениях воздуха, отличных от нормального

Выше уже было отмечено, что конвекция зависит от давления газа. Связь между α_k и $\alpha_k(p)$ при $10^2 < p < 10^6$ Па имеет следующий вид:

$$\alpha_k(p) = \alpha_k(P/P_0)^{2n}, \quad (3.20)$$

где n – значение параметра из таблицы 3.4; $n = 0,25$ для прослоек.

В заключении заметим, что на границе раздела твердое тело – жидкость (газ) тепловое сопротивление конвективному переносу тепла имеет вид

$$R_k = \frac{1}{\alpha_k S}, \quad (3.21)$$

т.е. теорией тепловых цепей можно пользоваться и для расчета конвективного тепломассообмена.

3.5. Передача тепла излучением

Законы излучения и поглощения лучистой энергии телами описываются в физике законами Стефана-Больцмана, Планка и Ламберта. Не вдаваясь в подробности анализа получения зависимостей для теплообмена излучением серых тел, запишем уравнение для теплового потока при излучении

$$P_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} S (t_1 - t_2), \quad (3.22)$$

где $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплообмена излучением, Вт/м²К.

Коэффициент $\alpha_{\text{л}}$ является функцией нескольких параметров

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{12} f(t_1, t_2), \quad (3.23)$$

$$\text{где } \varepsilon_{\text{пр}} = \left[1 + \varphi_{12} \left(\frac{1}{\varepsilon_1 - 1} \right) + \varphi_{21} \left(\frac{1}{\varepsilon_2 - 1} \right) \right]^{-1} - \quad (3.24)$$

- приведенная степень черноты пары тел.

$$f(t_1, t_2) = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{T_1^4 - T_2^4}{t_1 - t_2}. \quad (3.25)$$

Эта функция табулирована и приводится в справочниках (можно рассчитать по ф.(3.25)).

φ_{12} – коэффициент облученности, показывающий, какая часть лучистого потока $P_{\text{л}}$, излучаемого 1 телом, попадает на 2 тело (рисунок 3.8).

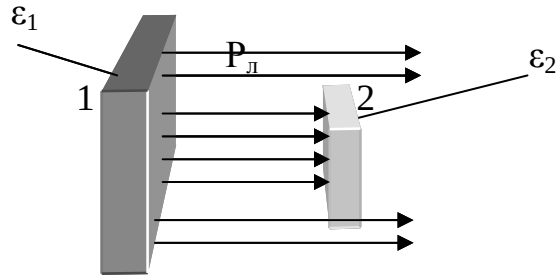


Рисунок 3.8. Передача тепла излучением

Рассмотрим частные случаи.

1. При неограниченных и плоскопараллельных пластинах

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1}; \quad \varphi_1 = \varphi_2 = 1. \quad (3.25)$$

2. Тело 1 находится внутри оболочки 2 тела

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \varphi_{21} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}; \quad \varphi_{12} = 1; \quad \varphi_{21} = S_1/S_2. \quad (3.26)$$

Тепловое сопротивление излучению определяется выражением

$$R_{\text{л}} = \frac{1}{\alpha_{\text{л}} S}. \quad (3.27)$$

В большинстве случаев в инженерных расчетах проще использовать формулу для системы из 2-х тел:

$$P_{\text{л}12} = \sigma_0 \cdot 10^8 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varepsilon_{\text{пр}12} S_{12}, \quad (3.28)$$

где $\sigma_0 = 5,668 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Увеличение степени черноты поверхности позволяет увеличить теплообмен. Численные значения ε приводятся в таблице 10 Приложения.

Полированные поверхности имеют значение ε на порядок меньше, чем у окисленные шероховатые поверхности.

Поверхности чернят с помощью лаков, красителей, химической обработки. Например, поверхность сплава Д-16 имеет степень черноты $\varepsilon = 0,37-0,4$, а при чернении она увеличивается до $0,92-0,94$.

В заключении раздела отметим, что в общем случае тепловая мощность, рассеиваемая РЭС, определяется суммой тепловых мощностей при теплопередаче, конвекции и излучении:

$$P_{\Sigma} = P_t + P_k + P_{\text{л}}. \quad (3.29)$$

3.6. Коэффициентный метод расчета тепловых режимов РЭС

В инженерной практике для расчета перегрева РЭС часто используют коэффициентный метод, что позволяет определить t как на поверхности, так и внутри блока РЭС.

Перегрев поверхности блока РЭС относительно окружающей среды определяется выражением

$$\Delta t = \Delta t_0 \prod_{i=1}^n k_i, \quad (3.30)$$

где $\Delta t = t_s - t_c$ – разность температур поверхности РЭС и среды;

Δt_0 – значение перегрева поверхности для случая, когда величины основных параметров, отвечающих за перегрев, принимают наиболее часто встречающиеся значения при эксплуатации РЭС;

n – число параметров;

k_i – коэффициент, показывающий во сколько раз изменится значение перегрева Δt , если изменится только i -й параметр.

Зная значения этих параметров, можно определить перегрев поверхности блока в герметичном корпусе:

$$\Delta t = v_p \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_s \cdot k_H, \quad (3.31)$$

где $k_t = 1,09 - 0,49 \cdot 10^{-2} t_c$.

Рассмотрим пример расчета герметичного блока РЭС.

Дано: блок имеет размер $L_1 = 0,4$ м; $L_2 = 0,25$ м; $L_3 = 0,2$ м; температура окружающей среды $t_c = 30^\circ \text{C}$; коэффициент черноты поверхности корпуса $\varepsilon = 0,8$; атмосферное давление $H = 760$ мм.рт.ст.; мощность блока $P = 184$ Вт.

Зависимость k_i от i -ых параметров берется из графиков (рисунок 3.9).

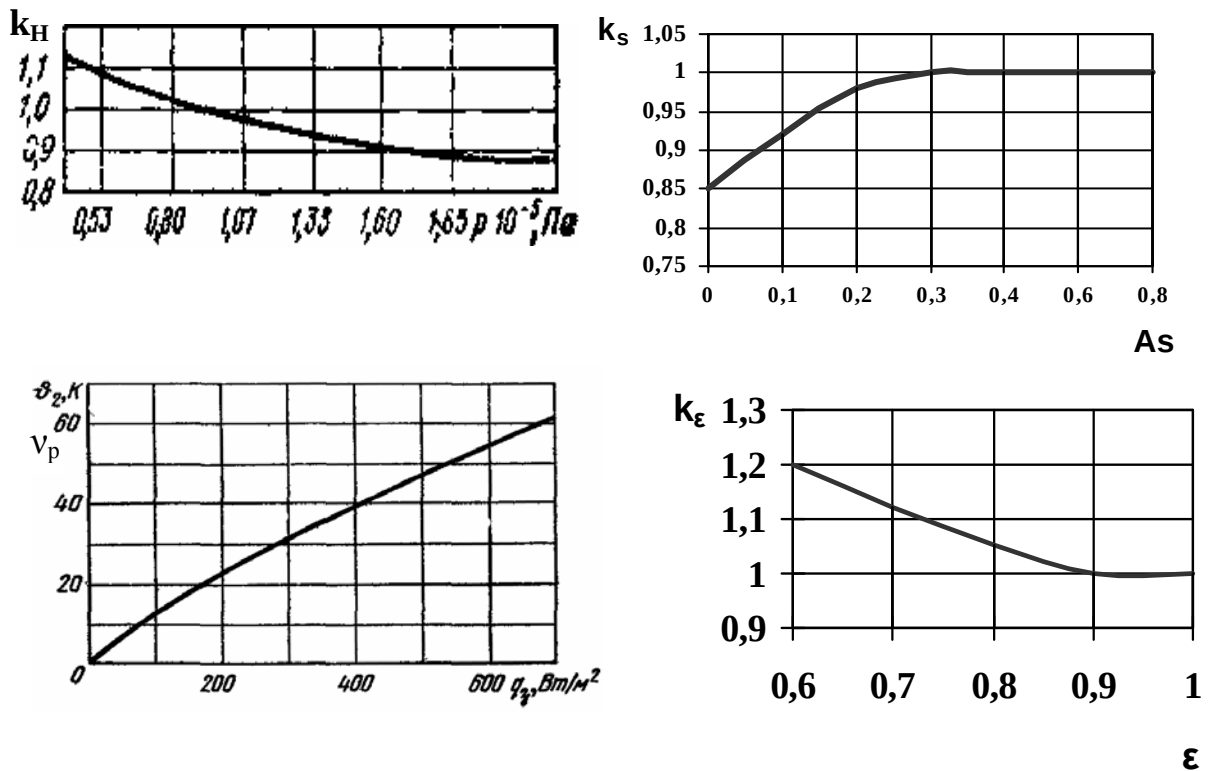


Рисунок 3.9. Значения коэффициентов k_i от i -ых параметров

Расчет температур перегрева блока ведем в следующем порядке:

1. Находим площадь поверхности корпуса:

$$S = 2[L_1 L_2 + L_3(L_1 + L_2)], \quad S = 0,46 \text{ м}^2. \quad (3.32)$$

2. Находим удельную тепловую мощность блока:

$$q = P/S = 400 \text{ Вт/м}^2.$$

3. По графикам (рисунок 3.9) определяем коэффициенты ν_p ; k_t ; k_ε ; k_s ; k_H :

$$\nu_p = 35^0; \quad k_t = 0,95; \quad k_\varepsilon = 1,05; \quad k_s = 1; \quad k_H = 1.$$

4. Подставляем значения в ф.3.31, получим температуру перегрева корпуса относительно температур окружающей среды:

$$\Delta t = 34,91^0 \text{ С}.$$

Этот метод приемлем для общих приближенных расчетов. Для более точных расчетов тепловых режимов применяются методы, которые рассматриваются в следующем разделе.

3.7. Порядок расчета тепловых режимов РЭС в корпусах при естественной конвекции

Расчет тепловых режимов в РЭС невозможен по методам, изложенным выше, поскольку эти методы применимы только для единичных элементов и, как правило, в неограниченном пространстве. В связи с этим рассмотрим методику расчета теплового режима для герметичной конструкции блока РЭС (рисунок 3.10) /12/.

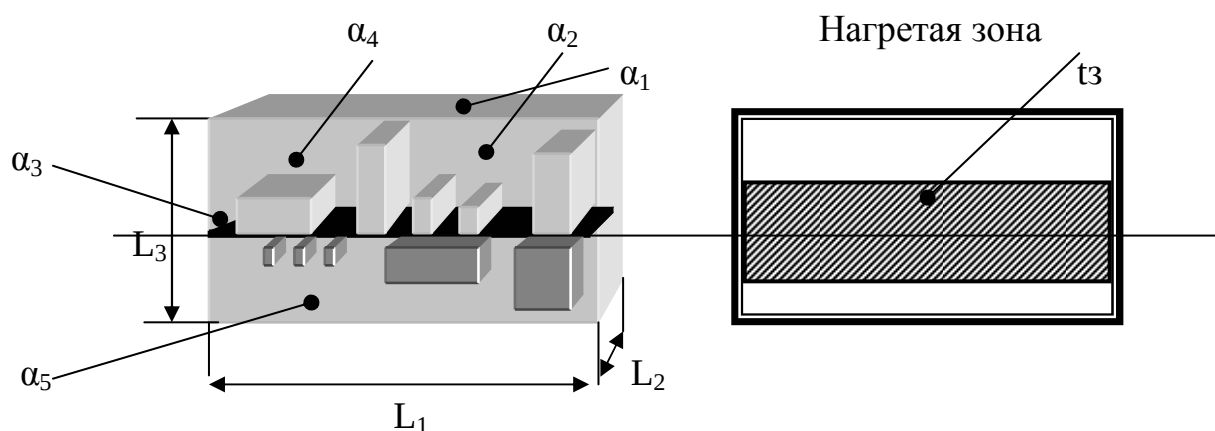
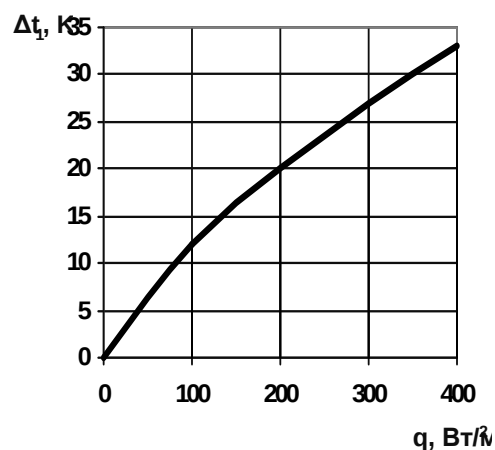


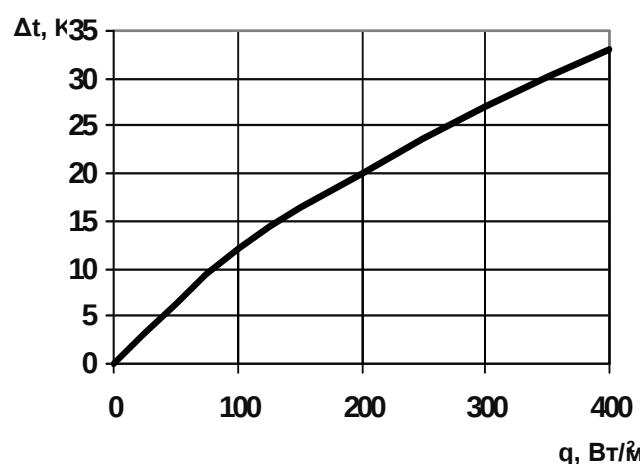
Рисунок 3.10. Схема блока РЭС в герметичном исполнении

3.7.1. Порядок расчета теплового режима блока в герметичном корпусе

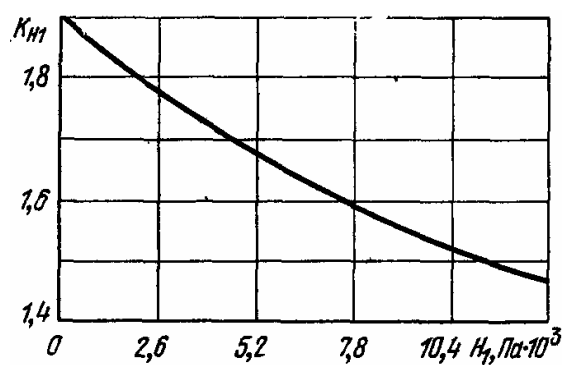
1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по (3.32), где L_1 , L_2 - горизонтальные размеры корпуса блока; L_3 - вертикальный размер корпуса блока (рисунок 3.10).



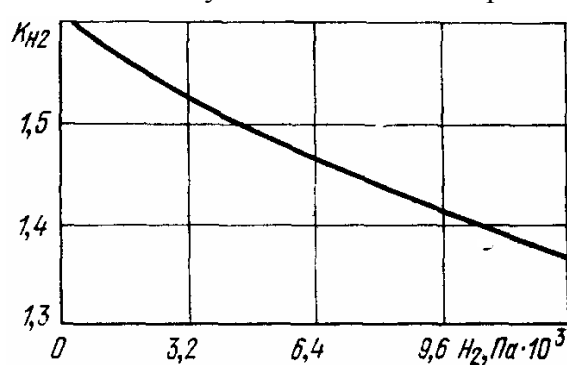
а) Зависимость перегрева от мощности



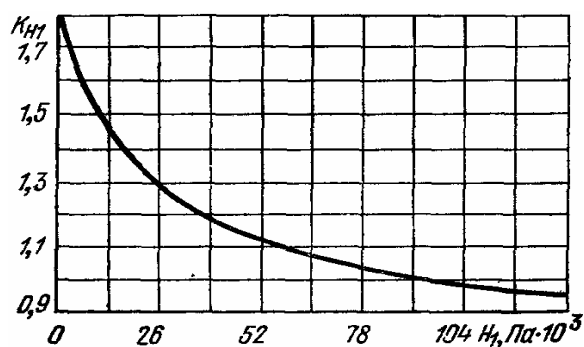
б) Зависимость перегрева нагретой зоны от удельной мощности рассеяния



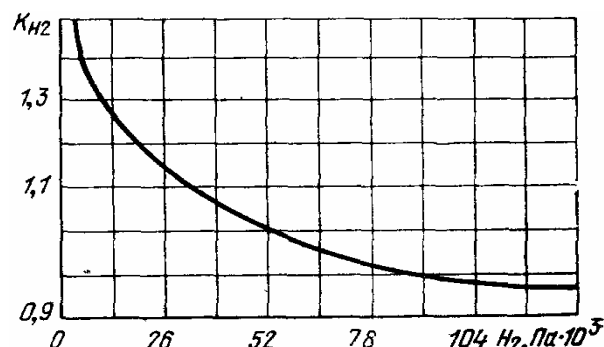
в) $0 \leq H_1 \leq 2,6 \cdot 10^3$ Па



г) $0 \leq H_2 \leq 12,8 \cdot 10^3$ Па



д) $0 \leq H_1 \leq 130 \cdot 10^3$ Па



е) $0 \leq H_2 \leq 130 \cdot 10^3$ Па

Рисунок 3.11. Зависимости параметров теплообмена

2. Определяется условная поверхность нагретой зоны по (3.32).
3. Определяется удельная мощность корпуса блока по (3.1).
4. Рассчитывается удельная мощность нагретой зоны по (3.1).
5. Находится коэффициент Δt_1 в зависимости от удельной мощности корпуса блока (3.11,а).

6. Находится коэффициент Δt_2 в зависимости от удельной мощности нагретой зоны (рисунок 3.11,б).

7. Находится коэффициент K_{H1} в зависимости от давления среды вне корпуса блока H_1 (рисунок 3.11,в, д).

8. Находится коэффициент K_{H2} в зависимости от давления среды внутри корпуса блока H_2 (рисунок 3.11,г, е).

9. Определяется перегрев корпуса блока:

$$\Delta t_k = \Delta t_1 \cdot K_{H1}. \quad (3.33)$$

10. Рассчитывается перегрев нагретой зоны:

$$\Delta t_z = \Delta t_k + (\Delta t_2 - \Delta t_1) K_{H2}. \quad (3.34)$$

11. Определяется средний перегрев воздуха в блоке:

$$\Delta t_b = 0,5(\Delta t_k + \Delta t_z). \quad (3.35)$$

12. Определяется удельная мощность элемента:

$$q_{эл} = P_{эл}/S_{эл}, \quad (3.36)$$

где $P_{эл}$ - мощность, рассеиваемая элементом (узлом), температуру которого требуется определить;

$S_{эл}$ - площадь поверхности элемента вместе с радиатором, омываемая воздухом.

13. Рассчитывается перегрев поверхности элемента:

$$\Delta t_{эл} = \Delta t_3 \left(a + b \frac{q_{эл}}{q_3} \right), \quad (3.37)$$

где $\Delta t_{эл} = P_{эл}/S_{эл}$; $\Delta t_3 = P_3/\sigma_{3с}$; $q_3 = P_3/S_3$ [$\sigma_{3с}$ – тепловая проводимость между нагретой зоной и окружающей средой; $S_{эл}$ – площадь теплоотдающей поверхности элемента (при наличии радиатора учитывается и поверхность радиатора)].

14. Рассчитывается перегрев окружающей элемент среды:

$$\Delta t_{3с} = \Delta t_b \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{эл}}{q_3} \right). \quad (3.38)$$

15. Определяется температура корпуса блока:

$$T_k = \Delta t_1 + T_c, \quad (3.39)$$

где T_c — температура окружающей блок среды.

16. Определяется температура нагретой зоны:

$$T_z = \Delta t_z + T_c. \quad (3.40)$$

17. Находится температура поверхности элемента:

$$T_{эл} = \Delta t_{эл} + T_c. \quad (3.41)$$

18. Находится средняя температура воздуха в блоке:

$$T_b = \Delta t_b + T_c. \quad (3.42)$$

19. Находится температура окружающей элемент среды:

$$T_{эс} = \Delta t_{эс} + T_c. \quad (3.43)$$

Пример. Определить тепловой режим блока в герметичном корпусе и его элементов. Мощность, рассеиваемая в блоке, $P=30$ Вт; мощность, рассеиваемая двумя элементами:

1) $P_{эл1} = 2,8$ Вт; $P_{эл2} = 2,2$ Вт;

2) горизонтальные размеры корпуса блока $L_1 = 0,160$ м, $L_2 = 0,180$ м, вертикальный размер корпуса блока $L_3 = 0,190$ м;

3) Площадь поверхности элементов:

- $S_{эл} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$;
- $S_{эл} = 118 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$;

4) коэффициент заполнения $K_3 = 0,3$;

5) температура окружающей среды $T_c = 293$ К ($+20^\circ\text{C}$);

6) давление окружающей среды $H_1 = H_2 = 0,1$ МПа.

Расчет

1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по ф.3.32:

$$S_k = 2 \cdot [0,160 \cdot 0,180 + (0,160 + 0,180) \cdot 0,190] = 0,187 \text{ м}^2.$$

2. Определяется условная поверхность нагретой зоны по ф.3.32:

$$S_3 = 2 \cdot [0,160 \cdot 0,180 + (0,160 + 0,180) \cdot 0,190 \cdot 0,3] = 0,096 \text{ м}^2.$$

3. Определяется удельная мощность корпуса блока:

$$q_k = 30 / 0,187 = 160 \text{ Вт/м}^2.$$

4. Рассчитывается удельная мощность нагретой зоны:

$$q_3 = 30 / 0,096 = 312 \text{ Вт/м}^2.$$

5. Находится коэффициент в зависимости от удельной мощности корпуса блока (рисунок 3.11,а):

$$\Delta t_1 = 17,5 \text{ К}.$$

6. Находится коэффициент в зависимости от удельной мощности нагретой зоны (рисунок 3.11,б):

$$\Delta t_2 = 33,0 \text{ К}.$$

7. Находится коэффициент, зависящий от атмосферного давления вне корпуса (рисунок 3.11,в, д):

$$K_{н1} = 1,0.$$

8. Находится коэффициент, зависящий от давления внутри корпуса блока (рисунок 3.11,г, е):

$$K_{н2} = 1,0.$$

9. Определяется перегрев корпуса блока по ф.3.33:

$$\Delta t_k = 17,5 \cdot 1,0 = 17,5 \text{ K}.$$

10. Рассчитывается перегрев нагретой зоны по ф.3.34:

$$\Delta t_z = 17,5 + (33 - 17,5) \cdot 1,0 = 33 \text{ K}.$$

11. Определяется средний перегрев воздуха в блоке по ф.3.35:

$$\Delta t_b = 0,5 \cdot (33 + 17,5) = 25,3 \text{ K}.$$

12. Определяется удельная мощность элементов по 3.36:

$$1) q_{эл} = 2,8/8 \cdot 10^{-3} = 350 \text{ Вт/м}^2.$$

$$2) q_{эл} = 2,2/118 \cdot 10^{-3} = 18,6 \text{ Вт/м}^2.$$

13. Рассчитывается перегрев поверхности элементов по ф.3.37:

$$1) \Delta t_{эл} = 33 \cdot (0,75 + 0,25 \cdot 350/312) = 34 \text{ K},$$

$$2) \Delta t_{эл} = 33 \cdot (0,75 + 0,25 \cdot 18,6/312) = 25,2 \text{ K}.$$

14. Рассчитывается перегрев окружающей элементы среды по ф.3.38:

$$1) \Delta t_{эс} = 25,3 \cdot (0,75 + 0,25 \cdot 350/312) = 26,1 \text{ K},$$

$$2) \Delta t_{эл} = 33 \cdot (0,75 + 0,25 \cdot 18,6/312) = 19,3 \text{ K}.$$

15. Определяется температура корпуса блока по ф.3.39:

$$T_k = 17,5 + 293 = 310,5 \text{ K}.$$

16. Определяется температура нагретой зоны по (3.40):

$$T_z = 33 + 293 = 326 \text{ K}.$$

17. Находится температура поверхности элементов по ф.3.41:

$$1) T_{эл} = 34 + 293 = 327 \text{ K},$$

$$2) T_{эл} = 25,2 + 293 = 318 \text{ K}.$$

18. Находится средняя температура воздуха в блоке по ф.3.42:

$$T_b = 25,3 + 293 = 318,2 \text{ K}.$$

19. Находится температура окружающей среды по ф.3.43:

- 1) $T_{эс} = 26,1 + 293 = 319,1 \text{ К}$,
- 2) $T_{эс} = 19,3 + 293 = 312,3 \text{ К}$.

Таковыми же методами /12/ можно рассчитать тепловой режим корпуса любой конструкции, учитывая с помощью параметров конструктивные особенности блока РЭС.

3.8. Системы охлаждения РЭС

Системой охлаждения называется совокупность устройств и элементов, предназначенных для охлаждения РЭС. Системы охлаждения работают в широком диапазоне температур и подразделяются на воздушные, жидкостные, испарительные, кондуктивные и комбинированные. Для обеспечения работы ЭРЭ в среднем диапазоне температур, когда изменение температуры составляет единицы градусов Цельсия, применяют системы термостабилизации.

Более узкий интервал изменения температуры РЭС (доли градусов Цельсия) обеспечивают системы термостатирования. Большинство РЭС имеет воздушное охлаждение благодаря простоте реализации. Но интенсивность теплопередачи при естественном воздушном охлаждении невысокая, и коэффициент теплоотдачи не превышает $10 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Для сравнения в табл.3.7 приведены сведения по интенсивности различных способов теплопередачи.

Увеличение интенсивности теплопередачи при воздушном охлаждении достигают применением радиаторов, позволяющих увеличить поверхность охлаждения, перфорационных отверстий и жалюзи в корпусе РЭС, принудительной вентиляции. Известно много конструкций радиаторов. Наиболее распространенными являются ребристые и игольчатопштыревые радиаторы. Методики их расчета приведены в /11, 12/.

Большой эффективностью, чем воздушные системы охлаждения, обладают жидкостные. Но их конструкции более сложны, а ЭРЭ и узлы требуют специального покрытия и защиты от воздействия теплоносителя (охлаждающей жидкости).

В качестве теплоносителя используются вода и водоспиртовые смеси (антифризы), кремнийорганические и фторорганические жидкости (фреон).

Жидкостное охлаждение может быть естественным и принудительным. Принудительное жидкостное охлаждение используют, как правило, для наиболее теплонагруженных элементов.

Одной из важнейших проблем конструирования жидкостных систем охлаждения является выбор теплоносителя, обладающего необходимыми теплофизическими свойствами.

Таблица 3.7. Интенсивность теплопередачи различных способов охлаждения

Способ теплопередачи	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К)
Естественная конвекция и излучение	2 - 10
Принудительная конвекция в воздухе и парах	10 - 100
Естественная конвекция в масле и других жидкостях той же плотности	200 - 300
Принудительная конвекция в масле и других жидкостях той же плотности	300 - 1000
Естественная конвекция в воде	200-600
Принудительная конвекция в воде	1000 - 3000
Кипение воды	500 - 45000
Капельная конденсация водяных паров	40000 - 120000

Использование теплоносителя в режиме кипения привело к созданию испарительных систем охлаждения, обеспечивающих ещё большую, чем в жидкостных системах, интенсивность теплопередачи (до 120000 Вт/(м²К).

Различные варианты систем охлаждения приведены в /12,13/.

4. ЗАЩИТА РЭС ОТ комплекса внешних ВОЗДЕЙСТВИЙ

4.1. Влияние механических воздействий на надежность РЭС

Бурное развитие авиационной и ракетной техники привело к существенному изменению тактических и эксплуатационных характеристик летательных аппаратов. Возросли мощности двигателей, увеличились скорости полета и маневрирования, усложнились факторы механических, климатических и других видов воздействия. В процессе эксплуатации, транспортировки и хранения изделия могут испытывать те или иные механические воздействия, характеризуемые диапазоном частот колебаний, а также амплитудой, ускорением, временем действия.

Причинами механических воздействий могут быть вибрации движущихся частей двигателя, перегрузки при маневрировании, стартовые перегрузки, воздействие окружающей среды (ветер, волны, снежные лавины, землетрясения, обвалы и т. д.), взрывные воздействия (в том числе, атомные), небрежность обслуживающего персонала (падение аппаратуры) и т.д. /13, 14/.

Стационарная и переносная аппаратура может подвергаться механическим воздействиям при транспортировке, землетрясениях и взрывах (особенно атомных). При перевозке сухопутным транспортом возникают удары, толчки и тряска, особенно во время торможения или маневрирования с большой скоростью по неблагоустроенным дорогам, на подъемах и уклонах. Кроме того, может иметь место вибрация, обусловленная, например, периодическим биением колес поездов о стыки рельс, неровностями и швами на дорогах.

Частота вибраций, обусловленная работой гусеничного движителя танков и бронетранспортеров, достигает сотен и даже тысяч герц. На судовом транспорте ударные механические нагрузки создаются во время шторма при качке судна и сильных ударах штормовой волны о борт корабля. Вибрационные нагрузки на судах обусловлены, главным образом, работой винтов и двигателей, вызывающих вибрацию корпуса и надстроек. Частота и амплитуда вибраций зависят от типа судна, его машинного оборудования и места расположения изделий, однако частота обычно не превышает 150 Гц; для специальных быстроходных судов частота вибраций может достигать 2000 Гц.

Ударные нагрузки в самолетах возникают, главным образом, при посадке. Перегрузка в 10...15g соответствует резкой посадке, а 30g - аварийной. Вибрации имеют место в течение всего полета, и также, как и на судне, они будут разные по силе и частоте в зависимости от типа-самолета и места расположения изделий, но частота этих вибраций, как правило, не превосходит 2000 Гц. В меньшей степени известны ударные вибрационные нагрузки на космических кораблях и спутниках.

По далеко не полным данным зарубежной печати вибрации в некоторых из них имеют диапазон частот от 5 до 2000 Гц с ускорением от 20 до 50g. Повреждения изделий на ракетах и спутниках могут быть также от сильного акустического шума при запуске двигателей, уровень которого, по данным иностранной печати, может превышать 140 дБ. Аппаратура может подвергаться толчкам и ударам вследствие невнимательного отношения обслуживающего персонала и различных случайностей. Так, при падении аппаратуры на бетонный пол с высоты 0,5 м величина ускорения может достигать 550g. Значительные (до 200... 400g) ударные перегрузки возникают при взрывах. Согласно проведенным исследованиям, от 29 до 41% отказов самолетного электронного оборудования были вызваны действием механических нагрузок, число отказов бортовых вычислительных машин вследствие механических воздействий достигает 50%.

4.2. Устойчивость элементов конструкции РЭС к механическим нагрузкам

Качественно все виды механических воздействий можно разделить на вибрации, удары и линейные ускорения. Количественно все перегрузки можно охарактеризовать спектром гармонических частот и стационарностью процесса. Особенностью удара является то, что нагрузка действует небольшое время (неустановившийся процесс) и характеризуется широким спектром частот. В результате механических воздействий возникают перегрузки, определяемые числом n , кратным g (ускорение силы тяжести).

При вибрации

$$n_{\text{вибр}} = \frac{Af^2}{250}, \quad (4.1)$$

где A - амплитуда вибраций, мм; f - частота вибраций, Гц; $n_{\text{вибр}}$ - перегрузка при вибрации, g .

Ориентировочно перегрузка при ударе может быть определена по выражению

$$n_{\text{уд}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot V_{\text{уд}}^2 / S, \quad (4.2)$$

где S - перемещение соударяющихся тел с учетом амортизации, см;

$V_{\text{уд}}$ — мгновенная скорость в момент удара, см/с.

При вращении линейные перегрузки определяются как

$$n_{\text{вр.лин}} = \frac{Rf_{\text{вр}}}{250}, \quad (4.3)$$

где R - радиус вращения, мм; $f_{\text{вр}}$ - частота вращения, Гц.

Устойчивость аппаратуры к механическим воздействиям характеризуется **вибропрочностью, виброустойчивостью и удароустойчивостью**. Вибропрочность связана с транспортировочной вибрацией (аппаратура выключена), а виброустойчивость - с эксплуатационной (аппаратура включена).

Вибропрочностью называется свойство конструкции противостоять разрушающему действию вибрации в заданном диапазоне частот и ускорений и продолжать выполнять свои функции после окончания воздействия вибрации. Для этого не должно происходить силовых и усталостных разрушений, соударений частей конструкции.

Виброустойчивостью называется свойство конструкции выполнять функции при воздействии вибрации и ударов в заданных диапазонах частот и ускорений.

Ударостойкость – способность противостоять возникающим при ударах силам и после их многократного воздействия сохранять тактико-технические характеристики в пределах нормы.

Удар – кратковременный процесс воздействия, длительность которого примерно равна двойному времени распространения ударной волны через объект.

Как правило, обеспечение вибростойкости, виброустойчивости и ударостойкости связано с отсутствием резонанса и люфтов.

Как указывалось, число отказов можно уменьшить следующим образом:

- виброизоляцией аппаратуры с помощью амортизаторов;
- обеспечением механической жесткости и прочности конструкции.

Идея виброизоляции проста: на пути распространения волновой энергии механических колебаний располагается дополнительное приспособление, отражающее или поглощающее определенную часть этой энергии. При этом основные характеристики конструкций должны оставаться неизменными. Последнее требование обычно выступает в виде различных ограничений на механические приспособления по массе, размерам, прочности или по другим физическим параметрам, которые могут измениться вследствие использования указанного приспособления.

При воздействии на амортизированный объект вибраций (ударов), спектр частот которых лежит выше частоты собственных колебаний системы, амортизатор работает как линейный фильтр нижних частот. В этом заключается его отражающее действие.

Поглощение энергии называется **демпфированием**. Оно обусловлено рассеянием энергии в результате трения в материале амортизатора (резины), в сочленениях (сухой демпфер), в среде (воздушный или жидкостный демпфер).

Введение амортизаторов между электронной аппаратурой и объектом установки ослабляет амплитуду передаваемых колебаний, но не уничтожает их полностью. Иногда аппаратуру вообще устанавливают без амортизаторов. В этих случаях надежность работы обеспечивается **жесткостью и прочностью** конструкции.

Жесткость конструкций определяется отношением силы к деформации, вызванной этой силой. Критерием высокой жесткости является

обеспечение собственной резонансной частоты конструкции, по крайней мере, **в три раза большей частоты воздействующих колебаний**.

Например, если резонансная частота отрезка многожильного провода длиной 10 мм составляет 1000-2000 Гц, а элементов диаметром 0,6...1 мм (масса 0,3...12 г) и общей длиной с учетом проволочных выводов, равной 30 мм - 200-450 Гц, то воздействующая частота не должна превышать 70 Гц.

Амортизация является наиболее распространенным средством защиты аппаратуры от вибрации и удара. Однако она имеет ряд особенностей, без учета которых нельзя достичь желаемого эффекта.

Амортизация - система упругих опор, на которые устанавливается объект с целью защиты его от внешних динамических воздействий. Основное свойство таких опор (амортизаторов) заключается в том, что колебания несущей конструкции, возникающие в результате действия внешних вибраций и ударов, передаются аппаратуре через упругий элемент [13, 14].

4.3. Колебания линейной системы с одной степенью свободы

При расчете системы амортизации следует правильно, в соответствии с физическим смыслом, составлять математическое описание движения механической системы в зависимости от ее параметров, действующих сил и начальных условий.

Всякая реальная механическая система представляет сложную совокупность элементов, которая в общем виде не поддается точному теоретическому описанию. Поэтому обычно производят некоторую физико-механическую идеализацию, заменяя реальную систему так называемой эквивалентной системой (моделью), которую можно использовать для достоверного решения поставленных вопросов с заданной точностью.

В самом простом случае амортизируемый объект и поддерживающие его амортизаторы образуют систему, схематически показанную на рисунке 4.1.

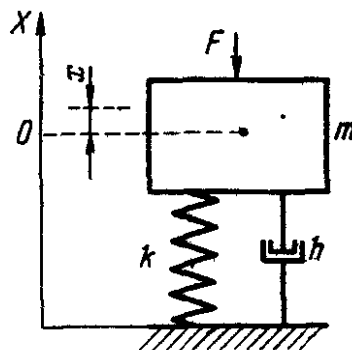


Рисунок 4.1. Колебательная система с инерционным элементом m , спиральной пружиной k и демпфером h , подверженная силовому возмущению F

Такая колебательная система состоит из инерционного элемента, обладающего массой m , установленного на пружине с коэффициентом упругости k и демпфере с коэффициентом демпфирования h , которые закреплены непосредственно на основании.

При исследовании таких систем в простейшем случае вводятся следующие рациональные допущения и условия:

- динамическое воздействие на амортизируемый объект совершается только прямолинейно и вдоль одной из осей координат;
- масса основания настолько больше массы амортизируемого объекта, что обратным влиянием можно пренебречь;
- масса упругого элемента настолько меньше массы амортизируемого объекта, что ею можно пренебречь;
- основание и амортизируемый объект настолько жестки, что их деформациями можно пренебречь;
- масса амортизируемого объекта, коэффициент жесткости и коэффициент демпфирования упругого элемента являются величинами постоянными, не изменяющимися в течение времени;
- сила упругости пропорциональна деформации амортизатора;
- сила сопротивления амортизатора пропорциональна первой степени скорости смещения амортизируемого объекта.

Таким образом, тело массой m может перемещаться в направлении оси X так, что его положение полностью определяется единственной координатой x . Поэтому такая система называется упругой системой с одной степенью свободы.

Если такую механическую систему вывести каким-либо образом из состояния равновесия или сообщить ей некоторую скорость, то под действием инерционных и упругих сил в системе возникнут колебательные движения, которые совершаются без дополнительного действия внешних сил. Такие колебания называются *свободными* (собственными) колебаниями системы. Количественной мерой этих колебаний является частота свободных колебаний f_0 , выраженная в герцах.

Если колебания системы совершаются в результате постоянно действующей внешней силы F , приложенной либо непосредственно к телу массой m , либо к основанию, или в результате постоянно совершаемого движения основания, то такие колебания называют *вынужденными*.

Дифференциальное уравнение движения массы m под воздействием силы F для демпфированной системы:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + Kx = F(t), \quad (4.4)$$

где h — коэффициент демпфирования;

$$K = G/\delta_{cm} \quad (4.5)$$

- статический коэффициент жесткости амортизатора;

δ_{cm} - статическая деформация (прогиб) амортизатора, мм;

G – вес тела, кгс.

Решение этого уравнения (в случае свободного колебания без демпфирования $h=0$) позволяет получить значение собственной резонансной частоты

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

или

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{cm}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Kg}{G}}. \quad (4.6)$$

В случае демпфирования решение уравнения (4.4) зависит от относительного коэффициента затухания

$$D = \frac{h}{h_{кр}}, \quad (4.7)$$

где $h_{кр} = 2\sqrt{Km}$ – коэффициент критического демпфирования.

Учитывая это, можно определить резонансную частоту амортизатора с демпфированием как

$$\omega_h = \sqrt{\frac{\omega_0^2 - h^2}{4m^2}}. \quad (4.8)$$

Качество амортизации характеризуется коэффициентом виброизоляции η , который показывает, во сколько раз амплитуда перемещения объекта x больше или меньше амплитуды A перемещения основания, на котором расположен амортизированный объект:

$$\eta = x/A. \quad (4.9)$$

Другим показателем, характеризующим качество амортизации, является коэффициент эффективности виброизоляции

$$\Xi = (1-\eta)100\%. \quad (4.10)$$

Из рисунка 4.2 можно отметить следующие особенности работы амортизатора с демпфером:

- когда соотношение частот $\gamma = f/f_0$ близко к единице, т.е. выполняется условие $f_0 \approx f$, то наступает резонанс. Однако, из-за нелинейности упругой характеристики амортизатора η ограничено величиной в несколько десятков;
- независимо от значения коэффициента D осуществляется защита от вибрации в области, удаленной от резонансной, когда $\gamma = f/f_0 \sqrt{2}$;
- с увеличением отношения η все кривые стремятся к нулю и эффективность изоляции Ξ увеличится;
- в области частот, где $\gamma = \sqrt{2}$, η уменьшается при ослаблении демпфирования, т. е. затухание колебаний оказывает невыгодное влияние на эффективность виброизоляции;
- амплитуда колебаний в области резонанса уменьшается с увеличением коэффициента D ;

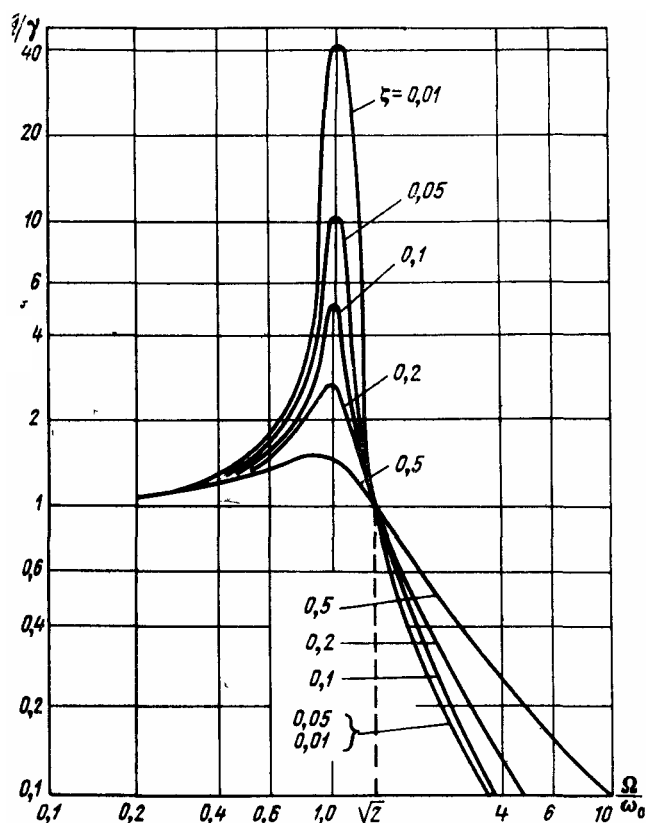


Рисунок 4.2. Характеристика зависимости коэффициента динамичности $1/\gamma$ от отношения частоты вынужденных колебаний к собственной частоте $\eta = \Omega/\omega_0$ при различных значениях относительного коэффициента затухания $\zeta = h/h_{кр}$

- график на рисунке 4.3 построен в относительных безразмерных координатах и поэтому может быть распространен на весь диапазон статических нагрузок (на все частоты собственных колебаний);

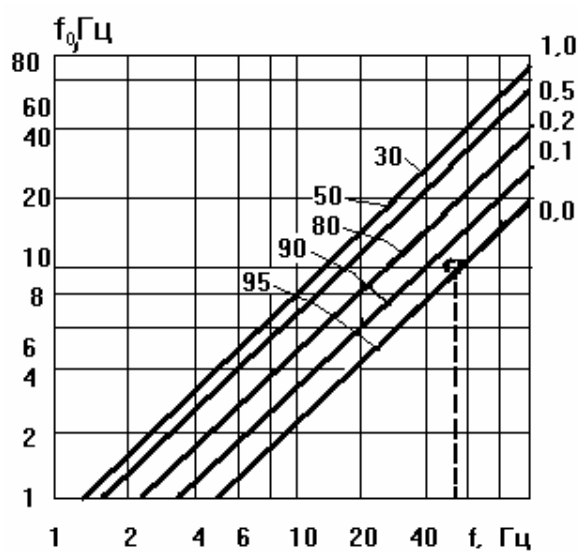


Рисунок 4.3. Номограмма для определения эффективности амортизации (Э) системы в зависимости от величины f и f_0

- с уменьшением частоты собственных колебаний увеличивается эффективность виброизоляции для данной резонансной частоты возмущающих колебаний;

- при $f < f_0$ виброизоляция отсутствует ($\eta = 1$).

Частоты интенсивных вибрационных воздействий объектов обычно находятся в пределах 5...2000 Гц. Поэтому частоты собственных колебаний амортизаторов должны лежать в полосе 1... 3 Гц. Собственная частота серийно выпускаемых приборных амортизаторов 6... 35 Гц, что создает возможность возникновения резонанса в рабочем диапазоне частот.

Коэффициент виброизоляции η или эффективность демпфирования Δ можно определить по номограмме на рисунке 4.3.

Трудность выбора амортизаторов, защищающих одновременно и от вибрации и от удара, обусловлена тем, что при выборе амортизаторов с малой жесткостью (низкой собственной частотой) и ограниченном ходе сильный удар может довести их до упора, в результате удар при резком торможении (малом перемещении соударяющихся частей) может иметь ускорение большее, чем при первоначальном воздействии.

Известно [13], что при воздействии ускорения 150 м/с^2 и длительности импульса 0,05 с для получения $\eta = 0,3$ необходимо обеспечить ход амортизатора в 1,5 м.

Для защиты от вибрации целесообразно использовать амортизаторы с собственной частотой 0,5... 10 Гц, а для защиты от ударов - с собственной частотой 25...50 Гц. Амортизаторы с ограниченным ходом, диапазоном собственных частот 0,5... 50 Гц и линейной характеристикой реализовать практически невозможно.

4.4. Конструкция и параметры амортизаторов

Любые амортизаторы характеризуются **статическими** и **динамическими** характеристиками.

Статической характеристикой называется реакция амортизатора на статическую нагрузку, а **динамической** - зависимость реакции амортизатора от статической нагрузки и скорости перемещения.

Конструкция любого амортизатора должна отвечать следующим требованиям:

- максимальная степень ослабления внешних динамических нагрузок;
- работоспособность в заданных условиях эксплуатации;
- экономичность в изготовлении и эксплуатации;
- минимальные габариты и масса.

Эти требования часто противоречивы, поэтому каждая конкретная конструкция отвечает поставленным требованиям в той или иной степени.

Для виброударозащиты РЭС были разработаны так называемые приборные амортизаторы, которые можно разделить на 3 группы (рисунок 4.4):

1. Резинометаллические (АП, АЧ, АКСС, АМ, АН, АО, АР).
2. Пружинные с демпфированием (АД, АФД, АПН).
3. Металлические (АЦМ, АЦП, лепестковые, тросовые).

Основные типы этих амортизаторов приведены в Приложении на рисунке 2, а их характеристики – в таблице 11.

Амортизаторы резинометаллические (рисунок 2,а–е Приложения). Преимуществами резинометаллических амортизаторов являются простота изготовления и возможность установки под любым углом. К недостаткам относятся:

- сравнительно высокая частота собственных колебаний (11... 33 Гц);
- старение резины под воздействием температуры, солнечных лучей, воздействия агрессивных сред (паров топлива, масел, морской воды), длительного приложения статических нагрузок;
- недостаточное внутреннее демпфирование ($D \sim 0,05$);
- ограниченный температурный диапазон (от - 45 до +50...80°С).

При -30°С амортизаторы из обычной резины начинают затвердевать, упругость их уменьшается на 50%, жесткость возрастает, частота собственных колебаний увеличивается. При температуре -60°С они полностью затвердевают и делаются непригодными для виброизоляции. Однако замена обычных марок резины на силиконовые позволяет расширить температурный диапазон резинометаллических амортизаторов до -55... +150°С.

Амортизаторы пружинные с демпфированием. Если в резинометаллических амортизаторах резиновый массив работает и как упругий элемент и как демпфирующий, то в пружинном амортизаторе эти функции разделены, так как пружина не обладает заметным внутренним трением. Это требует использования дополнительного воздушного демпфера (амортизаторы типа АД, рисунок 2,ж), фрикционного демпфера (амортизаторы типа АФД, АПН, рисунок 2,з) или поролонового демпфера (амортизаторы типа РПП, ППА, рисунок 2,н). В амортизаторах типа АД и АФД использован воздушный демпфер, выполненный в виде резинового баллончика с калиброванным отверстием. Трение, возникающее при проходе воздуха через отверстие, обеспечивает необходимое демпфирование. Минимальный интервал рабочих температур -50... +70°С, максимальный -60... + 150°С. Частота собственных колебаний 8-30 Гц. Особенностью является работа преимущественно с осевой нагрузкой. Относительный коэффициент демпфирования 0,03... 0,25.

Амортизаторы типа АПН с фрикционным демпфером имеют повышенный коэффициент демпфирования. Сила сухого трения в боковом направлении составляет 0,15... 0,25 осевой нагрузки. Амортизаторы работают в температурном диапазоне -60... +150° С, собственная частота находится в пределах 10... 20 Гц.

Значительное демпфирование обеспечивают пружинно-поролоновые амортизаторы типа РПП и ППА. Для РПП коэффициент виброизоляции

составляет 2... 4 при $f = 8...12$ Гц и 0,1 при $f = 100$ Гц. Для ППА $\eta = 6...8$ при 7...9 Гц и $\eta = 0,01$ при $f = 100$ Гц. Амортизаторы работают в температурном диапазоне $-50... +50^{\circ}\text{C}$.

Амортизаторы цельнометаллические полностью изготавливают из металла, что обеспечивает интервал рабочих температур $-50... +150^{\circ}\text{C}$. Амортизаторы хорошо противостоят агрессивным средам, радиации, ударной нагрузке. К цельнометаллическим амортизаторам относятся амортизаторы типа ДК, АЦП, АРМ, АТ. Основными упругими элементами амортизаторов типа ДК (рисунок 2,и) являются две структурные конические детали, скрепленные в виде чечевицы. Упругие элементы изготавливают из проволоки (0,1... 0,2 мм) марки ОВС или аналогичной ей. Заготовкой для упругих элементов является спираль диаметром 1...2 мм из проволоки, навиваемой вплотную, виток к витку. Из спирали делают путанку в виде клубка, которую затем на специальном приспособлении обжимают в форме колокольчика. Амортизаторы ДК имеют нелинейную силовую характеристику, динамическая жесткость является функцией амплитуды колебаний, и приближенно ее можно определить по формуле $K = a/\delta^{0,05}$, где a - коэффициент, характеризующий типоразмер; δ - деформация амортизатора, мм. Показатель затухания - относительный коэффициент затухания $D = 0,4... 0,5$, а коэффициент виброизоляции $\eta = 3,5...4$. Частота собственных колебаний 10...15 Гц.

Цельнометаллический амортизатор АЦП (рисунок 2,к) представляет собой опорную цилиндрическую конструкцию, в которой упругая система выполнена из металлической путанки и дополнительной цилиндрической витой пружины. Цилиндрическая пружина несколько короче структурного элемента, что создает предварительное его поджатие. Частота собственных колебаний 8... 10 Гц, коэффициент виброизоляции η в области резонанса 3,5... 4, но может достигать 6. Амортизатор удовлетворяет эксплуатационным требованиям при максимальном ускорении 15g и длительности ударного импульса 10 мс.

Амортизаторы типа АРМ обладают свойством регулирования резонансной частоты и предназначены для защиты бортовой аппаратуры летательных аппаратов от вибрации. Амортизатор состоит из дюралюминиевого фланца с вкладышами из нержавеющей стали, упругих элементов из остатальной путанки и стяжного болта, обеспечивающего путем регулировки опорных шайб требуемую частоту собственных колебаний. Амортизаторы работают в диапазоне частот 5... 1500 Гц при амплитудах до 25 мм на низких частотах и ускорениях до 30g на высоких частотах. Собственная частота 10... 25 Гц. Коэффициент виброизоляции $\eta \leq 3$ на резонансной частоте.

Тросовый амортизатор (рисунок 2,м) предназначен для защиты от вибраций в диапазоне частот 20... 300 Гц при ускорении до 6g и амплитуде вибраций до 1 мм, от удара при ускорении до 15g и длительности 10 мс. Собственная частота при номинальной нагрузке равна 14... 16 Гц, макси-

мальное значение η не превышает 2. Тросовые амортизаторы обеспечивают защиту от механических перегрузок, действующих во всех направлениях.

Недостатками приборных амортизаторов являются:

- высокая собственная частота (10... 30 Гц);
- линейность статических и динамических характеристик.

Это накладывает ограничение на диапазон изменения статических нагрузок и величину свободного хода амортизатора одного типоразмера, что обусловлено сложностью регулирования сил внутреннего трения таких материалов, как резина, поролон, металл пружины.

4.5. Проектирование систем амортизации РЭС

При проектировании системы амортизации определяют: тип и число амортизаторов, их расположение.

В качестве исходных должны быть известны следующие параметры:

- внешних динамических воздействий;
- окружающей среды;
- кинетические параметры и габариты амортизируемой аппаратуры;
- допустимые значения динамических воздействий на амортизируемую аппаратуру;
- статические и динамические характеристики амортизаторов.

К параметрам внешних воздействий относится перегрузка от вибрационных и ударных воздействий, линейные перегрузки.

К параметрам окружающей среды относятся:

- интервал рабочих температур;
- максимальная относительная влажность;
- атмосферное давление; сроки эксплуатации и хранения амортизаторов в составе аппаратуры;
- условия транспортирования амортизированной аппаратуры;
- радиация (в том числе, световая).

Кинетические параметры и габариты амортизируемой аппаратуры определяют:

- массу и положение центра тяжести аппаратуры;
- моменты инерции и центробежные моменты инерции;
- основные габаритные и присоединительные размеры.

Допустимые динамические воздействия на амортизируемую аппаратуру характеризуются:

- заданным диапазоном частот;
- амплитудой перемещения или ускорения;
- коэффициентом виброизоляции.

Статические и динамические силовые характеристики амортизаторов определяют:

- жесткость амортизатора, характеризующую статические свойства;
- коэффициент виброизоляции, характеризующий динамические свойства.

На практике не все перечисленные параметры необходимы или могут быть известны. Число их зависит и от условий конкретной задачи.

Пример. Произведем расчет амортизации блока радиоэлектронной аппаратуры для следующих исходных данных: масса блока $m = 5,6$ кг; амплитуда колебаний объекта, на котором расположен блок, $A = 0,5$ мм; частота колебаний $f = 30...70$ Гц; допустимая перегрузка на блок $n_{доп} = 8g$.

1. Найдем действующее на объекте ускорение:

$$n_{ниж} = f_{н}^2 A / 250 = 30^2 \cdot 0,5 / 250 = 1,8g$$

$$n_{вер} = f_{в}^2 A / 250 = 70^2 \cdot 0,5 / 250 = 9,8g.$$

2. Определим необходимое значение коэффициента виброизоляции:

$$\eta = n_{доп} / n_{вер} = 0,8 / 9,8 = 0,82.$$

По графику (рисунок 4.1) для $\eta = 0,08$ и $D = 0,05$ находим

$$\gamma = f / f_0 = 3,8.$$

3. Определяем максимальное значение собственной частоты амортизатора для худшего случая (30 Гц):

$$f_0 = f / \gamma = 30 / 3,8 \approx 8 \text{ Гц}.$$

4. Выбираем тип амортизатора.

Для вертикальных колебаний с небольшой амплитудой (1... 2,5 мм) такую собственную частоту могут обеспечить амортизаторы типа АД.

5. Определяем типоразмер амортизатора. При установке моноблока на 4 амортизатора нагрузка, приходящаяся на один амортизатор, составит:

$$T/4 = 5,6/4 = 1,4 \text{ кг}.$$

Выбираем в соответствии с [3] амортизатор типа АД-1,5, рассчитанный на нагрузку 10..15Н (1Н = 0,1 кгс).

При конструировании системы амортизации необходимо учитывать ряд соображений. При одновременном воздействии значительных ударных нагрузок и вибраций целесообразно использовать пневматические амортизаторы. При расположении амортизаторов надо стремиться, чтобы координаты центра тяжести объекта по возможности совпадали с координатами

центра жесткости системы амортизации. Так как амортизаторы имеют некоторый технологический разброс по жесткости или если в системе имеются амортизаторы различных типоразмеров, то необходимо предусмотреть прокладки, служащие для выравнивания системы. В пространственных системах амортизации можно использовать лишь некоторые типы амортизаторов, например АПН, допускающие действие статической нагрузки под любым углом к оси амортизатора.

Схемы расположения амортизаторов относительно центра тяжести аппаратуры могут быть самыми разнообразными (рисунок 4.4) /14/.

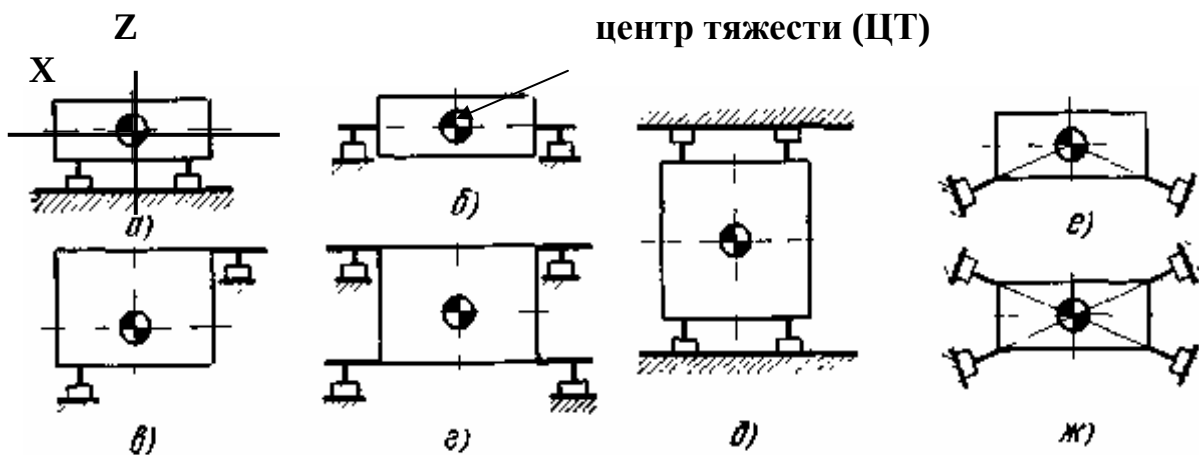


Рисунок 4.4. Схемы монтажа амортизаторов:

а - нижний монтаж; *б* - монтаж в плоскости центра тяжести; *в* - монтаж в диагональной плоскости, проходящей через центр тяжести, *г* - монтаж в двух горизонтальных плоскостях; *д* - двусторонний монтаж; *е* - монтаж под углом, односторонний; *ж* - монтаж под углом, двусторонний

Каждая схема имеет свои преимущества и недостатки. Схема на рисунке 4.4,а чаще всего используется для амортизации при воздействии вибрации. Это наиболее простая схема, и ее часто выбирают по привычке без учета недостатков. Наиболее существенный из них состоит в том, что при боковых нагрузках следует предусматривать достаточный зазор между амортизируемым блоком и смежными конструкциями, чтобы избежать соударения. Такие же последствия вызывает несовпадение центра тяжести системы амортизации с центром жесткости аппаратуры. Поэтому эта схема применяется в обычной самолетной аппаратуре.

Схему, представленную на рисунке 4.4,б, целесообразно использовать в условиях пространственного нагружения на реактивных самолетах и ракетах. В этой схеме амортизаторы расположены в плоскости, проходящей через центр тяжести защищаемого объекта. Такая схема позволяет уменьшить колебания по горизонтальным осям распределением колебаний в соответствии с осями симметрии. Наиболее выгодное расположение амортизаторов такое, при котором расстояние от центра тяжести блока равно радиусу

инерции, однако это не всегда удастся, так как связано с увеличением габаритов. Амортизаторы не обязательно располагать в горизонтальной плоскости, проходящей через центр тяжести аппаратуры. Эффективность их не ухудшается при установке на наклонной плоскости, проходящей через центр тяжести на расстояниях, равных радиусу инерции (рисунок 4.4,е). Габариты такого монтажа больше, но также больше и устойчивость системы амортизации.

Монтаж амортизаторов в двух горизонтальных плоскостях (рисунок 4.4,г) обычно используется при защите блоков, у которых отношение высоты к ширине больше двух. Установка амортизаторов в верхней плоскости обеспечивает дополнительные точки опоры. Если амортизаторы расположены несимметрично относительно центра тяжести, то все режимы собственных колебаний будут связаны.

Двусторонняя схема монтажа (рисунок 4.4,д) обеспечивает более полную защиту от действующих сил. Амортизаторы предварительно нагружены, что делает систему более жесткой, т.е. сдвигает ее собственную частоту в область более высоких частот.

Схема монтажа амортизаторов под углом к осям симметрии блока (рисунок 4.4,е) является наиболее пригодной для исключения пространственных вибраций, но вместе с тем она и наиболее сложная, так как при небольшом нарушении симметрии в системе возникают все шесть связанных видов собственных колебаний. Если центр жесткости совпадает с центром тяжести блока, то все действующие силы будут уравновешены, вращательные колебания будут невелики. Этому условию удовлетворяет схема монтажа амортизаторов, расположенных, под углом внизу и сверху блока (рисунок 4.4,ж). Поскольку характеристики системы амортизации во всех положениях амортизируемого блока одинаковы, то характер, движения объекта установки может быть любым.

Унификация массы, габаритных и присоединительных размеров блоков электронной аппаратуры позволяет использовать стандартные амортизационные основания (рисунок 4.5), удобство применения которых заключается в том, что они могут быть разработаны и изготовлены организациями, специально занимающимися вопросами амортизации.

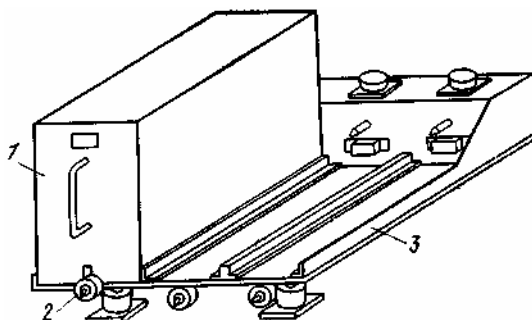


Рисунок 4.5. Амортизационное основание
1 - блок; 2 - элемент крепления блока; 3 - амортизационная рама

Для быстрой повторной установки аппаратуры или ее замены в основании предусмотрены направляющие и зажимы.

При разработке амортизационных оснований следует учитывать как условия эксплуатации аппаратуры, так и характеристики амортизаторов. Конструкция оснований должна быть такой, чтобы можно было использовать амортизаторы различных типоразмеров, рассчитанные на широкий диапазон номинальных нагрузок.

Для аппаратуры, устанавливаемой на спутниках и ракетах, иногда амортизаторы не используют, а устойчивость к механическим воздействиям обеспечивается механической прочностью и жесткостью конструкции. Это объясняется тем, что нагрузки настолько велики, что амортизаторы в этих условиях неработоспособны.

4.6. Расчет резонансной частоты ПП

При проектировании конструкций РЭС для обеспечения требуемой надежности всегда необходимо рассчитывать в первую очередь резонансную частоту ПП как основного элемента РЭС.

Резонансная частота ПП определяется по формуле /2/:

$$f_p = \frac{K}{4\pi \cdot l^2} \sqrt{\frac{Eh^3 g}{3W}} \quad [\text{Гц}], \quad (4.11)$$

где K – коэффициент, зависящий от метода крепления ПП (например, для консольного крепления ПП $K = 3,5$, а для двухстороннего крепления $K = 22,37$. Для других способов крепления ПП данные приведены в /2/);

l – размер ПП, см;

E – модуль упругости материала ПП, кГ/см²;

h – толщина ПП, см;

W – масса единицы площади ПП с элементами кГ/см²;

g – ускорение свободного падения, см/с².

4.7. Расчет системы амортизации

Расчет системы амортизации проводят в три этапа:

1. Статический расчет.
2. Расчет на вибрационную нагрузку.
3. Расчет на ударную нагрузку.

На первом этапе определяют статическую нагрузку на каждый амортизатор и выбирают тип амортизатора.

На втором этапе определяют частоты собственных колебаний блока РЭС и коэффициент динамичности.

На третьем этапе вычисляют максимальное ускорение при ударе и оценивают эффективность защиты РЭС от вибраций и ударов.

4.7.1. Статический расчет системы амортизации

Цель расчета состоит в определении статических нагрузок на каждом амортизаторе, что позволяет в дальнейшем выбирать их конкретные типоразмеры /13/.

Схемы статического нагружения амортизаторов в зависимости от выбранной схемы их монтажа и условий эксплуатации могут быть **однонаправленными** или **пространственными**. К однонаправленным системам нагружения относят такие, в которых реакция всех амортизаторов направлена параллельно линии действия статической нагрузки (рисунок 4.4,а-д).

Если число амортизаторов в системе $n > 3$, схема нагружения является статически неопределимой, и к трем уравнениям статики должно быть добавлено $n-3$ дополнительных условий. В частности, для наиболее распространенной схемы монтажа блока на четырех амортизаторах (рисунок 4.4,а) статические нагрузки на амортизаторы P_i находят из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n P_i &= mg; \\ \sum_{i=1}^n P_i x_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^n P_i y_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^n P_i x_i y_i &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

где x_i, y_i - известные координаты точек крепления амортизаторов относительно ЦТ блока.

В системе уравнений (4.12) первые три - уравнения статики, а последнее - дополнительное условие (одно из условий симметричности системы амортизации относительно двух вертикальных плоскостей XOZ и YOZ).

После определения величин нагрузок выбирают конкретные типоразмеры амортизаторов с учетом допустимых нагрузок или с учетом выполнения условия $P_i = (0,7-1,3)P_{\text{ном}}$, где $P_{\text{ном}}$ - номинальное значение оптимальной статической нагрузки для данного типоразмера амортизатора.

Величины статических прогибов амортизаторов ξ_{cti} можно определить либо по их силовым (статическим) характеристикам, либо приближенно по формуле

$$\xi_{\text{cti}} = \frac{P_i}{K_i}, \quad (4.13)$$

где K_i - жесткость амортизатора в направлении статической нагрузки.

Статические прогибы амортизаторов могут оказаться различными. При этом следует помнить, что реакции амортизаторов совпадают с расчетными только при выравнивании системы в положение статического равновесия (т.е. при отсутствия перекосов). Выравнивание достигается введением в конструкцию компенсирующих прокладок. Толщина прокладок определяется следующим образом:

$$\Delta i = \xi_{\text{cti}} - \xi_{\text{ctmin}}, \quad (4.14)$$

где ξ_{cti} - статический прогиб i -го амортизатора;

ξ_{ctmin} - статический прогиб наименее деформированного амортизатора системы.

В отдельных случаях применяют пространственные схемы статического нагружения амортизаторов (рисунок 4.4,е-ж). В частности, схема рисунка 4.4,е характерна для морских РЭС, а схема рисунка 4.4,ж - для бортовой аппаратуры.

Условия однонаправленности схем рисунка 4.4,а-д могут быть нарушены при действии линейных ускорений, а также при дополнительных низкочастотных воздействиях, связанных с перемещением объекта, на котором установлена аппаратура (качка корабля, вираж самолета).

Если на защищенный блок в течение длительного времени предполагается воздействие линейного ускорения, то при расчетах к вектору силы тяжести P необходимо добавить вектор силы инерции

$$P_{\text{л}} = mW_{\text{л}}, \quad (4.15)$$

где $W_{\text{л}}$ - вектор постоянной составляющей ускорения.

В зависимости от направления действия силы инерции результирующая статическая нагрузка может увеличиваться, уменьшаться либо изменять свое направление.

4.7.2. Динамический расчет системы амортизации на воздействие вибраций

В большинстве случаев система амортизации может быть представлена в виде системы с одной степенью свободы (как правило, по вертикальной оси Z). При этом собственная частота блока на амортизаторах определяется по формуле 4.6, где вместо жесткости K подставляется суммарная жесткость амортизаторов K_{Σ} по оси Z .

При рациональном выборе равночастотных амортизаторов проводить расчет собственной частоты системы амортизации не требуется. За f_0 в последующих расчетах принимается собственная частота таких амортизаторов при номинальной нагрузке, которая указывается в справочниках.

Если для выбранных амортизаторов известен коэффициент демпфирования h или коэффициент динамичности при резонансе, то по графику (рисунок 4.2) нетрудно определить значение коэффициента динамичности, а затем и амплитуду колебаний блока при заданной частоте и амплитуде возбуждающих колебаний. При необходимости может быть построен график зависимости амплитуды колебаний блока от частоты возбуждающих колебаний.

4.7.3. Динамический расчет системы амортизации на воздействие ударов

Степень защиты амортизированной аппаратуры от ударных воздействий оценивают с помощью коэффициента амортизации удара:

$$\eta_{y\partial} = \frac{W_{y\partial}}{W_{y\partial 0}}, \quad (4.16)$$

где $W_{y\partial}$ - амплитуда ускорения на блоке РЭС под действием удара;

$W_{y\partial 0}$ - амплитуда импульса ударного ускорения, действующего на амортизированную систему со стороны объекта установки.

Нагрузки, передаваемые на блок, можно оценить в ходе динамического расчета по графикам (рисунок 4.2).

Пусть необходимо определить максимальное ускорение блока при воздействии со стороны объекта установки прямоугольного импульса амплитудой $W_{y\partial 0} = 10g$ и длительностью $t_u = 0,01$ с, если система амортизации блока имеет собственную частоту в направлении удара $f_0 = 10$ Гц. Коэффициент демпфирования примененных амортизаторов $h = 0,2$.

Вычислив предварительно

$$\gamma = \frac{1}{2t_u f_0} = 5$$

по кривой, соответствующей $h = 0,2$ на графике (рисунок 4.2) находим значение коэффициента амортизации удара $\eta_{y\partial} = 0,5$ и далее:

$$W_{y\partial} = \eta_{y\partial} \cdot W_{y\partial 0} = 0,5 \cdot 10g = 5g.$$

Для отдельных типов амортизаторов имеются силовые ударные характеристики и характеристики ударной энергоемкости. Это, соответственно, зависимость силовой реакции амортизатора $F(\xi)$ и зависимость потенциальной энергии, накапливаемой амортизатором $\Pi(\xi)$, от его дефор-

мации ξ при ударе относительно номинального статического нагружения (рисунок 4.2, 4.3).

Если известны силовые ударные характеристики и характеристики ударной энергоемкости используемых амортизаторов, динамический расчет системы амортизации на воздействие ударов может быть проведен по приведенной ниже методике. В ней сделаны следующие допущения:

1) во время действия ударного импульса блок неподвижен, упругие моменты амортизаторов деформируются, накапливая энергию;

2) в течение ударного импульса блок получает приращение скорости ΔV относительно основания (объекта установки РЭС). Соответствующее приращение кинетической энергии ΔE движения блока относительно основания полностью превращается в потенциальную энергию $\Pi(\xi_{\max})$ при деформации $\xi_{\max}$ упругих элементов амортизаторов;

3) перемещение основания и, следовательно, деформация амортизаторов $\Delta \xi$ за время действия импульса t_u невелики, так что выполняется условие $\Pi(\Delta \xi) / \Delta E \leq 0,2$ (это справедливо для относительно коротких ударных импульсов с большой амплитудой ускорения);

4) потенциальная энергия амортизаторов полностью переходит в энергию затухающих колебаний амортизированного блока по окончании ударного импульса, при этом максимальной энергии соответствует максимальное ускорение блока в результате удара.

Расчет рекомендуется производить в такой последовательности:

1. Построить графики суммарной силовой ударной характеристики $F(\xi)$ и характеристики суммарной энергоемкости $\Pi(\xi)$ в направлении удара. Обычно расчет ведется для главной (вертикальной) оси **Z** амортизаторов, при этом:

$$F(\xi) = \sum_{i=1}^n F_{zi}(\xi); \quad \Pi(\xi) = \sum_{i=1}^n \Pi_{zi}(\xi),$$

где n - число амортизаторов в системе;

$F_{zi}(\xi)$ - силовая ударная характеристика i -го амортизатора системы по указанной оси;

$\Pi_{zi}(\xi)$ - характеристика ударной энергоемкости i -го амортизатора по той же оси.

2. Определить приращение скорости основания за время действия ударного импульса:

$$\Delta V = \int_0^{t_u} W(t) dt,$$

где $W(t)$ - аналитическое выражение для соответствующей формы ударного импульса; t_u - длительность ударного импульса.

3. Определить величину приращения кинетической энергии блока при ударе:

$$\Delta E = 0,5m(\Delta V)^2.$$

4. Исходя из предположения полного превращения кинетической энергии движения блока относительно основания в потенциальную энергию амортизаторов $\Delta E = \Pi(\xi_{\max})$, по характеристике суммарной энергоемкости определить величину максимальной деформации амортизаторов $\xi_{\max}$ соответствующую $\Pi(\xi_{\max})$.

5. По суммарной силовой ударной характеристике системы определить силовую реакцию амортизаторов $F_{\max}$, соответствующую найденному ранее значению максимальной деформации $\xi_{\max}$.

6. Определить значение максимального ускорения блока при ударе:

$$W_{\max} = F_{\max}/m.$$

4.8. Защита РЭС от влаги

4.8.1. Влияние влаги на надежность РЭС

В процессе производства, хранения и эксплуатации РЭС его узлы и элементы могут подвергаться воздействию различных факторов: влаги, агрессивных химических и биологических сред, пыли и т. д.

Влага имеет высокую проникающую способность (размер молекулы воды 25 нм), высокую химическую активность, диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 81$) и электропроводность (при наличии ионизированных примесей). Обычно защита от влаги является защитой и от других факторов: пыли, грибков, агрессивных сред и т.д., а также от некоторых механических воздействий.

Влияние влаги может привести к параметрическим и внезапным отказам, снижению эффективности и ухудшению качества аппаратуры. К воздействию влаги наиболее чувствительны элементы и структуры ИС.

Наличие влаги на поверхности тонкопленочных пассивных элементов может привести к электролитической или химической коррозии, образованию закорачивающих перемычек, увеличению диэлектрической проницаемости, потерь и утечек в диэлектриках.

Наличие влаги на поверхности полупроводниковых бескорпусных компонентов ИС (транзисторов, диодов, фрагментов – "чипов") может привести к сорбции влаги поверхностью, скоплению положительных зарядов (Na^+ и др.) на границе Si-SiO₂, образованию слоя накопления зарядов в полупроводнике под влиянием поверхностных ионов.

Воздействие влаги приводит к следующим видам отказов компонентов РЭС:

- резисторы - постепенное увеличение или уменьшение номинального значения вплоть до обрыва или короткого замыкания, увеличение уровня шумов;

- конденсаторы - увеличение сопротивления в цепи обкладок или обрыв; рост емкости, потерь, утечек; появление коротких замыканий обкладок; уменьшение пробивного напряжения;

- контакты и металлизация - обрыв, короткое замыкание, увеличение паразитных связей.

В результате этих изменений может уменьшиться параметрическая надежность или увеличиться интенсивность внезапных отказов. Уменьшение параметрической надежности обусловлено искажением сигналов до уровня, при котором нормальное функционирование РЭС становится невозможным. Увеличение интенсивности внезапных отказов уменьшает среднее время наработки аппаратуры на отказ и увеличивает стоимость ее эксплуатации.

Воздействие влаги на конструкционные материалы (металлы и диэлектрики) также может привести к снижению надежности. Механизм действия влаги на органические и неорганические материалы различен. Органические материалы склонны к поглощению влаги через капилляры или путем диффузии. Неорганические материалы взаимодействуют с влагой, конденсирующейся или адсорбируемой на поверхности. Это обуславливает различные последствия взаимодействия влаги с органическими и неорганическими материалами.

Воздействие влаги на органические материалы сопровождается следующими явлениями: увеличением диэлектрической проницаемости ϵ и потерь $\operatorname{tg}\delta$; уменьшением объемного сопротивления, электрической и механической прочности; изменением геометрических размеров вследствие набухания.

Воздействие влаги на металлы, которые относятся к неорганическим материалам, сопровождается следующими явлениями, связанными с коррозией:

- разрушением паяных и сварных швов, что нарушает герметизацию и снижает механическую прочность;
- обрывом электромонтажных связей;
- увеличением сопротивления контактных пар, что ведет к увеличению шумов неразъемных и обгоранию разъемных контактов;
- уменьшением прочности и затруднением разборки крепежа, потускнением отражающих и разрушением защитных покрытий.

В результате воздействия влаги на материалы конструкции могут измениться параметры узлов; уменьшается добротность индуктивности вследствие увеличения собственной емкости и потерь в диэлектрике; увеличивается уровень перекрестных помех, снижается (в 100... 1000 раз) сопротивление изоляции электромонтажа, увеличивается переходное сопротивление разъемных и неразъемных контактов.

Абсолютная влажность (объемная концентрация водяных паров в воздухе, г/м³). Максимально возможная абсолютная влажность, при кото-

рой происходит конденсация водяного пара, называется **критической абсолютной влажностью** ($C_{кр}$). $C_{кр}$ зависит от температуры воздуха и его давления. Мерой абсолютной влажности является точка росы.

Отношение

$$C/C_{кр} = \varphi [\%] \quad (4.17)$$

при одной и той же температуре называется **относительной влажностью воздуха**. Нормальной считается $\varphi = 45-80\%$ при $t \leq 30^0 \text{ C}$.

Рассмотрим еще некоторые термины и определения, связанные с влагозащитой.

Адсорбция – поглощение влаги поверхностью вещества.

Абсорбция – поглощение влаги объемом вещества.

Сорбция – одновременное поглощение влаги объемом и поверхностью вещества.

Десорбция – обратный процесс сорбции.

При адсорбции резко снижается удельное поверхностное сопротивление диэлектриков ρ_s , увеличивается удельная емкость конденсаторов, снижается пробивное напряжение.

При абсорбции, наряду с вышеперечисленными свойствами, добавляется резкое изменение объемного сопротивления диэлектриков, что приводит к еще большему увеличению потерь и уменьшению пробивного напряжения. Кроме ухудшения электрических параметров, наблюдается изменение объема, что приводит к разрывам, поломкам или разрушению радиоэлементов, нарушению герметичности и т.д.

4.8.2. Законы проникновения влаги

Проникновение влаги происходит различными способами. Пути проникновения влаги служат макроскопические поры, трещины или капиллярное проникновение жидкости. Расчет проникновения влаги производится для водяного пара, проникающего за счет диффузии в диэлектрическом влагозащитном покрытии.

При расчете диффузии водяных паров используют законы диффузии (закон Фика) и растворимости (закон Генри).

Первый закон Фика описывает процесс диффузии для установившегося процесса:

$$\Gamma = -D \text{grad} C, \quad (4.18)$$

где Γ – удельный диффузный поток, равный массе водяных паров, прошедших в 1 с через поверхность равную 1 м^2 ;

C – концентрация водяных паров;

D – коэффициент диффузии водяных паров.

Закон растворимости Генри позволяет связать концентрацию пара и его парциальное давление p .

$$C = h p, \quad (4.19)$$

где h – коэффициент растворимости пара в материале.

Законы Фика и Генри при больших влажностях строго не соблюдаются, но в расчетах толщины влагозащитного покрытия это можно не учитывать.

4.8.3. Расчет толщины влагозащитного покрытия

Для невлагоемких изделий, у которых h (материал изделия) $\ll h_s$ (материал влагозащитного покрытия), долговечность изделия τ и толщина влагозащитного покрытия Δx определяется выражением

$$\tau = - \frac{\Delta x^2}{D} \ln \frac{P_a - P_i}{2(P_a - P_0)}, \quad (4.20)$$

где D – коэффициент диффузии;

P_a – парциальное давление водяных паров в воздухе при эксплуатации изделия;

P_i – парциальное давление водяных паров на поверхности изделия под влагозащитной оболочкой в момент времени τ ;

P_0 – парциальное давление водяных паров в воздухе в момент герметизации изделия.

Когда P_i достигнет критического значения в процессе эксплуатации РЭС, то изделие откажет.

Для влагоемких изделий, у которых $h \cdot v \gg h_s \cdot S \Delta x$, где v – объем защищаемого изделия; S – площадь поверхности изделия,

$$\tau = \frac{h \cdot v \cdot \Delta x}{h_s D \cdot S} \ln \frac{P_a - P_i}{P_a - P_0}. \quad (4.21)$$

4.8.4. Способы защиты РЭС от влаги

Основным назначением защиты узлов и элементов РЭС от влаги является обеспечение работоспособности отдельных элементов, узлов и изделий в целом в процессе производства, эксплуатации и хранения в течение заданного периода времени. Физический смысл защиты от влаги заключается в стабилизации процессов на поверхности и в объеме материала защищаемого изделия, т.е. в стабилизации его параметров в заданных пределах при изменении свойств окружающей среды или в период перехода ее из одного равновесного состояния в другое.

В настоящее время существует много конструкторско-технологических средств защиты конструкции и элементов РЭС от влаги (рисунок 4.6).

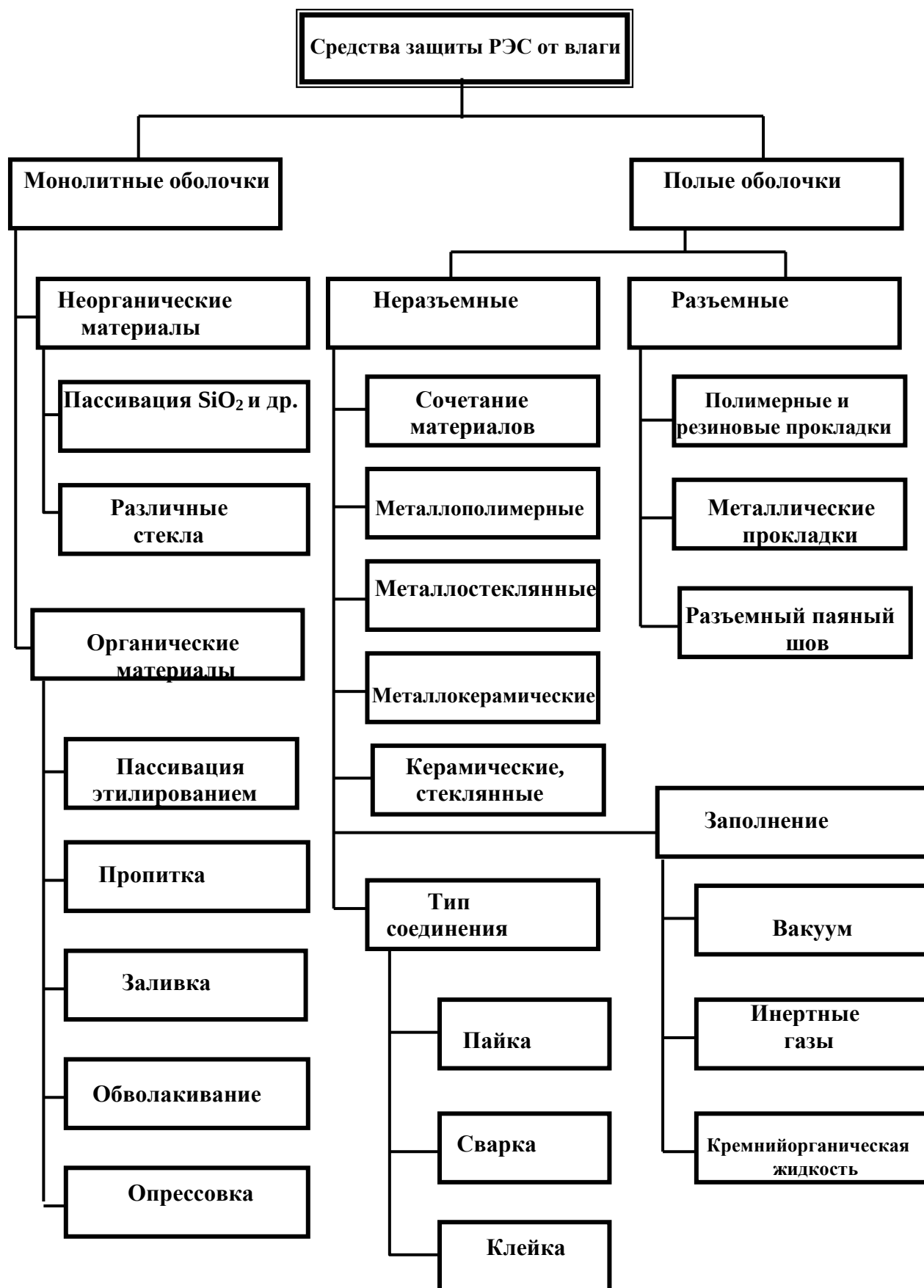


Рисунок 4.6. Классификация средств защиты от влаги

Защита от влаги **пропиткой, заливкой, обволакиванием** и **опрессовкой** возникла в электротехнической промышленности для защиты обмоток устройств. Пропитка и заливка используется в РЭС для защиты трансформаторов и индуктивностей, выполненных из объемного провода. Обволакивание и опрессовка используются для защиты полупроводниковых приборов и ИС при эксплуатации. Достоинствами этих методов являются:

- низкая стоимость при крупносерийном производстве;
- высокая надежность защиты от влаги при нежестких условиях эксплуатации;
- высокая конструктивная прочность.

Защита от влаги **пассивацией** поверхности органическими и неорганическими материалами наиболее применима на этапе производства, т.е. как технологическая защита. В сочетании с последующей герметизацией изделий более толстыми монокристаллическими или полыми оболочками она способствует повышению эксплуатационной надежности.

Защита от влаги полыми оболочками использовалась еще для защиты бумажных конденсаторов. Развитием этих способов была защита герметичными оболочками с уплотняющими прокладками блоков РЭА на дискретных компонентах. Необходимость исключения попадания различных газов на поверхность элементов ИС привела к появлению герметичных полых корпусов, которые называются вакуумно-плотными. Существуют различные конструкции таких корпусов, которые предназначены для защиты узлов, не подлежащих ремонту (ИС, блоки разового применения). Необходимость обеспечения вакуумно-плотной герметизации и ремонтнопригодности привела к созданию оболочек, позволяющих разгерметизацию и повторную герметизацию блоков.

Защита полыми оболочками (корпусами) имеет следующие преимущества:

- наиболее высокое качество герметизации;
- обеспечение химической и механической нейтральности оболочки по отношению к защищаемым компонентам;
- минимизация паразитных связей.

При этом трудоемкость защиты в 2...3 раза выше трудоемкости защиты монокристаллическими оболочками, а ее стоимость достигает 20... 45% стоимости всего изделия. Кроме того, при использовании полых оболочек плотность компоновки уменьшается в 10... 1000 раз.

Защита монокристаллическими оболочками. Для защиты германиевых и кремниевых приборов на этапе производства используется способ, называемый пассивацией, сущность которого заключается в подавлении химически активных центров на поверхности полупроводниковых приборов.

Преимуществами защиты от влаги пропиткой, заливкой, обволакиванием с использованием полимерных материалов являются:

- дешевизна, обусловленная возможностью использования высокопроизводительных методов и малой стоимостью сырья;
- упрощение конструкции при одновременном увеличении ее механической прочности; улучшение электроизоляционных параметров конструкции.

К недостаткам защиты полимерными материалами относится:

- ухудшение отвода тепла по сравнению с металлическими корпусами; увеличение паразитных емкостей;
- возможность возникновения внутренних напряжений при отверждении полимера и под воздействием температуры;
- сложность ремонта;
- ограниченная влагостойкость вследствие поглощения влаги полимерами;
- ухудшение защитных свойств во времени из-за старения.

Пропитка нашла наибольшее применение для защиты от влаги моточных изделий (обмоток трансформаторов, катушек индуктивности и т. д.). С помощью пропитки заполняются пустоты и поры, а также создается тонкий изоляционный слой на поверхности обмотки. В результате пропитки увеличивается электрическая и механическая прочность, а также улучшается теплопроводность моточного узла вследствие вытеснения воздуха, имеющего низкую теплопроводность. Однако при этом увеличиваются масса и паразитная емкость, а также интенсифицируются химические и электрохимические процессы в контактных соединениях. Обычно пропитка используется в комбинациях с другими методами (с заливкой, обволакиванием, опрессовкой). Конструкция изделия должна обеспечить легкость проникновения пропиточного состава (вырезы в «щечках» каркаса трансформатора). Выбор пропиточного состава определяется наиболее важными для изделия требованиями (хорошая проникающая способность, химическая нейтральность, высокая цементирующая способность, хорошие электроизоляционные характеристики, хорошая адгезия, теплопроводность, тепло-холодостойкость). Один пропиточный состав не может удовлетворить всем требованиям. Для пропитки используются следующие материалы: церезин, парафин, пропиточные лаки БТ-987, Ф-95, МЛ-92, ПФЛ-86, ФЛ-98, ФА-97, КО-911, ЭТР-5 и др.

Заливка — сплошная упаковка изделия в изоляционную массу путем заполнения свободного промежутка между заливаемым изделием и стенками корпуса. Качество защиты от влаги при заливке определяется влагопроницаемостью материала, толщиной заливки (δ_1 и δ_2), площадью и формой выводов. Рекомендуемая толщина заливки δ зависит от объема v заливаемого изделия: при $v = 5 \dots 8 \text{ см}^3$ $\delta_1 = \delta_2 = 2 \dots 2,5 \text{ мм}$; при $v = 10 \dots 200 \text{ см}^3$ $\delta_1 = 6 \dots 10 \text{ мм}$; $\delta_2 = 12 \dots 15 \text{ мм}$; при $v > 200 \text{ см}^3$ объем заливки составляет $0,1 \dots 0,2v$. К заливочным материалам могут предъявляться различные требования. Часто в заливочный материал для увеличения тепло-

проводности добавляют кварцевую пудру или прокаленный порошок окиси алюминия. Однако при содержании наполнителей более 10-25% ухудшаются влагозащитные свойства.

Для защиты заливаемых элементов от механических нагрузок, возникающих в компаунде, обычно предусматривают специальные меры которые ограничивают толщину заливки; располагают наиболее чувствительные к нагрузкам детали ближе к центру; помещают заливаемые элементы (например, магнитные) в специальные каркасы, защищают элементы перед заливкой эластичными компаундами типа СКТН-1 или смазками типа ЦИАТИМ-201 (рисунок 5.4). Для заливки используются битумы нефтяные БН-IV и БН-V, компаунды УП-653, УП-599 и т. д.



Рисунок 4.7. Защитные конструкции без внутренних газовых полостей
а - заливка в форму без подслоя; **б** - обволакивание,
 1 - элементы, 2 - герметизирующий полимерный материал, 3 – выводы.

Обволакивание - консервирующий метод, осуществляемый путем нанесения на поверхность изделия негигроскопичного изоляционного материала. Обволакивание осуществляется пульверизацией или кратковременным (1...1,5 с) окунанием изделия в специальный изоляционный материал. Основным преимуществом обволакивания является высокая экономичность. К недостаткам относятся:

- необходимость довольно толстого слоя покрытия;
- возможность использования только для нежестких условий эксплуатации;
- сложность удаления попавшей под защитный слой влаги.

В РЭС обволакивание применяется для защиты бескорпусных полупроводниковых приборов и микросборок. Для обволакивания используются лаки УР-231, СБ-1С, Э-4100, ЭП-96, 100 НСФ, ГФ-916, КО-916, КО-935, ГФ-913, КО-97, компаунд ЭКМ и др.

К обволакиванию можно отнести также герметизацию специальными компаундами паяных и сварных швов и мест соединения металлов с различными электрохимическими потенциалами. Все эти виды соединений весьма чувствительны к воздействию влаги вследствие наличия в их составе различных примесей, неоднородностей, химически активных остатков флюсов и различия электрохимических потенциалов. В любом случае даже при применении герметизирующих компаундов, желательно избегать контактов металлов с большой разницей электрохимических потенциалов, например, алюминия (-1,3) и меди (+0,34).

Опрессовка — защита изделия толстым слоем изоляционного материала (термопластичная или термореактивная пластмасса) в специальных формах. Опрессовку целесообразно использовать в тех случаях, когда она может не только выполнять роль защиты от влаги, но и служить базой для всей конструкции (крепление выводов и других элементов). Это упрощает техпроцесс изготовления и снижает стоимость защиты в 2-3 раза по сравнению с полыми корпусами.

Защита полыми оболочками. Для защиты узлов и блоков РЭС широко используются полые неразъемные и разъемные оболочки. Для герметизации узлов (ИС) нашли применение следующие типы корпусов: металло-стеклянный, стеклянный, керамический, металлополимерный, полый полимерный. Герметизация таких корпусов осуществляется с помощью сварных, паяных и клеевых швов.

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РЭС

Развитие радиотехники связано с увеличением радиоэлектронных средств, применяемых во всех отраслях народного хозяйства и обороны. В связи с этим, вопрос о нормальном “электромагнитном сосуществовании” различных действующих радиотехнических, электронных, электротехнических средств выходит на первый план. Решение этой сложной научно-технической задачи возлагается на проектировщика, который должен видеть проблему обеспечения жизнеспособности РЭС в целом в условиях её эксплуатации с учётом реальной электромагнитной обстановки (ЭМО). В процессе разработки и производства изделия требования к обеспечению его ЭМС должны учитываться на всех этапах, наряду с требованиями надёжности, технологичности, миниатюризации и др.

5.1. Сущность обеспечения ЭМС

Электромагнитная совместимость РЭС определяется способностью этих средств функционировать одновременно в реальных условиях эксплуатации при воздействии непреднамеренных электромагнитных помех (НЭМП) и не создавать недопустимых электромагнитных помех (ЭМП) другим средствам. Анализ современного состояния проблемы ЭМС РЭС позволяет выделить следующие разделы, определяющие научно-техническую основу ЭМС /15, 16/.

1). Радиочастотный ресурс (РЧР)

Изучение условий пользования радиоканалами различными радиослужбами и разработка принципов управления, прогнозирования ресурсов, нормирования его параметров, совершенствование нормативно-технической документации (НТД). В соответствии с нормами Международного консультативного комитета по радио (МККР) весь нормируемый от ЭМП диапазон частот разбит на следующие полосы /16/:

- 9 - 535 кГц; 535 - 1605 кГц;
- 1605 - 4000 кГц; 4 - 29,7 мГц;
- 29,7 - 100 мГц; 100 - 470 мГц;
- 470 - 2450 мГц; 2450 - 10500 мГц;
- 10500 - 40000 мГц; 40000 - 275000 мГц.

2). Непреднамеренные электромагнитные помехи (НЭМП)

Выявление источников и определение энергетических, частотных и временных характеристик НЭМП, статистический анализ, моделирование и изучение влияния среды на их распространение, изучение влияния

НЭМП на работу различных приемников (рецепторов) помех, создание научно-технической документации на допустимые уровни помех и т.п.

3). Характеристики ЭМС

Технические характеристики любой РЭС можно разделить на две группы: **функциональные** и **влияющие** на ЭМС. К первой группе можно отнести, например, мощность радиопередатчика и чувствительность приемника. Ко второй группе - мощность побочного излучения и восприимчивость приёмника на боковом канале.

Анализ характеристик ЭМС различных РЭС позволяет их рассчитывать и совершенствовать для конкретной электромагнитной обстановки (ЭМО). Различают три уровня действия ЭМП:

- внутриаппаратная ЭМС (в блоке, узле и т.п.);
- внутрисистемная ЭМС (внутри радиоэлектронного комплекса);
- межсистемная ЭМС (между различными системами и комплексами).

4). Электромагнитная обстановка

Определение реальных условий, в которых работает или будет работать конкретное изделие при наличии или отсутствии полезного сигнала на входе в случае действия НЭМП через этот вход или помимо него. В соответствии с тремя уровнями ЭМС определяют аналогично и три вида ЭМО.

5). Методы и способы обеспечения ЭМС

Для обеспечения ЭМС служат *организационные* и *технические* мероприятия.

Организационные мероприятия относятся в основном к уровню межсистемной ЭМС и заключаются в рациональном выборе частот радиоканалов для различных радиослужб, определяют места размещения средств и т.д. (но для защиты систем и комплексов от воздействий внешних ЭМП применяются и технические мероприятия).

Технические мероприятия делятся на конструкторско-технологические и схемотехнические. Конструкторско-технологические реализуются в основном на внутрисистемном и внутриаппаратном уровнях обеспечения ЭМС. Требования обеспечения ЭМС должны быть составной частью технического задания (ТЗ) на разработку и в последующем техническими условиями (ТУ) на изделие в производстве и эксплуатации.

5.2. Основные понятия ЭМС

В области ЭМС используются специфические термины и понятия, которые позволяют классифицировать, определять и исследовать процессы с единой терминологией. Однако, следует отметить, что до сих пор эти по-

нения в ряде случаев у разных авторов противоречат друг другу или неточны.

В связи с этим, необходимо ввести основные понятия и термины, достаточно обоснованные физически и признанные широким кругом исследователей.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПОМЕХА - электромагнитный, электрический или магнитный процесс, созданный любым источником в пространстве или проводящей среде и влияющий на операции с полезным сигналом в РЭА.

ЭМП, созданная в пространстве, называется **излучаемой** помехой, а созданная в проводящей среде - **кондуктивной** помехой.

Как правило, НЭМП возникают вследствие случайных процессов, протекающих в источниках помех, и потому они носят вероятностный характер и описываются статистическим аппаратом.

РЕЦЕПТОР - любое техническое устройство, реагирующее на электромагнитный полезный сигнал и (или) на ЭМП. Рецептор - это радиоприемное устройство, ЭВМ, электронное устройство, система и т.п.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА - совокупность электромагнитных, электрических, магнитных полей, токов и напряжений помех и сигналов в заданной области пространства, которая влияет или может влиять на работу рецептора. Количественно ЭМО определяется характеристиками ЭМС рецептора.

РАДИОЧАСТОТНЫЙ РЕСУРС - совокупность возможных для использования радиочастотных электромагнитных полей для передачи и приема информации или энергии.

ВОСПРИИМЧИВОСТЬ РЕЦЕПТОРА - мера реакции на внешнюю ЭМП как при наличии, так и при отсутствии полезного сигнала.

ПОРОГ ВОСПРИИМЧИВОСТИ - максимально допустимый уровень НЭМП, при котором рецептор работает с приемлемым качеством.

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ РЕЦЕПТОРА - свойство противостоять внешним и внутренним ЭМП за счет выбора структуры полезного сигнала и принципа построения рецептора.

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ РЕЦЕПТОРА - свойство противостоять внешним и внутренним ЭМП за счет схемных и конструкторских способов, не нарушающих выбранную структуру полезного сигнала и принципа построения рецептора.

ЭКРАНИРОВАНИЕ - способ ослабления ЭМП с помощью металлической оболочки (экрана), обладающей высокой электрической или магнитной проводимостью.

ФИЛЬТРАЦИЯ - ослабление напряжения и токов помехи с помощью электрической цепи (фильтра), вносящей затухание в заданных пределах и в заданных полосах частот.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ - электрическая цепь, обладающая свойством сохранять минимальный (нулевой) потенциал.

ЭКРАН - элемент конструкции РЭА в виде металлической и, как правило, заземленной оболочки с высокой электрической или магнитной проводимостью, служащий для ослабления ЭМП в определенной области пространства в широком диапазоне частот.

При решении задач по обеспечению ЭМС определяющим является анализ ЭМП и их классификация. Чем точнее определен класс и вид ЭМП, тем надежнее и эффективнее разработчик РЭС может предложить защиту от помех.

Классификация ЭМП приведена в таблице 5.1 /17/.

Таблица 5.1. Классификация ЭМП

КЛАСС ЭМП	ТИП ЭМП	ВИД ЭМП
Станционные	Излучаемые Основное и неосновное излучение: внеполосное; на гармониках; на субгармониках; комбинационное; интермодуляционное; шумовое; паразитное	По частоте и спектру НЧ; ВЧ; синусоидальная; модулированная; импульсная; шумовая; импульсно-шумовая По времени: непрерывная; постоянная; кратковременная; регулярная; нерегулярная
Индустриальные	Излучаемые: электромагнитная; электрическая индукция; магнитная индукция Кондуктивные: симметричная; несимметричная; провал напряжения; перенапряжение; коммутационная; индуцированная; помеха отражения	По отношению помехи к рецептору: узкополосная; широкополосная; аддитивная; мультипликативная; внешняя;

Естественные	Излучаемые: атмосферная; космическая; электростатическая; электромагнитный импульс (ЭМИ)	внутренняя; когерентная; некогерентная По воздействию: недопустимая; допустимая; блокирующая; перекрестная
Излучаемые: от одиночного облучателя; от нескольких облучателей; интермодуляционная; контактная		

Рассмотрим подробнее термины, приведенные в таблице 5.1.

СТАНЦИОННЫЕ ПОМЕХИ - помехи от антенны радиопередающего центра. Наименования типов и видов помех говорит о структуре этих помех.

ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ ПОМЕХИ - помехи от электротехнических, электронных и радиоэлектронных бытовых, промышленных, медицинских и научных устройств и установок и т.п. Ввиду разнообразия источников помех индустриальные помехи – наиболее распространенный вид, и он занимает широкий диапазон частот (от десятков герц до нескольких гигагерц).

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПОМЕХИ - помехи, вызванные природными физическими процессами в виде электромагнитного излучения (космические и атмосферные шумы, реликтовое излучение, радиоизлучение Солнца, атмосферы, электростатические поля различных атмосферных образований и летательных аппаратов и т.п.).

КОНТАКТНЫЕ ПОМЕХИ - помехи, возникающие при переизлучении от токопроводящих механических контактов с нелинейной токовой проводимостью при облучении последних достаточно мощным радиопередающим устройством. Эти помехи характерны для движущихся объектов (корабли, танки, самолеты, автомобили и т.п.), и уровень таких помех возрастает с увеличением скорости движения объекта.

5.3. Нормативно-техническая документация по ЭМС

Обеспечение требуемых характеристик ЭМС при разработке и производстве РЭС определяет специальная нормативно-техническая докумен-

тация, регламентирующая нормы и методы защиты и измерения и базирующаяся на международных и отечественных документах и соглашениях. НТД по ЭМС учитывает требования, предъявляемые международными и национальными комитетами.

Одними из международных документов в области ЭМС являются “Регламент радиосвязи” и “Публикации” Международного специального комитета по радиопомехам (СИСПР), которые лежат в основе многих национальных стандартов и норм на допустимые уровни промышленных помех от различных источников.

К международной НТД по ЭМС относятся требования к характеристикам ЭМС радиоэлектронной и электротехнической аппаратуры летательных аппаратов, разработанная Международной организацией гражданской авиации (ИКАО), членом которой является Россия. Аналогичная НТД существует на морскую и автомобильную аппаратуру. Основная отечественная НТД по ЭМС - это Государственные стандарты (ГОСТ) и общегосударственные нормы Госкомитета по радиочастотам (ГКРЧ) России:

- ГОСТ 11001-80 (СТ СЭВ 502-77). Приборы для измерения промышленных радиопомех. Технические требования и методы измерения.
- ГОСТ 16842-82 (СТ СЭВ 784-77). Радиопомехи промышленные. Методы испытаний источников радиопомех.
- ГОСТ 13661-72. Электрические фильтры для подавления радиопомех. Методы измерения вносимого затухания.
- ГОСТ 14777-76. Радиопомехи промышленные. Термины и определения.
- ГОСТ 23611-79. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Термины и определения.
- ГОСТ 23872-79. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Номенклатура параметров и классификация технических характеристик.
- ГОСТ 23450-79. Радиопомехи промышленные от промышленных, научных и медицинских высокочастотных установок. Нормы и методы измерения.
- ГОСТ 19705-81. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Классификация.
- Межведомственные требования “Нормы летной годности самолетов”. НГЛС-2 “Оборудование самолетов”. Издание МВК НГЛ СССР, 1974 г.
- Общесоюзные нормы на уровни побочных излучений радиопередатчиков всех категорий и назначений (гражданских образцов).- М.: Связь, 1972 г.
- Общесоюзные нормы допускаемых промышленных радиопомех (нормы 1-72-9-72).- М.: Связь, 1973 г.
- Общесоюзные нормы допускаемых промышленных радиопомех. Промышленные, научные, медицинские и бытовые высокочастотные уста-

новки. Допускаемые величины и методы испытаний (нормы 5Б-80). - М.: Радио и связь, 1981 г.

Естественно, что этот перечень намного шире и охватывает все категории промышленных изделий, устройств и приборов в различных областях народного хозяйства. Знание особенностей НТД по ЭМС характеризует профессиональную подготовку инженера при решении сложных задач по обеспечению ЭМС и созданию РЭА с минимально возможными побочными излучениями.

5.4. Принципы обеспечения ЭМС при разработке и эксплуатации РЭС

При решении задач по обеспечению ЭМС РЭС, являющихся комплексными и многоплановыми, необходим системный подход. Это значит, что в процессе анализа задачи необходимо выявить источники помех, определить амплитудно-частотные и временные характеристики ЭМП, оценить ЭМО и пути распространения ЭМП, установить восприимчивость аппаратуры или узлов и обеспечить ЭМС по критериям НТД и ГОСТ каждой части РЭС и совокупности независимо от того, как эти части объединены конструктивно.

Рассмотрим в общем виде сущность методов обеспечения ЭМС при разработке и эксплуатации РЭС.

1. Экранирование:

- анализируется структура помехонесущего поля в ближней и дальней зонах распространения;
- на основе знания структуры ЭМП выбирается тип и материал экрана, определяются требования к конструкции экрана;
- анализируется принцип действия экрана на основе теории поля и радиотехнических цепей, рассчитывается эффективность экранирования с учетом конструктивных особенностей экрана (отверстий, влияния переходных контактов соединений - стыков, спаев и уплотняющих прокладок);
- определяется эффективность экранирования функциональных узлов, в т.ч., микросборок;
- определяется эффективность экранирования проводов, витых пар проводов, кабелей всех видов на основе теории емкостных и индуктивных связей;
- реализуются практические рекомендации по конструированию экранов, способам их заземления, применения уплотняющих прокладок, методам и материалам соединений и пр.;
- реализуются технологические мероприятия, обеспечивающие надежность и стабильность экранирования при длительной эксплуатации и воздействии вредных факторов окружающей среды;

- составляются методики контроля качества и надежности экранов при оценке эффективности экранирования.

2. Фильтрация помех:

- выявление требований к фильтрации кондуктивных помех, создаваемых источниками питания;
- анализ принципов построения фильтров с учетом их конструкторско-технологических особенностей и требований к эффективности фильтрации (вносимого затухания в частотном диапазоне);
- расчет эффективности фильтрации помех различными типами помехоподавляющих элементов и фильтров;
- выбор типа фильтра для конкретных случаев с учетом его электрических и конструкторско-технологических характеристик и обоснования выбора типа фильтра, например, встроенного в разъем, антенных поглощающего и отражательного фильтров;
- реализация конструкторско-технологических мер по поддержанию стабильности и эффективности фильтра при длительном воздействии факторов внешней среды и механических воздействий;
- выбор методов измерения характеристик ЭМС фильтров и их контроля.

3. Заземление:

- определение электрических и конструкторских требований к системе заземления как цепи распространения помех, на основе знаний особенностей защитного и высокочастотного заземления РЭС;
- определение характеристик ЭМС заземления (учет импедансов шин заземления, перемычек и металлизации с учетом минимизации и конструкторско-технологического исполнения);
- выбор схемы заземления из вариантов одноточечного, многоточечного и гибридного типов;
- обоснование применения изолирующих трансформаторов, разделения цепей заземления, выбора схемы заземления источников питания и др.
- реализация практических рекомендаций по конструированию цепей заземления и контролю их параметров в эксплуатации.

4. Монтажные соединения:

- определение путей проникновения и распространения ЭМП в монтажных соединениях на основе теории емкостных и индуктивных связей;
- расчет параметров линий передачи сигналов и помех с учетом возможных искажений сигналов в зависимости от быстродействия и степени согласования импедансов цепей;
- анализ электрически длинных и коротких линий передач с выявлением причин возникновения помех отражений;
- проведение классификации монтажных соединений: кабели, провода, скрученные пары, печатный монтаж, разъемные и неразъемные со-

единения, экранированные соединители, гибкие монтажные соединения, стежковый монтаж и т.д.;

- расчет влияния помех в монтажных соединениях;
- разработка методов проектирования помехозащищенных печатных плат - однослойных и многослойных;
- разработка рекомендаций по конструированию монтажных соединений с учетом их ЭМС и стабильности параметров монтажа под воздействием факторов окружающей среды.

5. Элементная база:

- выявление взаимосвязи между характеристиками РЭС и характеристиками ЭМС радиокомпонентов;
- определение требований к характеристикам ЭМС помехоподавляющих элементов (конденсаторов, катушек индуктивности, диодов), ВЧ транзисторов, тиристоров, электровакуумных приборов, микросхем, микросборок и др.;
- определение временных и частотных характеристик элементной базы;
- учет процессов образования импульсов внутренних помех в цепях питания, вызванных коммутацией цифровых микросхем и оценка восприимчивости к ним микросхем;
- оценка восприимчивости микросхем к внешним помехам;
- определение характеристик статической и динамической помехоустойчивости цифровых микросхем;
- реализация рекомендаций по учету характеристик ЭМС элементной базы при конструировании микросборок, печатных плат, узлов и блоков РЭС.

6. Защита от молний (мощный электромагнитный импульс):

- анализ необходимости защиты РЭС от ударов молнии;
- анализ характеристик прямых и не прямых ударов молнии;
- анализ эффекта действия ЭМИ на РЭС и расчетно-экспериментальные оценки помехозащищенности РЭС;
- оценка помехозащищенности радиоэлементов во входном тракте РЭС;
- конструкторские решения по защите от ЭМИ РЭС в наземных сооружениях, подвижных объектах и летательных аппаратах;
- рекомендации по проектированию защищенных от ЭМИ изделий;
- разработка рекомендаций по методике испытаний на защиту от ЭМИ и контроля качества защиты РЭС от ЭМИ.

Анализируя принципы обеспечения ЭМС РЭС, можно сделать вывод, что знание электродинамики, схемотехники, системотехники, распространения радиоволн, конструкторско-технологических принципов при разработке, проектировании и эксплуатации РЭС любого назначения, знание специфики работы и технических характеристик устройств передачи, приема, обработки

и хранения информации является неперенным условием для успешной и профессиональной работы специалистов разработчиков РЭС.

5.5. Основные принципы электродинамики

В данном разделе рассматриваются общие физические принципы электромагнитных процессов и их структура. Понимание процессов образования электромагнитных полей, их воздействие на материальные среды и объекты необходимо для правильного и эффективного решения задач по обеспечению ЭМС РЭА. Эти вопросы лежат в основе электродинамики (теории переменного электромагнитного поля) - фундаментальной теоретической базы, использующейся при расчете и проектировании радиотехнических устройств.

Основные законы электродинамики описываются уравнениями Максвелла. Они позволяют определить структуру и основные характеристики электромагнитных полей, понять физику происходящих явлений, разработать методы и соотношения для определения конструктивных параметров и электрических характеристик радиоаппаратуры.

5.5.1. Электромагнитное поле и его характеристики

Из физики известно, что источником электромагнитного поля являются движущиеся заряды. В случае переменных электромагнитных полей величина этих зарядов меняется во времени. Неподвижные заряды создают только электрическое поле. Токи проводимости и конвекционные токи, являющиеся упорядоченно движущимися электрическими зарядами, также создают электромагнитное поле. Электромагнитное поле и заряды взаимодействуют друг с другом. Это взаимодействие, действующее на движущийся положительный заряд, характеризует сила Лоренца [18, 19]:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{V}, \mathbf{B}] = \mathbf{F}_э + \mathbf{F}_м, \quad (5.1)$$

т.е. сила Лоренца раскладывается на электрическую и магнитную составляющие:

$$\mathbf{F}_э = q\mathbf{E} \quad \text{и} \quad \mathbf{F}_м = q[\mathbf{V}, \mathbf{B}], \quad (5.2)$$

где q - величина заряда; $\mathbf{V}$ - вектор скорости.

Первое слагаемое характеризует электрическое поле и не зависит от скорости движения заряда. Оно определяет векторную напряженность электрического поля $\mathbf{E}$, численно равную силе, с которой электрическое поле в вакууме действует на единичный точечный положительный заряд.

Второе слагаемое - магнитное поле, которое зависит от величины и направления скорости движения заряда и всегда перпендикулярно ей. Эта сила определяет векторную величину $\mathbf{B}$ - индукцию магнитного поля, численно равную силе, с которой магнитное поле действует на единичный то-

ческий положительный заряд, движущийся с единичной скоростью перпендикулярно линиям вектора **B**.

Магнитное поле действует не только на движущиеся заряды, но и на проводники по которым течет электрический ток. Сила, действующая на проводник, определяется выражением:

$$\mathbf{F} = l[\mathbf{I}, \mathbf{B}], \quad (5.3)$$

где **I** - вектор, численно равный силе тока **J**, направление которого совпадает с направлением тока в проводнике, *l* - длина проводника.

5.5.2. Электромагнитные свойства сред

Сила действия электромагнитного поля на заряд зависит от среды. Физически это обусловлено поляризацией и намагничиванием среды, в результате которых появляются дополнительные электрические и магнитные поля, складывающиеся с основными полями. Поэтому, в отличии от вакуума, для описания электромагнитного поля в материальных средах вводятся дополнительный вектор электрического смещения (электрической индукции) **D** и вектор напряженности магнитного поля **H**. Кроме того, для сред со свободными электрическими зарядами вводится вектор плотности проводимости $\mathbf{j}_{\text{пр.}}$. Связь между этими векторами и векторами **E** и **H** определяется материальными уравнениями. В этом случае вектор электрического смещения определяется выражением (первое материальное уравнение) /19/:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_a \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}, \quad (5.4)$$

где ε_a - абсолютная диэлектрическая проницаемость среды;
 $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ [Ф/м] - диэлектрическая постоянная вакуума;
 $\varepsilon = \varepsilon_0 / \varepsilon_a$ - относительная диэлектрическая проницаемость.

Вектор напряженности магнитного поля равен (второе материальное уравнение):

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_a = \mathbf{B} / \mu_0 \mu, \quad (5.5)$$

где μ_a - абсолютная магнитная проницаемость;
 $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ [Гн/м] - магнитная постоянная;
 $\mu = \mu_a / \mu_0$ - относительная магнитная проницаемость.

Вектор плотности тока проводимости или закон Ома в дифференциальной форме (третье материальное уравнение) определяется соотношением

$$\mathbf{j}_{\text{пр.}} = \sigma \mathbf{E}, \quad (5.6)$$

где σ - объемная удельная проводимость среды [Сим/м].

Материальные среды в общем случае имеют комплексную диэлектрическую проницаемость

$$\varepsilon = \varepsilon_a - i\sigma/\omega. \quad (5.7)$$

Вещественная часть комплексной диэлектрической проницаемости определяет интенсивность поляризации среды, а *мнимая – характеризует потери в среде*. Однако это выражение не учитывает поляризационных потерь в диэлектрике, возникающих в результате периодически меняющейся поляризации вещества. Эти потери можно определить выражением

$$\operatorname{tg} \delta = \sigma / (\omega \varepsilon_a). \quad (5.8)$$

Значение $\operatorname{tg} \delta$ определяется экспериментально и приводится в справочной литературе. Физически $\operatorname{tg} \delta$ определяет некоторое эффективное значение проводимости σ , отличное от проводимости диэлектриков на постоянном токе.

В зависимости от свойств параметров ε_a , μ_a и σ среды делятся на:

- **линейные**, в которых ε_a , μ_a и σ не зависят от величины **Е** и **Н**;
- **нелинейные**, в которых ε_a , μ_a и σ зависят от величины **Е** и **Н**.

Все реальные среды, по существу, являются нелинейными. Однако при не очень сильных полях можно считать среды линейными.

Линейные среды делятся на:

- **однородные**, у которых ε_a , μ_a и σ не зависят от координат, т.е. свойства среды одинаковы во всех точках;
- **неоднородные**, у которых хотя бы один из параметров – ε_a , μ_a или σ – является функцией координат;
- **изотропные**, у которых свойства не зависят от направления векторов **Е** и **Н** (ε_a , μ_a и σ - скалярные величины);
- **анизотропные**, у которых свойства меняются в зависимости от изменения направления векторов **Е** и **Н** (по крайней мере, один из параметров ε_a , μ_a или σ - тензоры).

5.5.3. Уравнения Максвелла и их физический смысл

Все электромагнитные процессы макроскопической электродинамики подчиняются уравнениям Максвелла, сформулированным в 1873 г. в виде дифференциальных уравнений. Эти уравнения связывают воедино электрические и магнитные характеристики поля:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{I}_{\text{пр}} + \partial \mathbf{D} / \partial t; \quad (5.9, \text{a})$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t; \quad (5.9, \text{б})$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho; \quad (5.9, \text{в})$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 0. \quad (5.9, \text{г})$$

Физический смысл этих уравнений заключается в следующем.

Первое уравнение Максвелла (5.9,а) является обобщенным законом Ампера (закон полного тока) и говорит о том, что *если в некоторой точке пространства существует переменное электрическое поле E , создающее токи проводимости $I_{np} = \sigma E$ и токи смещения $I_{см} = i\omega \varepsilon_a E$, то в окрестности этой точки возникает переменное вихревое магнитное поле $\text{rot } H$, создаваемое этими токами*. Электрическое поле и создаваемое им магнитное поле образуют правовинтовую систему.

Второе уравнение Максвелла (5.9,б) является обобщенным законом магнитной индукции Фарадея. Фарадей установил, что если замкнутый контур пронизывается переменным магнитным потоком Φ , то в контуре возникает электродвижущая сила (ЭДС) равная скорости изменения магнитного потока:

$$e = - \partial \Phi / \partial t, \quad (5.10)$$

Знак "минус" в правой части означает, что возникающая в контуре ЭДС стремится воспрепятствовать изменению потока, пронизывающего контур.

Физический смысл второго уравнения Максвелла заключается в том, что *всякое изменение магнитного поля во времени непрерывно вызывает независимо от параметров среды появление электрического поля*.

Второе уравнение Максвелла связано с гармоническим колебанием соотношением:

$$\text{rot } E = - \partial B / \partial t = -i\omega \mu_a H, \quad (5.11)$$

т.е. оно утверждает, что *если в некоторой точке пространства существует переменное магнитное поле, то в окрестностях этой точки возникает переменное вихревое электрическое поле*. Магнитное поле и создаваемое им электрическое поле образуют левовинтовую систему.

Следует отметить, что электрическое поле может быть как вихревым, так и потенциальным. Источником потенциального электрического поля являются заряды (в случае электрических полей), которые находятся в тех точках пространства, где текут токи проводимости, представляющие собой движущиеся заряды.

Таким образом, гармоническое электрическое поле может быть вихревым, потенциальным или представлять суперпозицию (сумму) потенциального и вихревого полей, тогда как магнитное поле только вихревое.

Первое и второе уравнения Максвелла говорят о том, что между электрической и магнитной составляющими в переменном электромагнитном поле существует тесная взаимосвязь, которая выражается тем, что созданное сторонними источниками меняющееся во времени электромагнитное поле, может существовать вне этого источника за счет собственной

энергии, перекачивающейся из энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратно.

Третье уравнение Максвелла (материальное уравнение 5.9,в) - это обобщенный закон Гаусса для случая переменных процессов, физически означает, что *источником электрического поля являются электрические заряды, т.е. электрическая индукция $\mathbf{D}$ связана с плотностью электрических зарядов ρ* . Из выражения (5.9,в) следует, что дивергенция вектора $\mathbf{D}$ отлична от нуля в тех точках пространства, где есть свободные заряды, а линии вектора $\mathbf{D}$ имеют начало (исток) на положительных зарядах и конец (сток) на отрицательных зарядах.

Четвертое уравнение Максвелла (материальное уравнение 5.9,г) показывает, что *в природе отсутствуют магнитные заряды, а линии вектора $\mathbf{B}$ непрерывны и всегда пронизывают любую замкнутую поверхность*.

Таким образом, третье и четвертое уравнения Максвелла учитывают электрическую и магнитную характеристики среды. Действительно, в случае линейных изотропных сред можно записать:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_a \mathbf{E}; \quad \mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H}. \quad (5.12)$$

Следует отметить, что к основным уравнениям электродинамики относятся и закон Ома в дифференциальной форме (5.6), который выражает зависимость плотности тока $I_{\text{пр}}$ в какой-либо точке проводящей сферы от напряженности электрического поля в этой точке.

Таким образом, мы рассмотрели основные уравнения электродинамики, каждое из которых описывает те или иные свойства электромагнитного поля. Однако, для полного анализа электродинамических процессов необходимо использовать полную систему уравнений Максвелла, содержащую основные уравнения Максвелла (5.9,а-г) и материальные уравнения (5.6) и (5.10), которая записывается в виде:

$$\left. \begin{aligned} \text{rot } \mathbf{H} &= I_{\text{пр}} + \partial \mathbf{D} / \partial t = i\omega \mathbf{D} + \omega \mathbf{E} + i\omega \varepsilon_a \mathbf{E}; \\ \text{rot } \mathbf{E} &= - \partial \mathbf{B} / \partial t = - i\omega \mathbf{B}; \\ \text{div } \mathbf{D} &= \rho; \\ \text{div } \mathbf{E} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (5.13)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_a \mathbf{E}; \quad \mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H}. \quad (5.14)$$

Поскольку уравнения (5.13) и (5.14) являются линейными дифференциальными уравнениями, можно утверждать, что **электромагнитные поля удовлетворяют принципу суперпозиции**.

5.5.4. Классификация электромагнитных полей

Рассмотрим частные случаи при решении задач электродинамики с помощью системы уравнений Максвелла.

1. Электромагнитное поле не зависит от времени и нет перемещения зарядов ($j = 0$).

В этом случае система уравнений распадается на две независимые системы уравнений:

$$\operatorname{rot} E = 0; \quad \operatorname{div} D = \rho; \quad D = \varepsilon_a E; \quad (5.15)$$

$$\operatorname{rot} H = 0; \quad \operatorname{div} B = 0; \quad B = \mu_a H \quad (5.16)$$

Система уравнений (5.15) содержит только электрические величины, а система уравнений (5.16) - только магнитные, т.е. электрические и магнитные явления стали независимыми.

В этом случае явления, описываемые первой системой уравнений, называются *электростатическими*, а электрические поля созданы неподвижными и неизменными зарядами.

Вторая система уравнений характеризует постоянные магнитные поля, и явления называются *магнитостатическими*.

2. Электромагнитные поля, созданные постоянным током.

При наличии постоянного тока электрические и магнитные поля нельзя считать независимыми, а созданные этим током поля называются стационарным электромагнитным полем. В этом случае система уравнений Максвелла имеет вид:

$$\operatorname{rot} H = j; \quad \operatorname{div} B = 0; \quad B = \mu_a H; \quad I_{\text{пр}} = \omega E; \quad (5.17, a)$$

$$\operatorname{rot} E = 0; \quad \operatorname{div} D = \rho; \quad D = \varepsilon_a E. \quad (5.17, b)$$

В заключении раздела необходимо отметить, что мы рассмотрели четыре уравнения Максвелла (5.13) и материальные уравнения (5.14), которые применяют в электродинамике. Однако в случае гармонических электромагнитных полей система этих уравнений для комплексных амплитуд E и H сводится только к двум первым уравнениям (5.9) и (5.11), а именно:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} H &= i\omega \varepsilon_a E, \\ \operatorname{rot} E &= -i\omega \mu_a H. \end{aligned} \right\} \quad (5.18)$$

При решении конкретных задач, кроме системы уравнений Максвелла, необходимо использовать граничные условия, позволяющие рассматривать поведение векторов электромагнитного поля на границе раздела сред с различными электрофизическими параметрами, где амплитуды векторов поля могут меняться скачком. Эта необходимость вызвана тем, что операция дифференцирования в точках раздела сред не имеет места.

Соотношения, показывающие связь между значениями векторов электромагнитного поля в разных средах у поверхности раздела, называются граничными условиями. Используя граничные условия на поверхности, ограничивающей объем РЭС, с помощью уравнений Максвелла можно

рассчитать поле внутри его объема, а затем, зная электрические характеристики используемых материалов, определить основные электрические характеристики электромагнитного поля.

На поверхности раздела двух изотропных сред с параметрами ϵ_{a1} , μ_{a1} и ϵ_{a2} , μ_{a2} при поверхностно распределенном заряде вдоль поверхности граничные условия нормальных компонент вектора E /18,19/:

$$\epsilon_{a1} E_{1n} - \epsilon_{a2} E_{2n} = \sigma_s \Delta S = \rho_s, \quad (5.19)$$

где σ_s - поверхностная плотность электрического заряда; ΔS - площадь поверхности раздела двух сред.

Если на границе раздела нет поверхностных зарядов, то граничные условия можно представить в виде:

$$\epsilon_{a1} E_{1n} = \epsilon_{a2} E_{2n}; \quad \mu_{a1} H_{1n} = \mu_{a2} H_{2n}. \quad (5.20)$$

Для тангенциальных составляющих (касательных к поверхности) векторов E и H граничные условия имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} E_{1\tau} &= E_{2\tau}; \\ H_{1\tau} &= H_{2\tau} \end{aligned} \right\} \quad (5.21)$$

т.е. эти составляющие на границе раздела непрерывны.

Внутри идеального проводника ($E=I_{np}; \sigma=0$), т.е. поле E отсутствует ($E = 0$). В этом случае из второго уравнения Максвелла следует, что $\partial B / \partial t = 0$ и $B = \text{const}$, и внутри проводника существует только постоянная составляющая магнитного поля ($H_{1n} = 0$).

Граничные условия для идеального проводника принимаю вид:

$$E_{1n} = \rho_s / \epsilon_{a1}; \quad E_{1\tau} = 0; \quad (5.22)$$

$$H_{1\tau} = J_s; \quad H_{1n} = 0, \quad (5.23)$$

т.е. тангенциальная составляющая вектора напряженности магнитного поля равна по величине плотности поверхностного тока J_s и направлена перпендикулярно направлению тока.

5.5.5. Электромагнитное поле в диэлектриках и проводниках.

Основные характеристики электромагнитного поля

Рассмотрим электромагнитное поле плоской однородной волны, распространяющейся в неограниченной изотропной среде. В этом случае $E=E_x$ и $H=H_y$ (при условии распространения волны вдоль оси Z декартовой системы координат) и для бегущей волны имеет место решение волнового уравнения, полученного из уравнений Максвелла, в виде /19/:

$$\left. \begin{aligned} E(z,t) &= E_{mx} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_1), \\ H(z,t) &= H_{my} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_2), \end{aligned} \right\} \quad (5.24)$$

где α - коэффициент затухания; β - коэффициент фазы; φ_1, φ_2 - начальные фазы составляющих бегущей волны. На рисунке 5.1 приведено графическое представление системы уравнений (5.24).

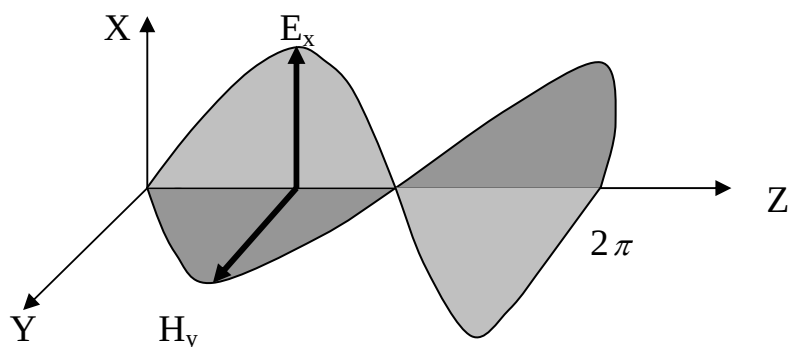


Рисунок 5.1. Структура электромагнитного поля плоской однородной волны

Исходя из аналитического и графического представления системы уравнений (5.24) можно определить основные характеристики электромагнитного поля:

- электромагнитная волна обладает поляризацией (пространственная ориентация плоскости колебаний вектора $\mathbf{E}$), и вид поляризации (линейная, круговая, эллиптическая) зависит от фазовых соотношений φ_1 и φ_2 компонент поля $\mathbf{E}_x$ и $\mathbf{H}_y$;
- коэффициент затухания α , определяющий уменьшение амплитуды электромагнитной волны при прохождении одного метра пути (дБ/м), находится по выражению:

$$\alpha = 8,68\omega \sqrt{\frac{\varepsilon_a \mu_a}{\cos \delta \cdot \sin \frac{\delta}{2}}}; \quad (5.25)$$

- коэффициент фазы β определяет изменение фазы волны при прохождении одного метра пути (рад/м) и равен

$$\beta = \sqrt{\frac{\varepsilon_a \mu_a}{\cos \delta \cdot \cos \frac{\delta}{2}}}; \quad (5.26)$$

- фазовая скорость - скорость перемещения фронта гармонической волны:

$$v_{\phi 0} = 1 / \sqrt{\frac{\varepsilon_a \mu_a}{\cos \delta \cdot \sin \delta / 2}} ; \quad (5.27)$$

• длина волны λ - расстояние, пройденное волной за период колебания:

$$\lambda = 2 \pi / \beta ; \quad (5.28)$$

• характеристическое сопротивление волны Z_c - величина, определяемая отношением поперечной составляющей напряженности электрического поля E_x к поперечной составляющей напряженности магнитного поля H_y бегущей волны:

$$Z_c = E_x / H_y = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \quad (5.29)$$

Значение δ во всех формулах определяется из выражения (5.8).

Рассмотрим свойства диэлектриков с точки зрения характеристик электромагнитной волны.

ДИЭЛЕКТРИКИ С БОЛЬШИМИ ПОТЕРЯМИ ($\operatorname{tg} \delta$ близок к единице).

К таким диэлектрикам относятся: питьевая и морская вода, окислы металлов и др. Расчеты основных характеристик электромагнитного поля ведутся по формулам (5.25 - 5.29). Анализ показывает, что:

- диэлектрики с большими потерями являются диспергирующими (скорость распространения волны зависит от частоты);
- характеристики волны зависят от частоты;
- коэффициент затухания имеет большую величину;
- характеристическое сопротивление имеет комплексный характер, при этом вектор H отстает по фазе от вектора E на $\delta / 2$.

ДИЭЛЕКТРИКИ БЕЗ ПОТЕРЬ ($\operatorname{tg} \delta = 0$; $\alpha = 0$).

Свойствами таких диэлектриков обладает вакуум и в какой-то мере воздух. Соотношения для расчета основных характеристик электромагнитной волны приводятся к виду [20]:

$$\left. \begin{aligned} v_{\phi 0} &= 1 / \sqrt{\varepsilon_a \mu_a} = C / \sqrt{\varepsilon \mu} ; \\ \lambda &= 2 \pi / \omega \sqrt{\varepsilon_a \mu_a} ; \\ Z_c &= \sqrt{\mu_a / \varepsilon_a} = Z_{c0} \sqrt{\mu / \varepsilon} = 377 Z_{c0} \sqrt{\mu / \varepsilon} , \end{aligned} \right\} \quad (5.30)$$

где $Z_{c0} = 377 \text{ Ом}$ - характеристическое сопротивление плоской волны в вакууме; C - скорость света.

Анализируя эти уравнения, можно отметить характерные свойства плоских электромагнитных волн в диэлектриках без потерь:

- отсутствие затухания;
- нет дисперсии (отсутствие зависимости скорости распространения от частоты);
- скорость распространения равна скорости света;
- отсутствие зависимости характеристического сопротивления от частоты;
- отсутствие временного фазового сдвига между векторами E_x и H_y .

ДИЭЛЕКТРИКИ С МАЛЫМИ ПОТЕРЯМИ ($\text{tg } \delta < 10^{-2}$).

Свойствами таких диэлектриков обладают все диэлектрики, используемые в радиотехнике (полиэтилен, фторопласт, текстолит, керамика и др.). Для расчетов основных характеристик электромагнитной волны используют соотношение (5.30), учитывая, что:

$$\alpha_{\varepsilon} = 27,3 \sqrt{\varepsilon} \text{ tg } \delta / \lambda_0. \quad (5.31)$$

МЕТАЛЛЫ ($\text{tg } \delta \gg 1$)

Для расчета основных характеристик волны используют следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \beta = \sqrt{\pi f \mu_a \sigma}; \\ v_{\phi 0} &= \omega / \beta = 2 \sqrt{\pi f / \mu_a \sigma}; \\ \lambda &= 2 \pi / \beta = 2 \sqrt{\pi / f \mu_a \sigma}; \\ Z_c &= \sqrt{i \omega \mu_a / \sigma}, \end{aligned} \right\} \quad (5.32)$$

где f - частота электромагнитной волны.

Таким образом, в металлах основные свойства электромагнитного поля заключаются в следующем:

- коэффициент фазы и коэффициент затухания равны между собой;
- реактивная и активная составляющие характеристического сопротивления равны между собой;
- вектор $\mathbf{H}$ отстает по фазе от вектора $\mathbf{E}$ на угол 45° ;
- основные характеристики на несколько порядков отличаются от соответствующих характеристик в диэлектриках;
- амплитуды волн вдоль направления распространения резко уменьшаются.

Ввиду того, что амплитуда волны в металле резко падает, это свойство металлов принято оценивать глубиной проникновения.

Глубина проникновения δ_c - это расстояние, при котором электрическое поле ослабевает в $e = 2,72$ раз. Эта характеристика определяется выражением:

$$\delta_c = 1/\alpha = 1/\sqrt{\pi f \mu_a \sigma}. \quad (5.33)$$

Глубина проникновения зависит от частоты: чем больше частота, тем меньше глубина проникновения, и тем меньше, чем больше значение магнитной проницаемости.

Из выражений (5.33) и (5.34) следует, что напряженность переменного электромагнитного поля внутри металла, а следовательно, и плотность тока экспоненциально убывают по мере удаления от поверхности раздела сред, что создает концентрацию токов (особенно на высоких частотах) возле поверхности металла. Это явление называют поверхностным эффектом или **скин-эффектом**. Влияние скин-эффекта на практике приводит к следующим явлениям:

- поверхностное сопротивление металла Z_s равно его характеристическому сопротивлению Z_0 :

$$Z_s = Z_0 = (1+i) \sqrt{\pi f \mu_a / \sigma}; \quad (5.34)$$

- активная составляющая поверхностного сопротивления R_s равна реактивной составляющей X_s :

$$R_s = X_s = \sqrt{\pi f \mu_a / \sigma}, \quad (5.35)$$

при толщине пластины (пленки) более δ_c не зависит от самой толщины и равна сопротивлению аналогичной пластины (пленки) толщиной δ_c на постоянном токе;

- скин-эффект уменьшает эффективное сечение проводника, являясь причиной повышения его активного сопротивления и затухания. На высоких частотах оно может во много раз превышать сопротивление провода при постоянном токе.

Поверхностный эффект тем заметнее, чем больше радиус провода, вследствие этого центральная часть провода практически не используется.

Явление скин-эффекта позволяет использовать металлические экраны для защиты различных элементов, узлов, блоков и электрических цепей от влияния на них переменного электрического поля. Если экран полностью охватывает объект, а его толщина составляет несколько глубин проникновения, то внешнее (внутреннее) электромагнитное поле сквозь него не проникает. Если экран имеет щели, отверстия или неплотное прилегание к корпусу, то электромагнитное поле будет проникать за экран за счет дифракции волн. Кроме того, в случае постоянных и низкочастотных полей металлический экран не пропускает электрическое поле, но пропускает магнитное поле, если он выполнен из парамагнитного или диамагнитного металла.

Таким образом, мы рассмотрели основные принципы электродинамики и физические явления, происходящие в различных средах при воздействии электромагнитного поля. Все эти явления и процессы лежат в основе методов обеспечения защиты информации от утечки по техническим каналам и обеспечения ЭМС РЭС.

5.6. Конструирование электромагнитных экранов

Для снижения уровней ЭМП и обеспечения ЭМС применяются следующие основные методы:

- рациональная компоновка (оптимальное пространственное размещение и ориентация);
- экранирование;
- фильтрация;
- заземление;
- компенсация.

К экранам, помимо требования обеспечения эффективности экранирования, предъявляются дополнительные требования, связанные с особенностями РЭС/8/:

- экран является внешним кожухом РЭС и, исходя из общего ТЗ, при его проектировании должны учитываться требования обеспечения нормального теплового режима, пыле- и влагозащиты, устойчивости к механическим воздействиям, эргономики, технологичности, ремонтпригодности и др.;
- при экранировании отдельных элементов и узлов форма и размеры этих элементов определяют конструкцию экрана. При этом экран должен компоноваться в общем устройстве и обеспечивать минимальную реакцию на экранируемый объект, а также нормальный тепловой режим элементов и узлов РЭС, ремонтпригодность и т.д.;
- экран проектируется как самостоятельное сооружение в случае защиты от внешних ЭМП или локализации излучений аппаратуры или целого радиоэлектронного комплекса, для специальных радиотехнических измерений, а также для настройки и регулировки аппаратуры (безэховые камеры).

Необходимо отметить, что экранирование является одним из эффективных средств защиты и повышения стойкости РЭС к действию мощного ЭМИ, возникающего при ядерных взрывах, а также грозовых разрядах.

5.6.1. Структура помехонесущих электромагнитных полей

Как известно, в РЭС применяются функциональные узлы (ФУ) различного назначения, которые могут работать в линейном и нелинейном

режимах, различных частотных диапазонах, иметь различную мощность, восприимчивость, конструкцию и т.д. Это приводит к образованию ЭМП и их переносу электромагнитным и **кондуктивным** (гальваническим) путем. В этом случае ФУ, не предназначенные для генерации и излучения, могут иметь небольшие эквивалентные действующие высоты при рассмотрении их как передающих антенн. Действующие высоты этих источников ЭМП увеличиваются с ростом частоты.

В общем случае ФУ РЭС можно представить в виде совокупности элементарных электрических и магнитных излучателей (диполей), к которым относятся электрический вибратор (диполь Герца), электрическая рамка (магнитный диполь), элементарная щель и излучатель Гюйгенса. При этом электрическими диполями являются цепи аппаратуры с большим сопротивлением, высоким напряжением и малым током, а магнитными диполями - цепи с низким сопротивлением, большим током и малым перепадом напряжения.

На основании принципа суперпозиции можно считать, что все множество различных элементарных излучателей, в которых протекают случайные токи с различными временными параметрами, возбуждаются синусоидальными токами, являющимися гармониками общего тока, и действие каждой гармоники можно рассматривать отдельно.

Физические свойства помехонесущего электромагнитного поля различны в дальней и ближней зонах. В дальней (волновой) зоне ($r \gg \lambda_0/2\pi$) структура поля элементарных электрического и магнитного излучателей совпадает со структурой поля однородной плоской волны, у которой в любой точке пространства векторы напряженности электрического и магнитного полей синфазны, ортогональны друг другу и направлению излучения, а характеристическое сопротивление среды (воздуха) $Z_{с0} = 120\pi$.

В ближней зоне (на расстоянии $r \ll \lambda_0/2\pi$) отсутствует излучение, т.к. поле носит квазистационарный характер (см. раздел 5.5). В этом случае для элементарного электрического излучателя электромагнитное поле определяется (из уравнений Максвелла) /20/:

$$\left. \begin{aligned} E_r &= -iI_e l \cos \Theta / 2\pi \omega \varepsilon_a r^3; \\ E_\Theta &= -iI_e l \sin \Theta / 4\pi \omega \varepsilon_a r^3; \\ H_\varphi &= I_e l \sin \Theta / 4\pi r^2, \end{aligned} \right\} \quad (5.36)$$

где I_e - амплитуда тока, протекающего вдоль вибратора;

l - длина вибратора;

r - расстояние от точки наблюдения до вибратора;

Θ - угол между продольной осью вибратора и точкой наблюдения.

Используя принцип инвариантности (независимость представления от преобразования системы координат) уравнений Максвелла, можно показать, что поле магнитного излучателя в ближней зоне получается заменой E , H , ε_a и I_e на $-H$, E , μ_a и I_m соответственно:

$$\left. \begin{aligned} H &= -iI_m l \cos \Theta / 2 \pi \omega \varepsilon_a r^3; \\ H &= -iI_m l \cos \Theta / 2 \pi \omega \varepsilon_a r^3; \\ E &= I_m l \sin \Theta / 4 \pi r^2, \end{aligned} \right\} \quad (5.37)$$

где I_m - магнитный ток, величина которого определяется напряжением, действующим по периметру элементарного магнитного вибратора. Анализируя выражения (5.36) и (5.37), можно сделать следующие выводы:

- структура поля элементарных электрического и магнитного излучателей отличается взаимным изменением положения векторов E и H ;
- поля ближней зоны элементарных электрических и магнитных диполей существенно неравномерны, а их интенсивности быстро убывают обратно пропорционально кубу и квадрату расстояния соответственно;
- составляющие напряженностей электрического и магнитного полей в ближней зоне сдвинуты по фазе на 90° . Поэтому вектор Пойтинга – чисто мнимая величина с нулевым средним значением, а рассматриваемые поля являются реактивными. В результате *перенос помех в ближней зоне происходит за счет электрической и магнитной индукции*;
- вблизи элементарного электрического диполя создается электромагнитное поле, основная энергия которого сосредоточена в электрической составляющей (электрическое поле);
- характеристическое сопротивление среды полю элементарного электрического диполя в ближней зоне в соответствии с (5.36)

$$Z_e = E_\theta / H_\varphi = 1/i \omega \varepsilon_a r; \quad (5.38)$$

- вблизи элементарного магнитного диполя создается электромагнитное поле, основная энергия которого сосредоточена в магнитной составляющей (магнитное поле);
- характеристическое сопротивление среды полю магнитного диполя в ближней зоне в соответствии с (5.37)

$$Z_H = E_\varphi / H_\theta = -i \omega \mu_a r; \quad (5.39)$$

- характеристическое сопротивление Z_e с увеличением расстояния от него уменьшается, а Z_H увеличивается, и оба стремятся к значению $Z_{C0} = 120 \pi = 377$ Ом, достигая его в дальней зоне при $r \gg \lambda_0 / 2 \pi$.

График зависимостей Z_e и Z_H от расстояния приведен на рисунке 5.2.

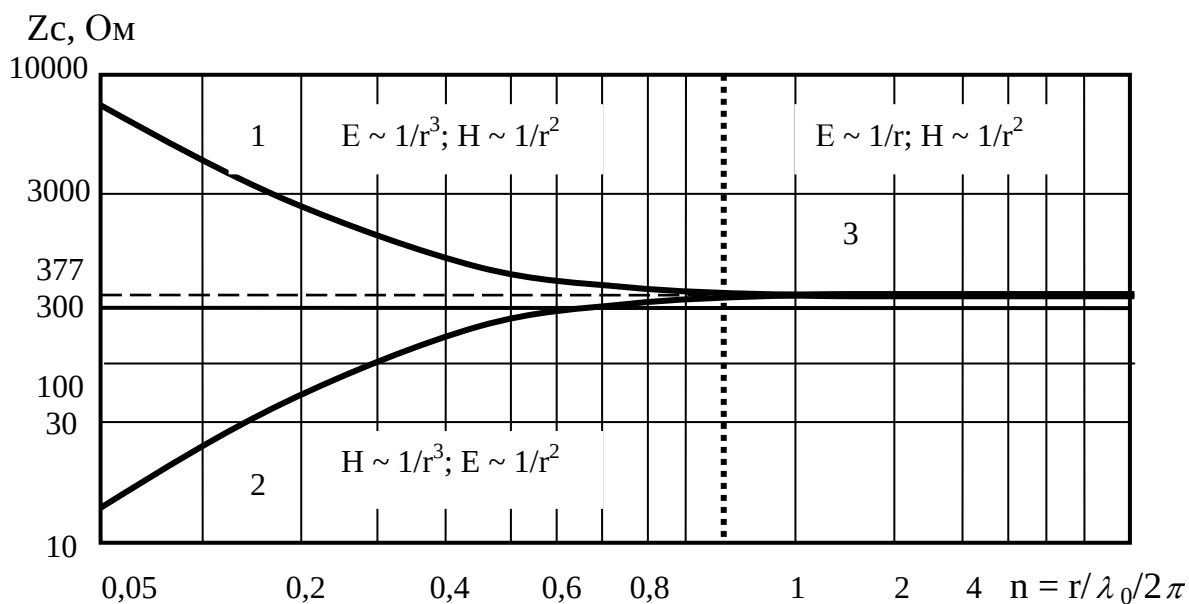


Рисунок 5.2. Зависимость характеристического сопротивления среды электромагнитному полю от расстояния до элементарного излучателя

1 - поле электрического диполя в ближней зоне; 2 - поле магнитного диполя в ближней зоне; 3 - поле электрического и магнитного диполей в дальней зоне

В соответствии с рассмотренными особенностями электромагнитного поля в дальней и ближней зонах экраны, предназначенные для его ослабления, делятся на электромагнитные (ЭМЭ), электростатические (ЭСЭ) и магнитостатические (МСЭ). Как мы уже отмечали, при расчете ЭМЭ используется теория электромагнитного поля, основанная на решении уравнений Максвелла. Для анализа экранов, предназначенных для работы в ближней зоне, т.е. существующих отдельно электрических и магнитных полей, применяют более простые методы (основанные на решениях уравнения Максвелла для частных случаев) с использованием представлений о взаимных емкостях и индуктивностях между экранируемыми друг от друга элементами.

В пределах одного устройства выполняется в большинстве случаев (исключение – ВЧ и СВЧ аппаратура) условие ближней зоны электромагнитного поля ($r \ll \lambda_0/2\pi$).

5.6.2. Виды и сущность электромагнитного экранирования

В общем случае экранирование РЭС осуществляется электромагнитными экранами, но, как отмечалось выше, в зависимости от ЭМО различают три вида экранирования - ЭМЭ, ЭСЭ и МСЭ.

Рассмотрим сущность экранирования для низких и средних частот.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ. В основе ЭСЭ лежит явление электростатической индукции. Исходя из уравнений Максвелла для электростатики (5.13) и свойств материальных сред, явление электрической индукции заключается в явлении поляризации зарядов в проводнике под действием внешнего электрического поля. В этом случае электроны перемещаются в сторону положительного потенциала и на части проводника, обращенной к положительному потенциалу, возникает отрицательный потенциал, а противоположная часть поверхности проводника окажется заряжена положительно. Вследствие этого внутри проводника возникает свое вторичное поле, равное по величине внешнему полю и противоположное ему по направлению. Таким образом, внешнее и вторичное поля компенсируют друг друга во всех точках внутри тела проводника и на его поверхности. Внутри проводника поле отсутствует, а заряды распределены только на поверхности проводника. Следовательно, если внутри металлического тела поместить устройство, то оно будет защищено от воздействия внешнего электростатического поля. В силу взаимности электрическое поле самого устройства будет отсечено от внешнего пространства. Однако в обоих случаях экран необходимо подключить к земле (корпусу) для того, чтобы заряды с внешней оболочки экрана стекли на корпус, и поле вне (внутри) оболочки станет равным нулю.

Таким образом, ЭСЭ, по существу, сводится к замыканию электростатического поля на поверхность экрана и отводу электрических зарядов с него на землю. Заземление ЭСЭ является необходимым условием эффективности экранирования.

Если металлический экран полностью компенсирует влияние электростатического поля, то диэлектрический экран ослабляет поле в ε раз (ε - относительная диэлектрическая проницаемость материала). В этом случае устройство, которое необходимо защитить от электростатических полей, размещают внутри самого диэлектрика, например, в спирте ($\varepsilon = 26$), трансформаторном масле ($\varepsilon = 2,2$) или дистиллированной воде ($\varepsilon = 81$). При использовании твердых диэлектриков необходимо, чтобы он плотно прилегал к экранируемому устройству. Если источник ЭДС является переменным, то и распределение зарядов на оболочке экрана будет меняться с этой же частотой. В результате по экрану потечет переменный ток. Компенсация поля в этом случае будет неполной (за счет падения напряжения на стенках). Поэтому эффективность экранирования зависит от толщины стенок и от проводимости материала экрана.

Чаще всего экраны представляют собой замкнутые объемы, металлические перегородки, соединенные с корпусом прибора. Перфорированные и сетчатые экраны не обеспечивают полного экранирования, т.к. часть энергии просачивается внутрь экранируемого объема.

МАГНИТОСТАТИЧЕСКОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ. В основе МСЭ лежит эффект замыкания магнитного поля в толще экрана за счет его большей магнитопроводности по сравнению с окружающей средой. Если внести в однородное магнитное поле замкнутый контур из магнитопроводного железа, то силовые линии магнитного поля замкнутся в толще железа и внутри контура магнитное поле резко уменьшится (рисунок 5.3).

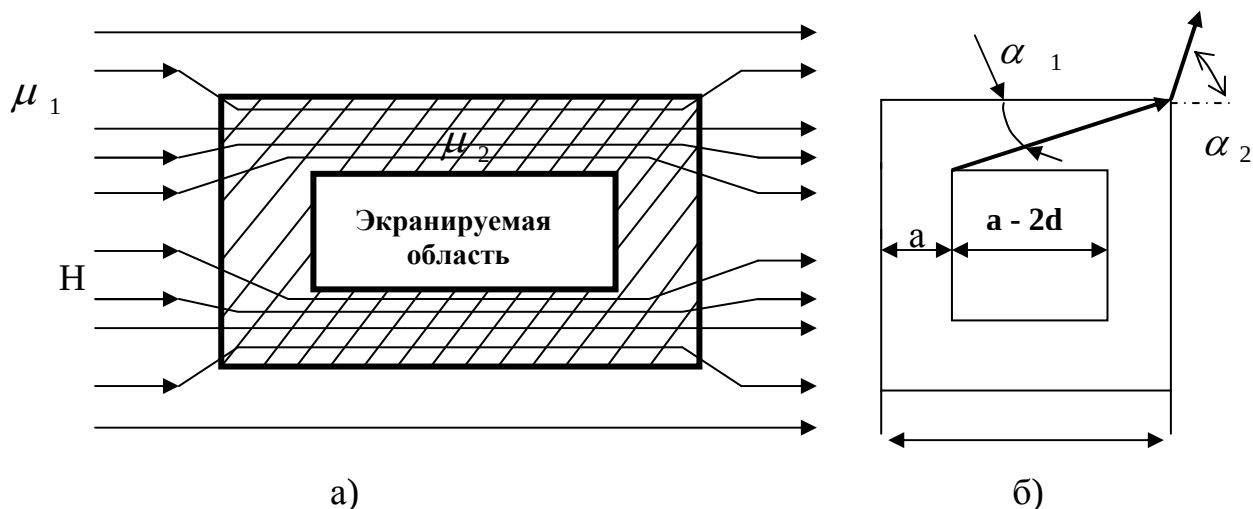


Рисунок 5.3. Принцип магнитостатического экранирования

Изменение направления магнитного потока на границе раздела сред (рисунок 5.3,б) с различными магнитными проницаемостями ($\mu_1 < \mu_2$) определяется выражением

$$\operatorname{tg} \alpha_1 / \operatorname{tg} \alpha_2 = \mu_2 / \mu_1. \quad (5.40)$$

Практически можно считать, что если $\mu_2 / \mu_1 \rightarrow \infty$, то угол стремится к 90° , а магнитный поток выходит из поверхности под прямым углом.

Таким образом, мы определили виды и сущность ЭСЭ и МСЭ. Сущность ЭМЭ мы рассмотрим одновременно с расчетом электромагнитных экранов.

5.6.3. Основные характеристики экранов

Экранирование как техническое мероприятие призвано подавить до требуемого уровня влияние ЭМП. Определение назначения экрана в каждом отдельном случае производится с учетом характера источника помех и чувствительности к ним элементов РЭС.

Для оценки функциональных качеств экрана используются различные характеристики. Наиболее обобщенные и установившиеся - это эффективность экранирования (ЭЭ) и коэффициент реакции экрана.

Под эффективностью экранирования понимают отношение действующих значений напряженности электрического поля E (магнитного H) в данной точке при отсутствии экрана к напряженности электрического поля E (магнитного поля H) в той же точке при наличии экрана:

$$\mathcal{E}_e = E_1/E_2; \quad \mathcal{E}_h = H_1/H_2. \quad (5.41)$$

Эффективность в этом случае выражается в относительных единицах (разах). На практике удобнее выражать ЭЭ в логарифмических единицах - децибелах [дБ].

$$\mathcal{E}_e = 20 \lg (E_1/E_2); \quad \mathcal{E}_h = 20 \lg (H_1/H_2). \quad (5.42)$$

В некоторых случаях существует необходимость оценить общую ЭЭ, исходя из допустимых величин ЭДС помехи наводимой в цепях РЭС. В этом случае пользуются понятием эквивалентной действующей высоты устройства (по аналогии с действующей высотой антенны), которая характеризует как бы действующую высоту экрана:

$$h_0 = U_h/E_1, \quad (5.43)$$

где U_h - действующее значение ЭДС помехи, наводимой внутри экрана, В;
 E_1 - действующее значение напряженности внешнего поля, В/м.

Учитывая, что ЭДС помехи пропорциональна напряженности поля внутри экрана, можно записать [21]:

$$h_0 = \alpha E_2/E_1 = \alpha / \mathcal{E}_e. \quad (3.44)$$

Второй характеристикой качества экрана является мера его воздействия на параметры экранируемых элементов, определяемая количественно коэффициентом реакции экрана. Это необходимо учитывать при электромагнитном экранировании, т.к. внутри экрана происходит отражение электромагнитной энергии от стенок экрана и возникает взаимодействие между экраном и экранируемым устройством. Из-за перераспределения полей внутри экрана происходит изменение первичных параметров элементов (меняется первичная индуктивность катушек, увеличивается емкость контуров, возрастает активное сопротивление, что ведет к частотной расстройке и изменению добротности колебательных контуров, потерям и т.д.). Относительные изменения параметров можно учесть следующим выражением:

$$P_{ij} = 1 - A_{zij} / A_{oij}, \quad (5.45)$$

где A_{zij} - значение i -го параметра j -го экранируемого элемента при наличии экрана;

A_{oij} - значение первичного i -го параметра j -го элемента без экрана.

Задаваясь допустимыми пределами изменения параметров и зная размеры экранируемых элементов, можно определить габаритные размеры экрана, материал экрана и условия размещения элементов внутри него.

В качестве примера рассмотрим расчет экрана катушки индуктивности с учетом реакции экрана на экранируемую катушку. При конструировании таких экранов приходится решать одну из двух задач:

- по заданным размерам каркаса катушки и начальной индуктивности L_0 определить геометрические характеристики и материал экрана;
- по заданным размерам и материалу экрана, а также начальной индуктивности L_0 определить диаметр каркаса катушки, ее длину и шаг намотки.

Размер экрана определяют исходя из того, что начальная индуктивность катушки может быть уменьшена не более чем на 5-20% или что потери не должны превышать 0,5-1,0% колебательной мощности. Это достигается соответствующим выбором материала экрана и отношения диаметров катушки и экрана ($D/D_0 = 0,45-0,6$). Для мощных колебательных контуров принимают

$$D/D_0 < 0,45.$$

Коэффициент обратного действия экрана (реакция экрана) определяется по выражению [22]:

$$W = \left. \begin{aligned} & \frac{2(2Rd/3\delta^2)^2}{1 + (2Rd/3\delta^2)^2} \quad \text{для } d < \delta \quad (\text{низкая частота}), \\ & 2 - 3\delta/R \quad \text{для } d > \delta \quad (\text{высокая частота}), \end{aligned} \right\} \quad (5.46)$$

где d - толщина экрана; δ - глубина проникновения; R - радиус цилиндрической части экрана.

Вносимое активное сопротивление оболочки экрана можно вычислить по следующей формуле:

$$R = \left. \begin{aligned} & 3N^2 F^2 / 2dR \quad \text{для } d < \delta, \\ & 3NF / 2R \quad \text{для } d > \delta. \end{aligned} \right\} \quad (5.47)$$

Вносимая индуктивность определяется выражением

$$L_h = - \frac{\mu_0 N^2 F^2}{2\pi R} W, \quad (5.48)$$

где N - число витков катушки; F - средняя площадь сечения витка.

Сравним значение вносимой индуктивности L_h с индуктивностью L_0 катушки без экрана. Индуктивность катушки без экрана определяется:

$$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 F}{l} \cdot \Phi, \quad \text{если } D = l, \quad (5.48)$$

где - $\Phi = 0,7$; l - длина катушки; D - диаметр катушки.

$$\text{В случае, если } l < 0,4D, \text{ то } \Phi = \frac{1}{1 + 0,45 D / l}.$$

Тогда относительное уменьшение индуктивности из-за действия экрана определится соотношением:

$$\frac{L_h}{L_0} = \frac{2V_k}{3\Phi V_{\text{экp}}} = \frac{V_k}{4R\Phi}, \quad (5.49)$$

где V_k - объем катушки; $V_{\text{экp}}$ - объем экрана.

5.6.4. Расчет и конструирование электростатических экранов

Функциональные узлы и элементы РЭС, несущие большие напряжения с малыми токами, создают в ближней зоне электромагнитные поля с преобладанием электрической составляющей напряженности поля. В этом случае перенос помех осуществляется (как мы уже отмечали) за счет электрической индукции.

Рассмотрим электрическую связь источника помех (ИП) и рецептора помех (РП) (рисунок 5.4,а) с помощью схемы замещения (рисунок 5.4,б) $C_{\text{св}}/21/$.

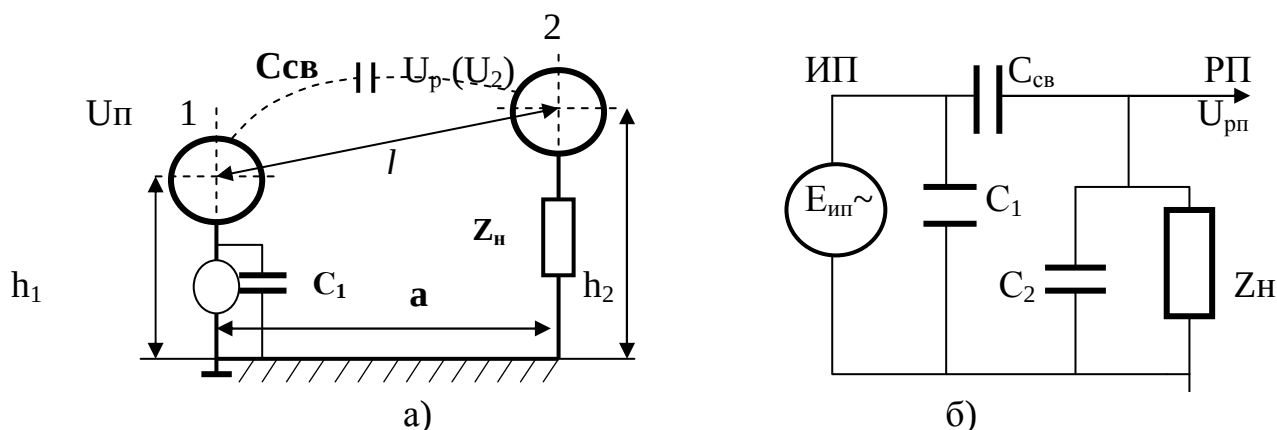


Рисунок 5.4. Схема переноса помех

В этом случае действие помехи проявляется за счет возникающей емкостной связи $C_{\text{св}}$.

Здесь U_1 - напряжение, созданное ИП на элементе 1;

U_2 - ЭДС, наводимая элементом 1 на элемент 2;

C_1 - емкость ИП относительно корпуса;

C_2 - емкость РП относительно корпуса;

Z - комплексное сопротивление РП относительно корпуса, состоящее из C и $Z_{\text{вх}}$.

Т.к. практически всегда $|Z_{\text{вх}}| \ll 1/C_{\text{св}}$, то напряжение помех в рецепторе составляет:

$$U_p = E_{\text{и}} i \omega C_{\text{св}} Z_{\text{вх}}, \quad (5.50)$$

а в этом случае

$$U_p = E_{\text{и}} i \omega C_{\text{св}} R. \quad (5.51)$$

Для определения влияния конструктивных параметров на перенос помех путем электрической индукции необходимо знать величину $C_{\text{св}}$ между элементами конструкции, полагая, что расстояния между ними много больше чем до других тел и $C_{\text{св}} \ll C_1$ и C_2 . В соответствии с (5.51) и учитывая, что его можно записать в соответствии с законом Кулона в виде

$$U_2 = \frac{e_u C_1}{4 \pi \epsilon_0 l},$$

получим

$$C_{\text{св}} = \frac{C_1 C_2}{4 \pi \epsilon_0 l}. \quad (5.52)$$

Емкость связи с учетом шасси определяется выражением [7]

$$C_{\text{св}} = \frac{C_1 C_2}{4 \pi \epsilon_0 l} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{(h_1 - h_2)^2}{a^2} \right]}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(h_1 + h_2)^2}{a^2}}} \right]. \quad (5.53)$$

Емкости шара, диска радиусом r определяются выражениями:

$$C_{\text{ш}} = 4 \pi \epsilon_0 r; \quad C_{\text{д}} = 8 \epsilon_0 r. \quad (5.54)$$

Емкость цилиндра длиной l и радиусом r ($l \gg r$) определяется

$$C_{\text{ц}} = \frac{2 \pi \epsilon_0 l}{\ln (2 l / r)}. \quad (5.55)$$

В РЭС широко распространен случай параллельного расположения проводов. В этом случае ЭДС, наводимую на РП, можно оценить отношением

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{2 h_1 h_2}{a^2 \ln \left(\frac{2 h_1}{r} \right)}, \quad (5.56)$$

где a - расстояние между проводниками; r - радиус проводника.

Величина $C_{св}$ при этом будет равна

$$C_{св} = \frac{\pi \varepsilon_0 l}{\ln \left(\frac{a}{r} \right)}, \quad (5.57)$$

где l - длина проводника.

Рассмотрим влияние электрической связи в устройствах цифровой обработки информации, определяемой конечной длиной сигнальных проводников (рисунок 5.5).

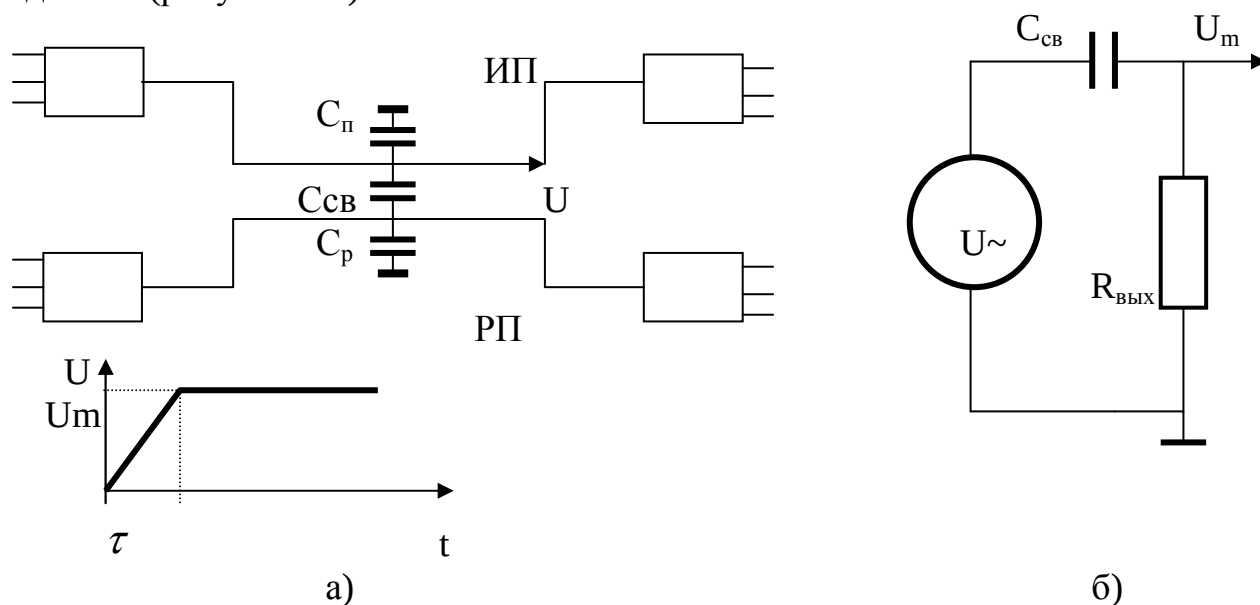


Рисунок 5.5. Перенос помех емкостным путем в цифровых схемах

Учитывая, что постоянная времени $\tau_0 = C_{св} R_{\text{вых}}$ мала, напряжение помехи на входе микросхемы определяется приближенно

$$U_n = \frac{C_{св} R_{\text{вых}} U_m}{\tau} = \frac{U_m}{\tau}, \quad (5.58)$$

где U_m и τ - амплитуда и длительность фронта импульса напряжения ИП.

Таким образом, необходимо ограничивать $C_{св}$ для того, чтобы избежать ложные срабатывания микросхемы. Для ослабления электрической связи в РЭС (исходя из приведенных результатов) необходимо:

- максимально разносить цепи РП и ИП, т.е. уменьшать $C_{св}$;

- компоновать цепи РП и ИП так, чтобы $C_{св}$ между ними была минимальной (например, располагать проводники РП и ИП под углом близким к 90°);
- уменьшать размеры цепей ИП и РП, что приводит к уменьшению $C_{св}$;
- применять дифференциальное включение рецептора помех для снижения емкостных синфазных помех.

В случае, если эти мероприятия не привели к желаемому результату, необходимо применять электростатическое экранирование.

Основной задачей электростатического экрана является снижение емкостной связи между экранируемыми элементами. Рассмотрим вариант размещения плоского незамкнутого ЭСЭ для ситуации, приведенной на рисунке 5.2 (рисунок 5.6).

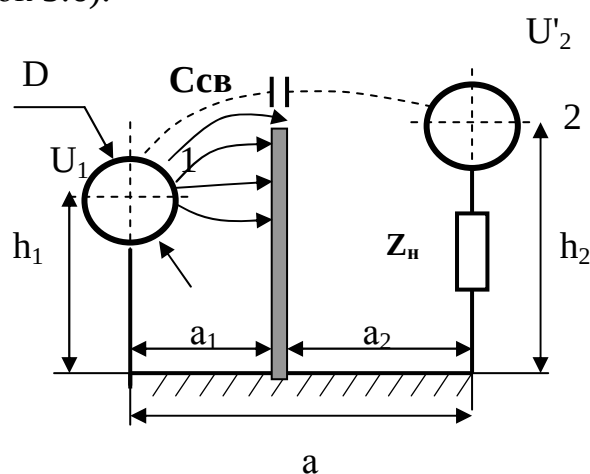


Рисунок 5.6. Схема ослабления электрической связи ЭСЭ

Ориентировочно ЭЭ такого экрана можно оценить по формуле /21/

$$\mathcal{E} = \frac{U_2}{U'_2} = \frac{C_{св}}{C'_{св}} = \frac{5R_3^2}{aa_1a_2}, \quad (5.59)$$

где $R_3 = 0,5$ высоты или длины плоского экрана.

В общем случае для всех видов экранов

$$R_3 = 0.62 \sqrt[3]{V}, \quad (5.59,a)$$

где V - объем экрана - эквивалентный радиус экрана.

Максимальный эффект экранирования достигается (5.59) при условии $a_1 > a_2$ или $a_1 > a_2$. Общее затухание, вносимое экраном (за счет разности элементов и действия самого экрана), характеризуется коэффициентом связи $K_{св}$

$$K_{св} = \frac{U_2}{U_1} = 0,4 \frac{h_1 h_2 a_1 a_2}{a R_3^3 \ln(4h_1/D)}. \quad (5.60)$$

Чем меньше $K_{св}$, тем больше развязка между ИП и РП.

Анализируя полученные результаты, можно выделить основные требования, предъявляемые к электростатическим экранам:

- конструкция экрана должна быть такой, чтобы силовые линии электрического поля замыкались в основном на стенки экрана, не выходя за его пределы (рисунок 5.6);
- в области низких частот (до 10 кГц) эффективность ЭСЭ определяется качеством электрического контакта экрана с корпусом прибора и мало зависит от толщины и материала экрана;
- в области средних и высоких частот (выше 10 кГц) эффективность экрана, работающего в электромагнитном режиме, определяется его толщиной, проводимостью и магнитной проницаемостью.

5.6.5. Расчет и конструирование магнитостатических экранов

Функциональные узлы и элементы РЭС, несущие большие токи с малым перепадом напряжения, создают в ближней зоне электромагнитные поля с преобладанием магнитной составляющей.

Рассмотрим магнитную связь двух электрических цепей, величина которой зависит от их взаимной индуктивности M , определяемой индуктивностями ИП $L_{и}$ и РП $L_{р}$ (рисунок 5.7). Здесь на этом рисунке: $Z_{и}$, $Z_{р}$ - внутренние сопротивления цепей ИП и РП; $Z_{ни}$, $Z_{нр}$ - сопротивления нагрузки ИП и РП.

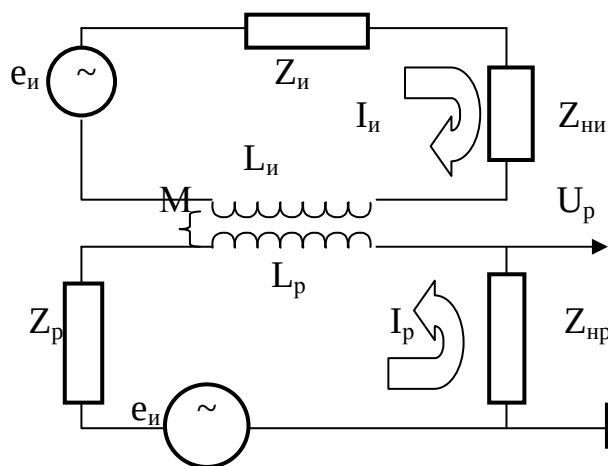


Рисунок 5.7. Схема индуктивной связи

В этом случае

$$M = K_{св} \sqrt{L_{и} L_{р}} . \quad (5.61)$$

Если в цепи ИП протекает ток $I_{и}$, то в цепи РП будет наводиться ЭДС

$$e = -i \omega M I_u, \quad (5.62)$$

которая в цепи РП вызовет ток I_p

$$I_p = \frac{-i \omega M I_u}{i \omega L_p + Z_p + Z_{np}}. \quad (5.63)$$

В результате наведенная ЭДС на сопротивлении нагрузки рецептора равна

$$U_{pn} = \frac{-i \omega M Z_{np}}{i \omega L_p + Z_p + Z_{np}}. \quad (5.64)$$

В области низких частот ($L_p \ll |Z_p + Z_{np}|$)

$$U_{pn} = \frac{-i M Z_{np} I_u}{Z_p + Z_{np}}, \quad (5.65)$$

т.е. напряжение помехи увеличивается с ростом частоты.

В области достаточно высоких частот ($L_p \gg Z_p + Z_{np}$)

$$U_{pn} = \frac{M Z_{np} I_u}{L_p}, \quad (5.66)$$

т.е. это напряжение ограничивается самоиндукцией.

Рассмотрим влияние магнитной связи, определяемой конечной длиной сигнальных проводников в устройствах цифровой обработки (рисунки 5.8).

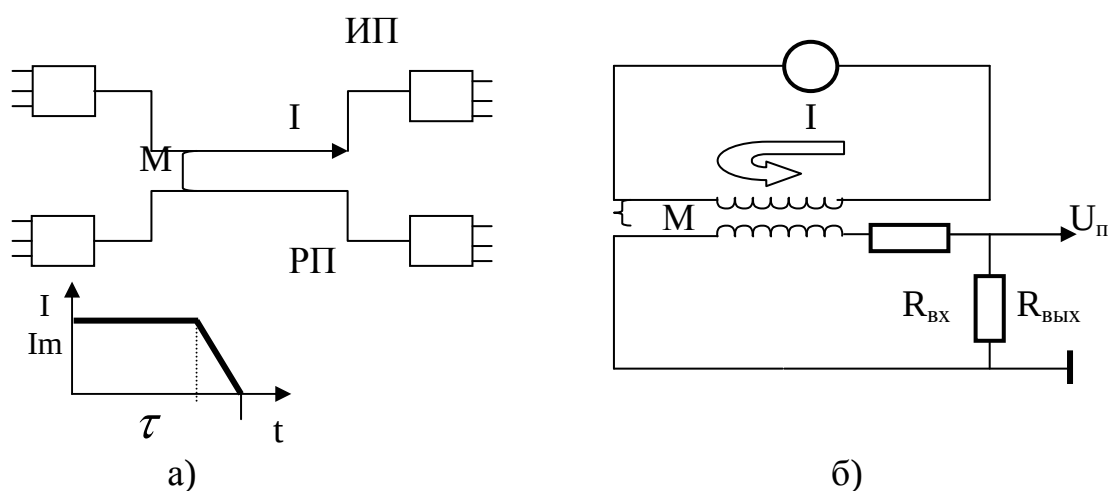


Рисунок 5.8. Перенос помех индуктивным путем в цифровых схемах

Полагая, что импульсный ток при переключении ИС изменяется линейно и $R_{вх} \gg R_{вых}$,

$$U_n = \frac{MI_m}{\tau} \cdot \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{вых}}} = \frac{MI_m}{\tau}, \quad (5.67)$$

где I_m - амплитуда импульса тока;

τ - длительность среза фронта импульса.

Очевидно, что при конструировании необходимо ограничивать величину магнитной связи во избежание ложного срабатывания цифровых схем.

Для определения влияния конструктивных параметров на величину магнитной связи рассмотрим распространенный случай воздействия ИП в провода длиной l' и током I_n на РП в виде замкнутого контура цепи, длиной $l \ll l'$, шириной h и находящегося на расстоянии d от ИП в плоскости, перпендикулярной помехонесущему магнитному полю (рисунок 5.9).

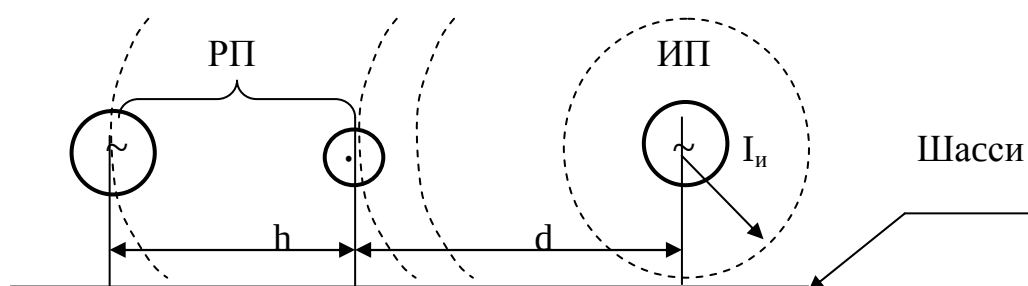


Рисунок 5.9. Индуктивная связь между проводниками

Считаем, что шасси изготовлено из немагнитного материала и не влияет на характер магнитного поля. Магнитный поток, пронизывающий контур РП, определяется

$$\Phi = \int_d^{d+h} \mu_a H \cos \Theta l dr = \mu_a I_n l \ln[(d+h)/d] \cos \left(\frac{\Theta}{2\pi} \right), \quad (5.68)$$

где Θ - угол между вектором Φ и нормалью к плоскости контура РП.

Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС, наведенная в цепи РП

$$e_m = \mu_a l f I_n \ln[(d+h)/d] \cos \Theta. \quad (5.69)$$

Для случая, приведенного на рисунке 5.9, величина взаимной индуктивности цепей ИП и РП определяется

$$M = \mu_a l \ln[(d+h)/d] \cos \Theta / 2\pi. \quad (5.70)$$

Таким образом, для ослабления магнитной связи в РЭА необходимо:

- по возможности компоновать цепи РП в плоскости, параллельной направлению помехонесущего магнитного поля;
- максимально возможно разносить цепи РП и ИП;
- уменьшать площадь петли цепи РП, сокращая длину проводников l и расстояние между ними h (рисунок 5.9).

Укладка изолированного прямого провода на корпус или шасси РЭС существенно снижает размер h (рисунок 5.10,а). Применение отдельного обратного провода в качестве земляного позволяет также уменьшить размер h (рисунок 5.10,б). При скручивании прямого и обратного проводов все наведенные на них напряжения компенсируются (рисунок 5.10,в). Аналогичный эффект достигается при использовании коаксиального кабеля.

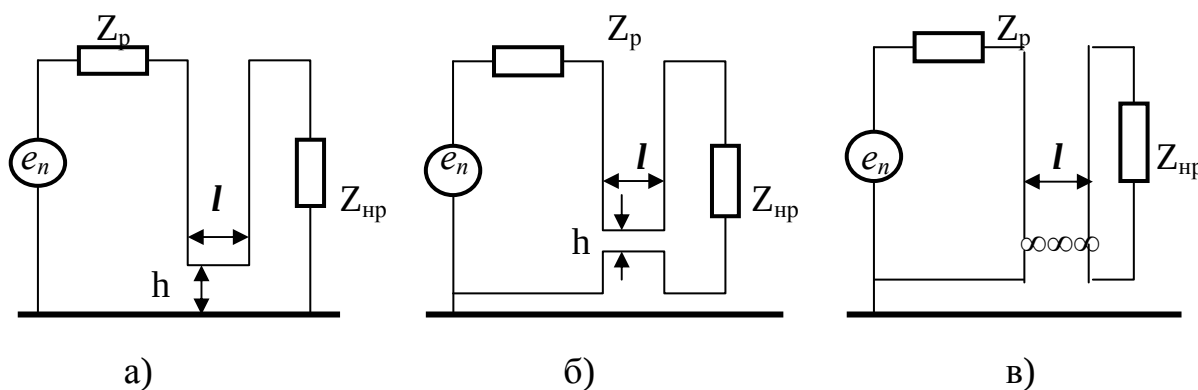


Рисунок 5.10. Варианты снижения размера h

Если принятых мер недостаточно, то для обеспечения необходимого ослабления помех используют магнитостатическое экранирование, которое использует:

- шунтирование (замыкание) магнитного поля ферромагнитным материалом;
- вытеснение помехонесущего поля полем вихревых токов в экране.

В случае магнитостатического экранирования магнитное сопротивление R_m , оказываемое экраном или областью пространства с магнитной проницаемостью, длиной средней линии магнитной индукции l и поперечным сечением S в направлении, перпендикулярном магнитному потоку, определяется выражением [17]

$$R_m = 1 / \mu S . \quad (5.71)$$

Если экран выполнен из немагнитного металла с магнитной проницаемостью $\mu = 1$ (медь, латунь, алюминий), то он не оказывает на помехонесущее магнитное поле никакого влияния и его эффективность будет нулевой (на низких частотах). Если же экран выполнен из пермаллоя, стали,

ферромагнитного материала, у которых значение μ велико (30-3000), то магнитный поток замыкается на стенках экрана (поскольку $R_m \ll R_{\text{средн.}}$).

Рассмотрим магнитостатический экран в виде куба, внешняя сторона которого равна a , толщина экрана d и внутренний размер $(a-2d)$ (рисунок 5.3,б).

В этом случае, чтобы граничная магнитная линия не попала во внутреннюю часть экрана, необходимо выполнить условие $\operatorname{tg} \alpha_2 = d/(a-d)$. Тогда при $(\mu_1/\mu_2) \operatorname{tg} \alpha_1 \ll 1$

$$d = \frac{\mu_1 a}{\mu_2} \operatorname{tg} \alpha_1 \quad \text{и} \quad d \ll a, \quad (5.72)$$

При $(\mu_1/\mu_2) \operatorname{tg} \alpha_1 = 1$ получается $d=a/2$, что ограничивает внутренний размер экрана. Таким образом, чтобы обеспечить значительное ослабление магнитного поля, экран должен быть изготовлен из материала с большой относительной магнитной проницаемостью при большой толщине стенок. Чем больше значение, тем более тонкую стенку будет иметь экран.

Основные требования, которые предъявляются к МСЭ следующие:

- магнитная проницаемость материалов должна быть возможно более высокой. Наибольшая эффективность экранирования обеспечивается при использовании магнитомягких низкочастотных материалов (электротехническая сталь, пермаллой);
- увеличение толщины стенок экрана приводит к повышению эффективности экранирования, но приводит к увеличению массы и габаритов экрана и изделия в целом;
- стыки, разрезы и швы в экране должны размещаться параллельно линии магнитной индукции или в направлении вихревых токов в экране;
- заземление экрана не влияет на эффективность МСЭ;
- не допускаются крепления экранируемого элемента и оболочек экрана стальными деталями, которые могут образовывать пути с малым R_m для магнитных силовых линий помехи.

Действие металлического экрана в переменном магнитном поле основано на использовании явления электромагнитной индукции, приводящей к образованию переменной ЭДС, которая создает вихревые токи в экране. Вихревые токи создают вторичное магнитное поле, направленное встречно помехонесущему полю, и ослабляют его. Чем меньше сопротивление стенок экрана и чем больше их толщина, тем меньше разница между напряженностью поля вихревых токов и напряженностью внешнего поля.

С повышением частоты возрастает неравномерность распределения вихревых токов в сечении материала экрана, т.е. наблюдается скин-эффект, который сопровождается сосредоточением вихревых токов на поверхности экрана.

Следовательно, экранирование переменных магнитных полей, также как и электрических, состоит из двух физических процессов:

- компенсации поля экранируемого витка полем вихревых токов, как короткозамкнутого витка;
- ослабления поля при проникновении и распространении его сквозь толщу стенок экрана.

До тех пор, пока толщина экрана меньше ($d < \delta$) глубины проникновения (для низких частот), основной вклад в ослабление вносит компенсация поля экранируемого витка полем экрана. На более высоких частотах, когда толщина стенок экрана становится больше глубины проникновения ($d > \delta$), решающим оказывается затухание поля в стенках экрана, а следовательно, можно применять немагнитные металлические экраны.

В общем случае эффективность магнитного экранирования, основанная на действии вихревых токов, в области низких частот находится по выражению /17/

$$\mathcal{E}_m = 10 \lg \left[1 + \frac{(\omega \mu \sigma R_s d)^2}{4} \right] \text{ [дБ]}, \quad (5.73)$$

где R_s - эквивалентный радиус экрана.

При $d > \delta$ эффективность магнитного экранирования может быть определена (в размах)

$$\mathcal{E}_m = 8,68 \, d / \delta + 20 \lg \left(\frac{R_s}{\sqrt{2} \mu \delta m} \right), \quad (5.74)$$

где m - множитель, зависящий от формы экрана.

Плоский экран - $m = 1$, $R_s = d/2$.

Цилиндрический экран - $m = 2$.

Сферический экран - $m = 3$.

Чаще всего ВЧ экраны изготавливаются из алюминия, меди и латуни. В практике магнитного экранирования используют и плоские незамкнутые экраны. Для ослабления индуктивной связи между катушками используют плоский экран (рисунок 5.11), эффективность которого рассчитывается по следующим зависимостям:

- для медного экрана

$$K = 10 \lg[(6,35 D_{cp} df)^2 + 1] \text{ [дБ]}, \quad (5.75a)$$

- для алюминиевого экрана

$$K = 10 \lg[(4 D_{cp} df)^2 + 1] \text{ [дБ]}, \quad (5.75b)$$

где D_{cp} - средний диаметр катушки (или высота катушки), см;

d - толщина экрана, см;

f - частота, кГц.

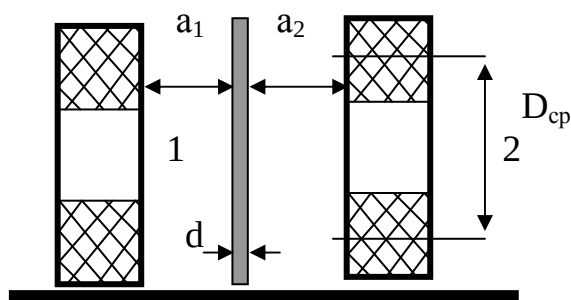


Рисунок 5.11. Ослабление индуктивной связи плоским экраном

Формула (5.75) обеспечивает приемлемые условия экранирования при условии, что ширина экрана превышает D_{cp} или $(a_1 + a_2)$.

В ближней зоне следует учитывать, что характеристическое сопротивление среды зависит от формы МСЭ. Для конструкций экранов плоской, цилиндрической и сферической форм используют следующие формулы расчета характеристического сопротивления:

$$Z_{пл} = -j\omega\mu_0 2r; \quad Z_{ц} = -j\omega\mu_0 r; \quad Z_{сф} = -j\omega\mu_0 r/\sqrt{2}, \quad (5.76)$$

где r - радиус или половина ширины экрана.

Аналогично и для ЭСЭ характеристические сопротивления рассчитываются по формулам:

$$Z_{пл} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0 2r}; \quad Z_{ц} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0 r}; \quad Z_{сф} = \frac{\sqrt{2}}{j\omega\epsilon_0 r}. \quad (5.77)$$

Для расчета ЭЭ низкочастотных магнитных полей конструкциями экранов, выполненных из немагнитных (НМ) и магнитных (ММ) металлов следует применять следующие соотношения:

Плоский экран

немагнитный металл	$\Theta_{НМ} = 20\lg(1 + \mu_0\omega\sigma R_3 d)$	(5.78)
--------------------	--	--------

магнитный металл	$\Theta_{ММ} = 20\lg(1 + \mu_r d/4R_3)$	(5.79)
------------------	---	--------

Цилиндрический экран

немагнитный металл	$\Theta_{НМ} = 20\lg(1 + 0,5\mu_0\omega\sigma R_3 d)$	(5.80)
--------------------	---	--------

магнитный металл	$\Theta_{ММ} = 20\lg(1 + \mu_r d/2R_3)$	(5.81)
------------------	---	--------

Сферический экран

немагнитный металл	$\Theta_{НМ} = 20\lg(1 + \mu_0\omega\sigma R_3 d/2\sqrt{2})$	(5.82)
--------------------	--	--------

магнитный металл	$\Theta_{ММ} = 20\lg(1 + \sqrt{2}\mu_r d/2R_3)$	(5.83)
------------------	---	--------

где d - толщина материала; R_3 - эквивалентный радиус экрана.

5.6.6. Многослойное экранирование

Многослойные комбинированные экраны, состоящие из последовательно чередующихся немагнитных (медь, алюминий, латунь) и магнитных (сталь, пермаллой) слоев, применяются для получения высокой ЭЭ в широком частотном диапазоне, включая область низких частот, особенно при экранировании магнитных полей большой напряженности.

В этих случаях хорошие результаты дает использование многослойных экранов (2-х, 3-х и более). Чтобы исключить насыщение, слой составного двухслойного экрана, обращенный к источнику магнитного поля, выполняется из материала с низкой магнитной проницаемостью (он имеет высокий уровень насыщения) или немагнитного металла, а второй слой - из материала с высокой магнитной проницаемостью, имеющий низкий уровень насыщения.

В основе работы многослойного экрана лежит принцип многократного отражения от слоев крана, имеющих различные значения характеристических сопротивлений. В результате экран, состоящий из нескольких тонких слоев различных металлов, обладает большей эффективностью экранирования (особенно в низкочастотной области), чем однородный экран той же толщины. Коэффициент экранирования (подавления) двухслойного экрана определяется выражением [22]

$$K_{э12} = K_{1под} K_{2под} / (1 - K_{1отр} K_{2отр}), \quad (5.84)$$

где $K_{1под}$, $K_{2под}$ - коэффициенты подавления при прохождении электромагнитного поля через стенки 1 и 2 экрана соответственно;

$K_{1отр}$, $K_{2отр}$ - коэффициенты отражения электромагнитной волны от границы разделов 1 и 2 экранов соответственно.

Для трехслойного экрана выражение для определения коэффициента экранирования имеет вид

$$K_{э123} = K_{1под} K_{2под} K_{3под} / [(1 - K_{1отр} K_{2отр})(1 - K_{2отр} K_{3отр}) - K_{1отр} K_{3отр} K_{2под}^2]. \quad (5.85)$$

На основании анализа расчетов и практических результатов можно сформулировать следующие рекомендации по конструированию многослойных экранов:

- слои многослойного экрана, обращенные к источнику магнитного поля следует выполнять из немагнитных материалов. Наилучшие результаты дает экран с сочетанием слоев из немагнитных и магнитных материалов (*медь-сталь*, *медь-сталь-медь* и т.д.);
- применение диэлектрических прокладок (пластмасса, картон, бумага) или воздушных зазоров между металлическими слоями экрана может приводить к повышению ЭЭ, если их толщина значительно превышает толщину металлических слоев;

• при выборе оптимального соотношения толщин слоев в экране *медь-сталь* необходимо рассматривать следующие характерные области (рисунок 5.12):

а) частоты от 0 до 0,5 кГц - наибольшая эффективность экранирования обеспечивается однородным стальным экраном, т.к. стальной слой работает в магнитостатическом режиме;

б) частоты от 0,5 до 10 кГц - наибольшая эффективность экранирования обеспечивается при равной толщине медного и стального слоев.

В этом случае медный слой переходит в электромагнитный режим работы, а стальной продолжает работать в магнитостатическом режиме;

в) частоты от 10 до 1000 кГц - медный и стальной слои работают в электромагнитном режиме, поскольку с возрастанием частоты оптимальная толщина медного слоя уменьшается, а стального увеличивается за счет большого влияния поглощения;

г) частоты свыше 1000 кГц - составной экран нецелесообразен, т.к. ЭЭ обеспечивается однородным стальным экраном.

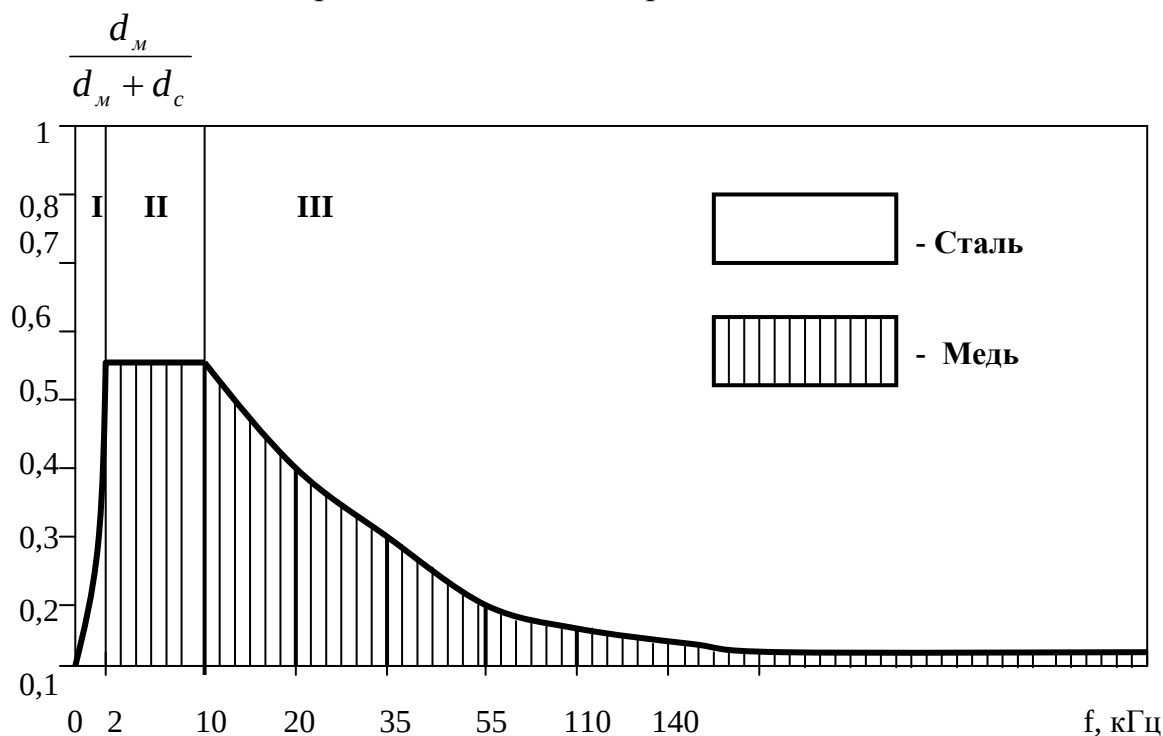


Рисунок 5.12. Оптимальные соотношения толщин слоев двухслойного экрана медь-сталь

5.6.7. Расчет и конструирование электромагнитных экранов

Экранирование с использованием вихревых токов обеспечивает одновременное ослабление как магнитных, так и электрических полей. Поэтому этот способ экранирования называется электромагнитным.

Эффективность экранирования ЭМЭ в ближней зоне (зоне индукции) будет разная для магнитной и электрической составляющих электромаг-

нитного поля (см. раздел 5.1). В связи с этим для ближней зоны необходимо рассчитывать эффективность экранирования для каждой компоненты в отдельности. В дальней зоне расчет проводится для любой из компонент, т.к. их свойства в дальней зоне одинаковы.

Физическая сущность ЭМЭ представляет с точки зрения:

- волновой теории поля многократное отражение электромагнитной волны от поверхности экрана и затухание энергии волны в толще экрана;
- теории электромагнитного поля и теории электрических цепей объясняется возникновением на стороне, обращенной к источнику поля, зарядов, а в его стенках – токов, поле которых противоположно по направлению к полю источника и интенсивности близкой к первичному полю. В результате сложения первичного поля и вторичного поля (поля наведенных токов) происходит компенсация полей.

Таким образом, эффективность экранирования электрически герметичного экрана определяется выражением

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{отр}} \mathcal{E}_{\text{погл}} \mathcal{E}_{\text{вн.отр}}, \quad (5.86)$$

где $\mathcal{E}_{\text{отр}}$ - ослабление энергии волны за счет отражения на границе сред;
 $\mathcal{E}_{\text{погл}}$ - ослабление за счет затухания энергии волны в толще экрана;
 $\mathcal{E}_{\text{вн.отр}}$ - ослабление энергии волны из-за внутреннего переотражения от внутренних стенок экрана.

На практике учитывают только первые две составляющие, т.к. $\mathcal{E}_{\text{вн.отр}}$ очень мало. В этом случае удобно вести расчеты по формуле

$$\mathcal{E} = 20 \lg \mathcal{E}_{\text{отр}} + 20 \lg \mathcal{E}_{\text{погл}}. \quad (5.87)$$

Рассмотрим бесконечно плоский экран, на который падает электромагнитная волна.

Известно, что в металле электромагнитная волна затухает по экспоненциальному закону. При прохождении волны через стенку экрана толщиной, равной d , она будет ослабевать в $e^{d/\delta}$ раз. Тогда

$$\mathcal{E}_{\text{погл}} = 8,7(d/\delta) \text{ [дБ]}. \quad (5.88)$$

Глубина проникновения δ характеризует материал экрана и зависит от частоты

$$\delta = 0,03 \sqrt{\frac{\lambda \rho}{\mu_r}} = 0,52 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \text{ [м]}, \quad (5.89)$$

где ρ - удельное сопротивление материала экрана, Ом·м;

λ - длина волны в воздухе, м;

f - частота, МГц;

μ_r - относительная магнитная проницаемость материала экрана.

Эффективность экранирования только за счет поглощения определяется соотношениями

$$\mathcal{E}_{\text{полл}} = 290d \sqrt{\frac{\mu_r}{\lambda \rho}} = 16,7d \sqrt{\frac{\mu_r f}{\rho}}, \quad (5.90)$$

где d - толщина экрана, м.

Как видно из (5.90), с ростом частоты ЭЭ также возрастает.

В общем случае ЭЭ бесконечного плоского экрана с учетом отражения и поглощения плоской волны может быть определена

$$\mathcal{E}_{\text{пл}} = \frac{|(Z_m + Z_c)|^2}{4Kz_m z_c}, \quad (5.91)$$

где Z_m, Z_c - волновые сопротивления металла и среды;

z_m, z_c - модули сопротивлений Z_m, Z_c соответственно.

В практике ЭМЭ различают *электрически толстые экраны* ($d/\delta > 0,8$) и *электрически тонкие экраны* ($d/\delta < 0,8$).

ЭЭ электрически тонкого плоского экрана с учетом внутренних отражений может быть рассчитана по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{пл}} = 60 \pi d / \rho. \quad (5.92)$$

ЭЭ электрически толстого экрана будет определяться выражением

$$\mathcal{E}_{\text{пл}} = 65 (\delta / \rho) e^{d/\delta}. \quad (5.93)$$

Это выражение можно представить в виде

$$\mathcal{E}_{\text{пл}} = 36 + 20 \lg(\delta / \rho) + 8,7(d/\delta). \quad (5.94)$$

В этой формуле слагаемое $8,7(d/\delta)$ учитывает потери на поглощение, а остальные слагаемые - на отражение.

5.6.8. Перфорированные экраны

Эффективность экранирования замкнутого металлического экрана может быть получена сколь угодно высокой при соответствующем подборе материала и его толщины. Однако, реальные конструкции экранов РЭС имеют щели, швы, отверстия для соединительных входных и выходных проводов, кабелей, разъемов, вводов питания, переключателей и измерительных приборов, а также вентиляции, люков, механических и шарнирных соединений и т.д., что приводит к проникновению электромагнитного поля внутрь экранируемого пространства, т.е. нарушается электрогерметичность экрана и снижается ЭЭ.

В соответствии с уравнениями Максвелла электрическая и магнитная поляризуемость щелевого отверстия зависят от его формы и размеров и в общем случае определяются выражениями [20, 21]:

$$P_s = \frac{S^{3/2} \epsilon_a}{64 \sqrt{a/b + b/a}}; \quad (5.95)$$

$$P_m = \frac{S^{3/2} \sqrt{b/a} \Phi(b/a)}{64}, \quad (5.96)$$

где a и b - длина и ширина щели соответственно;

$S = ab$ - площадь отверстия;

$\Phi(b/a) = 1$ для $b/a < 1$; $\Phi(b/a) = 2,23$ для $b/a = 5$;

$\Phi(b/a) = b/[2a \ln(0,628b/a)]$ для $b/a \gg 5$.

В соответствии с (5.95) и (5.96) электрическая и магнитная поляризуемости круглого и квадратного отверстий одинаковой площади равны, а сами поля через узкую длинную щель проникают слабее, чем через круглое или квадратное отверстие той же площади. При этом вихревые токи, определяющие ЭЭ магнитного поля, должны быть параллельны длинной стороне щели ($a \gg b$). При произвольном ориентировании щели относительно вектора напряженности магнитного поля проникающее результирующее поле в экранируемой области будет пропорционально углу ориентации длинной стороны щели относительно вектора напряженности.

В случае, если экран содержит N отверстий, система отверстий может быть заменена эквивалентным отверстием, поляризуемость которого P_Σ в N раз больше поляризуемости P одного отверстия, т.е. $P_\Sigma = NP$. Так как, согласно (5.95) и (5.96), поляризуемость P одного отверстия пропорциональна площади в степени три вторых, а поляризуемость P_Σ пропорциональна числу отверстий, то *при одной и той же площади перфорации ЭЭ будет выше у экрана с большим числом отверстий*. В результате сравнительная ЭЭ определяется как

$$(S_1/S_2)^{1/2} = (N/N)^{1/2}.$$

Эффективным средством ослабления СВЧ энергии, проникающей через отверстия в экране, является увеличение их глубины и конструктивное выполнение в виде заградительного волновода (рисунок 5.13).

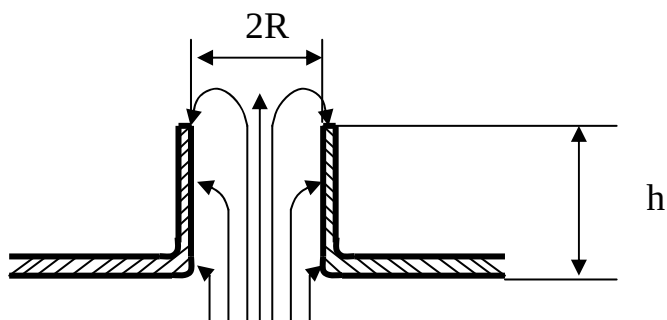


Рисунок 5.13. Повышение ЭЭ за счет вытяжки отверстия

ЭЭ подобных волноводов зависит от их геометрических размеров и формы и определяется:

- для круглого отверстия:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_э &= 20,8h/R - \text{для электрического поля;} \\ \mathcal{E}_м &= 16h/R - \text{для магнитного поля;} \end{aligned} \right\} \quad (5.97)$$

- для прямоугольного отверстия:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_э &= 27,2h\sqrt{1/a^2 + 1/b^2} - \text{для электрического поля;} \\ \mathcal{E}_м &= 27,2h/b - \text{для магнитного поля.} \end{aligned} \right\} \quad (5.98)$$

Таким образом, для повышения ЭЭ перфорированных экранов рекомендуется:

- располагать отверстия в зонах со слабыми электромагнитными полями;
- при заданной площади перфорации, исходя из конструктивных соображений, уменьшать диаметр отверстий, увеличивая их количество;
- выполнять отверстия в виде прямоугольных щелей, располагая их длинные стороны вдоль линии токов, наведенных в стенках экрана (перпендикулярно силовым линиям магнитного поля);
- в диапазоне СВЧ конструктивно выполнять отверстия в виде заградительных волноводов.

5.6.9. Сетчатые экраны

Действие сетчатого экрана по отношению к помехонесущему магнитному полю, как и в сплошном экране, основано на возбуждении вихревых токов в направлении, перпендикулярном линиям магнитной индукции. В результате проволоки, расположенные в направлении помехонесущего поля, практически не оказывают влияния на ЭЭ сетчатого экрана. Магнитное поле возбуждаемых вихревых токов вблизи перпендикулярно ориентированных проволок существенно отличается от однородного магнитного поля, создаваемого током, равномерно распределенным по сечению сплошного экрана. Однако на расстоянии, превышающем шаг сетки, это различие уменьшается и при дальнейшем его увеличении перестает сказываться. Исследования эффективности экранирования сетчатых экранов выявили следующие закономерности [17, 22]:

- при $S = \text{const}$ (шаг сетки) и одном и том же материале сетки из толстой проволоки эффективнее сеток из тонкой проволоки как в области низких частот, так и высоких частот;
- при $S/\gamma = \text{const}$ редкие сетки из одного и того же металла на низких частотах более эффективны, чем густые. Это вызвано тем, что на низких частотах основное влияние оказывает активное сопротивление проволоки, а на высоких частотах - индуктивность, которая мало зависит от γ ;
- при одинаковых S и γ в области низких частот медные сетки эффективнее стальных за счет более высокой удельной проводимости меди, однако с повышением частоты это различие уменьшается;

- при произвольной ориентации помехонесущего поля токи достаточно хорошо переходят с одной проволоки на другую в местах перекрещивания даже в старых сетках, покрытых коррозией. В результате для нормальной работы экрана следует обеспечивать надежный электрический контакт по швам в местах соединений отдельных частей сетки.

В общем случае предельная величина ЭЭ сетчатого экрана будет равна

$$\mathcal{E}_c = \frac{a}{d} \ln \frac{a}{2 \pi r}, \quad (5.99)$$

где a - шаг сетки; r - радиус проволоки сетки; $d = 2 r$ - толщина экрана.

5.6.10. Контактные соединения и эффективность экранирования

Реальные экраны, состоящие из большого числа соединенных между собой элементов, нельзя рассматривать как однородные. Неоднородность конструкции обусловлена тем, что в местах стыков листов, стенок и соединительных элементов надежный контакт осуществляется не по всей поверхности соприкосновения, а лишь в отдельных точках или областях. При протекании токов через такие соединения происходит местное увеличение плотности и неравномерное их распределение, что приводит к возрастанию сопротивления экрана и его эффективности в целом.

Контактные соединения в экранах по конструкции и выполняемым функциям несколько отличаются от обычных электрических контактов. Электрические контакты обеспечивают надежное прохождение электрического тока без потерь. С этой точки зрения функции электрических контактных соединений и контактных соединений в экранах одинаковы, т.к. при толщине d экрана меньшей глубины проникновения поля в элементы его конструкции эффективность прямо пропорциональна проводимости материала экрана. Внесение больших переходных контактных сопротивлений эквивалентно ухудшению добротности резонатора, внесению несогласованных нагрузок в линию передачи или длинную линию, а также приводит к неравномерному распределению вихревых токов. Поскольку размеры контактных соединений в экране велики и часто перерезают значительную часть его поверхности, то вышеуказанные явления требуют использования специфических решений при конструировании экранов.

Контактные соединения подразделяются на [21]:

1. Неразъемные (сварные или паяные).
2. Разъемные (прижимного типа).
3. Скользящие.
4. Открывающихся частей экрана.

Надежная работа контактных соединений достигается правильно-стью конструктивного исполнения, тщательностью изготовления, правильным выбором покрытия материалов и контактным нажатием. Кон-

тактные устройства при правильном выборе и исполнении обеспечивают ЭЭ до 80 дБ в широком диапазоне частот (0,15 - 1000 мГц).

Многочисленные измерения в диапазоне частот выше 200 мГц показали, что среднее значение поверхностного емкостного сопротивления контакта с точностью $\approx 15\%$ может быть представлено в виде /21/

$$X_s = 5 \frac{\sqrt[4]{\lambda} d}{l \varepsilon_r}, \quad (5.100)$$

где l - длина перекрытия контактного соединения, см;

ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость клея;

λ - длина волны, см;

d - зазор между листами (толщина диэлектрика), см.

Экспериментально установлено, что среднее число контактных точек (болтовых соединений, точек контактной сварки и т.п.) на 1 м длины контакта для обеспечения требуемой эффективности экранирования $\mathcal{E}$ определяется формулой

$$\lg N = 1,2 - 0,21 \lg \lambda + 0,25 \lg (\mathcal{E}/5), \quad (5.101)$$

где λ - длина волны, м;

Для выполнения норм биологической защиты (персонала, окружающей среды) величина N должна быть равна /21, 23/

$$\lg N - \lg N_{\min} = 1,2 + 0,25 \lg P - 0,2 \lg \lambda, \quad (5.102)$$

где $N_{\min}$ определяется по выражению (5.101);

P - мощность излучения в кВт.

5.7. Инженерные формулы расчета эффективности экранирования реальных конструкций экранов

В результате анализа многих конструкций экранов различного назначения (*исключая плоские экраны!*) были получены выражения для средней эффективности экранирования, адекватность которых, подтверждают экспериментальные исследования. Эти выражения удобны для инженерных расчетов ЭЭ *замкнутых экранов* практически любых конструкций и дают достаточно хорошую точность.

5.7.1. Расчет ЭЭ электрически толстых экранов

Для расчета ЭЭ электрически толстых ($d/\delta > 0,8$) металлических экранов любой формы (*кроме плоских незамкнутых экранов*) используют следующее выражение /21/:

$$\mathcal{E}_{E(H)} = \sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_{E(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_{\mathcal{E}}}} e^{2\pi d/m} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6, \quad (5.103)$$

где δ - глубина проникновения, м;

ρ - удельное сопротивление материала экрана, Ом·м;

λ - длина волны, м;

$Z_{E(H)}$ - волновое сопротивление электрического (магнитного) поля, Ом;

$R_э$ - эквивалентный радиус экрана, м;

d - толщина экрана, м;

m - наибольший размер отверстия (щели), м.

Эта формула является наиболее общей, полностью характеризует процесс электромагнитного экранирования реальных замкнутых экранов и применима в широком диапазоне частот (пока $\lambda > m\pi$).

Первый сомножитель характеризует отражение электромагнитной волны от поверхности экрана из-за различия поверхностного сопротивления экрана и волнового сопротивления поля. Этот фактор является преобладающим в эффективности ЭМЭ.

Последний множитель в выражении определяет эффективность экрана, обусловленную его герметичностью. При $\lambda \sim m\pi$ этот множитель резко уменьшается и ЭЭ становится незначительной.

5.7.2. Расчет ЭЭ электрически тонких экранов

Для электрически тонких экранов ($d/\delta < 0,8$), в том числе и с металлизированной поверхностью, ЭЭ расчет проводится по формуле:

$$\mathcal{E}_{E(H)} = 1,25 \pi \sqrt{\frac{d}{\rho} Z_{E(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_э}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6. \quad (5.104)$$

За толщину экрана с металлизированными поверхностями принимают толщину нанесенного слоя металла $d = R_{рм}/\rho$, где $R_{рм}$ - расход металла, кг/м²; ρ - плотность исходного материала, кг/м³.

5.7.3. Расчет ЭЭ перфорированных экранов

Для расчета перфорированных экранов, когда размер a и диаметр отверстия D являются параметрами перфорации, выражение (5.103) принимает вид

$$\mathcal{E}_{E(H)} = \sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_{E(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_э}} e^{2\pi d/m} \left(\frac{a-D}{a}\right)^2 \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6, \quad (5.105)$$

где a - расстояние между центрами отверстий перфорации.

Эта формула применима при $a > D$ и существовании щелей в экране с $m < \lambda/\pi$, несвязанных с размером отверстия перфорации. Если параметры перфорации таковы, что D больше случайной щели, то в $e^{2\pi d/m}$ и $(1 - \pi m/\lambda)^6$ вместо m подставляется D . При $a \gg D$ формулы (5.103) и (5.105) совпадают.

5.7.4. Расчет ЭЭ сетчатых экранов

Для сетчатых экранов выражение для расчета ЭЭ имеет вид:

$$\mathcal{E}_{E(H)} = \sqrt{\frac{d_s}{\rho} Z_{E(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_s}} e^{\frac{\pi d_s}{s-d_s}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6, \quad (5.106)$$

где $d_s = \pi r_s^2/s$ - эквивалентная толщина сетки, м;
 d_s - диаметр провода сетки (r_s - радиус), мм;
 s - шаг сетки, мм.

5.7.5. Расчет ЭЭ токопроводящей краски

Для расчета ЭЭ токопроводящей краской используется выражение:

$$\mathcal{E}_{E(H)} = 1,25\pi \sqrt{\frac{Z_{E(H)}}{R_s}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_s}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6, \quad (5.107)$$

где R_s - сопротивление на квадрат площади поверхности экрана, Ом.

Напомним, что волновые сопротивления электрического и магнитного полей через параметр R_s определяются выражениями:

$$Z_E = \frac{Z_0 \lambda}{2\pi R_s} \text{ [Ом]}; \quad Z_H = \frac{2\pi R_s Z_0}{\lambda} \text{ [Ом]}. \quad (5.108)$$

Рассмотрим примеры расчетов ЭЭ по приведенным формулам.

Примеры.

Требуется определить ЭЭ экранов одинакового размера $2,0 \times 1,5 \times 1,0$ м³, изготовленных из различных материалов.

Экран 1 - листовая сталь толщиной $d = 1,5$ мм. Листы прикреплены к металлическому каркасу болтами с шагом крепления 10 см. При таком креплении обшивки, как показывает практика, могут быть щели размером не более $m = 10$ мм. Удельное сопротивление стали $\rho = 10^{-7}$ Ом·м. Определим эффективность экранирования при длине волны $\lambda = 3 \cdot 10^3$ м.

Эквивалентный радиус экрана определяется из (5.59,а):

$$R_s = 0,62 \sqrt[3]{abl} = 0,62 \sqrt[3]{2 \cdot 1,5 \cdot 1} = 0,9 \text{ м.}$$

Волновое сопротивление электрического и магнитного полей вычисляют по формулам (5.108). Волновое сопротивление электрического поля

$$Z_E = \frac{Z_0 \lambda}{2\pi R_s} = \frac{377 \cdot 3 \cdot 10^3}{6,28 \cdot 0,9} = 2 \cdot 10^5 \text{ Ом.}$$

Аналогично находим волновое сопротивление магнитного поля:

$$Z_H = \frac{2\pi R_s Z_0}{\lambda} = 0,7 \text{ Ом.}$$

Глубина проникновения по (5.89) составляет

$$\delta = 0,03 \sqrt{\frac{\lambda \rho}{\mu_r}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^3 \cdot 10^{-7}}{180}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Эффективность экранирования электрического поля определяем по формуле 5.103:

$$\Theta_E = \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_E \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_E}} e^{2\pi d/m} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6 = 3,5 \cdot 10^5 \text{ или } 111 \text{ дБ.}$$

Соответственно для магнитного поля получим

$$\Theta_H = 660 \text{ или } 57 \text{ дБ.}$$

Аналогично вычисляется эффективность экранирования для других точек рабочего диапазона длин волн.

Экран 2 - алюминиевые листы толщиной 1,5 мм. Конструкция такая же, как у экрана 1. Удельное сопротивление алюминия $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Вычислим эффективность экранирования при $\lambda = 3 \cdot 10^2 \text{ м}$.

Эффективность экранирования электрической составляющей поля

$$\Theta_E = 1,45 \cdot 10^8 \text{ или } 103 \text{ дБ.}$$

Эффективность экранирования магнитной составляющей поля

$$\Theta_H = 2,7 \cdot 10^3 \text{ или } 68 \text{ дБ.}$$

Эффективность экранирования для других точек рабочего диапазона длин волн вычислена аналогично. Из данных таблицы видно, что результаты вычислений и измерений практически совпадают. С уменьшением длины волны, начиная с $\lambda \approx 3 \text{ м}$, эффективности экранирования составляющих поля становятся равными, что указывает на установление при этих условиях электромагнитного процесса в экране. Сравнительно быстрое падение эффективности по мере уменьшения λ объясняется более интенсивным влиянием щелей.

Экран 3 изготовлен из латунной сетки с шагом $s = 0,25 \text{ мм}$, $r_s = 0,045 \text{ мм}$. Сетка натянута на деревянный каркас. Полотна сетки пропаяны по всей длине. Щели длиной не более $m = 6 \dots 7 \text{ мм}$ могут иметь место в контактной системе дверного проема и в местах соединения полотен. Определим эффективность при $\lambda = 30 \text{ м}$, $\rho = 7,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Эффективность экранирования рассчитывается по ф.5.106,

$$\Theta_E = 1,5 \cdot 10^4 \text{ или } 85 \text{ дБ.}$$

Экран 4 - несущая основа - фанерная камера, внутренняя поверхность которой покрыта токопроводящей краской с поверхностным сопротивлением $R_s = 6 \text{ Ом}$.

Расчет эффективности экранирования ведется по ф. 5.107. Вычисления показывают, что на частоте $f = 0,15 \text{ МГц}$ эффективность равна 77 дБ, а на частоте $f = 1000 \text{ МГц}$ $\Theta = 32 \text{ дБ}$.

В заключении раздела приведем значения ЭЭ (таблица 5.2), которые могут быть достигнуты для реальных конструкций замкнутых экранов, при условии соблюдения всех норм, требований и технологии. Эти требования

позволяют обеспечить необходимые уровни мощности электромагнитных излучений при решении задач инженерно-технической защиты средств передачи, приема, обработки и хранения информации.

Таблица 5.2. Значения ЭЭ для реальных замкнутых экранов, дБ

МАТЕРИАЛ ЭКРАНА	ДИАПАЗОН ЧАСТОТ, МГц				
	0,15-3	3-30	30-300	300-3000	3000-10000
Сталь листовая					
- сварка сплошным швом	>100	>100	>100	>100	>100
- сварка точечным швом, шаг 50 мм	70	50	-	-	-
- болтовое соединение, шаг 50 мм.	75	60	-	-	-
Жесть (фальцем)					
- пайка непрерывная	100	100	100	100	100
- точечная пайка, шаг 50 мм	100	80	60	50	40
- без пайки	100	100	60	50	40
Сетка металлическая					
пайка, ячейка 1мм	80	60	50	40	25
Фольга, склейка внахлест	100	80	80	70	60
Токопроводящая краска, $R_S=6$ Ом	70	40	30	40	40
Металлизация, расход металла $0,3 \text{ кг/м}^2$	100	80	60	50	40
Экранирование смотровых и оконных проемов:					
- штора или створка из металлической сетки с ячейкой 1-1,5 мм	70	60	60	40	40
- металлическая сетка с ячейкой до 2 мм	70	60	40	20	-
- стекло с токопроводящей поверхностью	70	30	-	30	30
Экранирование вводов коммуникаций:					
- металлические трубы, приваренные к экрану по всему периметру	100	100	100	100	100
- металлические трубы, проложенные в волноводных патрубках	100	100	100	100	100
- фильтры с соответствующей эффективностью	100	100	100	100	100

5.8. Материалы для экранов

Выбор материала для экрана проводится исходя из обеспечения заданной ЭЭ в рабочем диапазоне частот при соответствующих ограничениях: обеспечение механической прочности, технологичности, устойчивости к коррозии, обеспечения тепловых режимов РЭС, массогабаритных показателей и т.п.

5.8.1. Металлические материалы

Металлические экраны для экранирования выпускаются в виде листов и сеток (сталь, медь, алюминий, латунь) и фольги (алюминий, латунь, цинк).

В таблице 5.3 приведены основные металлические материалы и их электрофизические характеристики.

Таблица 5.3. Металлические материалы и их электрофизические характеристики

Металл	Удельное сопротивление ρ , Ом·мм ² /м	Удельная проводимость σ , $10^4(1/\text{Ом} \cdot \text{м})$	Относительная магнитная проницаемость μ
Медь (Cu)	0,0175	57	1
Алюминий (Al)	0,03	33,3	1
Латунь	0,075	13,3	1
Цинк (Zn)	0,06	16,7	1
Сталь	0,1-0,13		50-100
Пермаллой	0,67	1,5	2000
Олово (Sn)	0,12	8,35	1
Серебро (Ag)	0,016		1
Бронза	0,021		1
Никель (Ni)	0,07		1
Свинец (Pb)	0,21	4,76	1
Нихром	2		1

5.8.2. Металлизированные поверхности

В качестве материалов для экранов служат пластмасса, текстолит, картон, дерево и другие материалы с напыленным на их поверхность металлизированным слоем из алюминия или цинка. Расчет эффективности экранирования проводится либо по эмпирической формуле /21/

$$\mathcal{E}_{\text{мет}} = 97 + 5 \lg D - 20 \lg f, \quad (5.109)$$

где D - количество распыленного металла, кг/м² ;

f - частота, МГц,

либо по формуле (5.104).

5.8.3. Стекла с токопроводящим покрытием

Этот тип экранов используется в качестве индивидуальных средств защиты, а также для защиты смотровых окон, щелей, люков и т.п. В этих экранах защитном покрытием служит стекло с напыленной тонкой пленкой двуокиси олова, которое имеет поверхностное сопротивление $R_s = 6 \text{ Ом}$. Эффективность экранирования в верхнем участке СВЧ диапазона составляет 25 - 30 дБ. Имеется четкая нижняя граница частот (ниже 1000 мГц), где величина затухания падает ниже допустимой величины /23/.

5.8.4. Специальные ткани

В качестве защитных костюмов, фартуков, халатов для биологической защиты и защитных шторок используют хлопчатобумажные ткани, вытканые вместе посеребренным медным микропроводом (диаметром 35-50 мкМ). Выпускаются ткани типа РТ и артикула 4381, обеспечивающие поглощение излучения от 15 дБ на частотах 300 мГц и до 35 дБ на частотах до 1000 мГц.

5.8.5. Радиопоглощающие материалы (РПМ)

РПМ служат для уменьшения отражений радиоволн внутри помещений, испытательных камер и т.д. Изготавливаются РПМ в виде тонких резиновых коврик, гибких или жестких листов из поролона или древесных волокон, пропитанных соответствующими составами. В таблице 5.3 приведены характеристики некоторых РПМ /23/.

Таблица 5.3 - Характеристики некоторых РПМ

Материал	Марка	Диапазон волн, см	Коэф-т отражения, %
Резиновые коврики	В2Ф-2 В2Ф-3 ВКФ-1	0,8 - 4	2
Магнитодиэлектрические пластины	ХВ-0,8 ХВ-2,0 ХВ-3,2 ХВ-10,6	0,8 2,0 3,2 10,6	2
Поролоновые поглощающие покрытия	"Болото"	0,8 и более 3,0 и более	2 -3 2 -3
Древесные поглощающие покрытия	"Луч"	15 - 150	1 -3
Ферритовые пластины	СВЧ-0,68	15 - 200	3 -4

5.8.6. Токопроводящие краски

Токопроводящие краски созданы на основе диэлектрического пленкообразующего материала с добавлением токопроводящих мелкодисперсных пигментов (графит, сажа, коллоидное серебро, окиси металлов, порошковая медь или алюминий). Наиболее технологичен способ изготовления экрана - нанесение краски на основе сажи или графита на любую основу, причем экран может быть по форме и конструкции достаточно сложным.

Эффективная токопроводящая краска поучается на основе композиции лака 9-32 (ТУ МХП-3219-52) и 30%-ного карандашного графита марки КТБ (ГОСТ 4404-58).

5.8.7. Электропроводный клей

Электропроводный клей создан на основе эпоксидной смолы с наполнителем из тонкодисперсных порошков железа, никеля, кобальта и применяется для неразъемных соединений, наряду с пайкой и сваркой, а также для заполнения щелей и отверстий. Клей обладает высокой эффективностью экранирования, приближающейся к металлам, химически стоек к влаге и различным агрессивным средам.

5.9. Фильтрация электрических цепей

Эффективность экранирования зависит не только от степени ослабления и локализации ЭМП, но и от фильтрации электрических цепей управления, сигнализации, связи и электропитания, проходящих через экран, входящих или выходящих из него.

Фильтрация является техническим мероприятием, сопутствующим электромагнитному экранированию и являющимся неотъемлемой его частью. Эффективность фильтрации определяется вносимым затуханием фильтра /17/:

$$B = 20 \lg \left| \frac{U_1}{U_2} \right| \quad \text{или} \quad B = 20 \lg \left| \frac{I_1}{I_2} \right|, \quad (5.110)$$

где U_1, I_1 – напряжение и ток помех на нагрузке в исходном состоянии;
 U_2, I_2 - напряжение и ток помех на нагрузке в цепи с фильтром.

Во всех случаях эффективность фильтрации должна рассматриваться с учетом согласования фильтра по входу (с генератором входного сигнала) и выходу (с нагрузкой), т.е. в зависимости от характеристик внутреннего сопротивления Z_i источника помех и сопротивления Z_n нагрузки (рисунок 5.14).

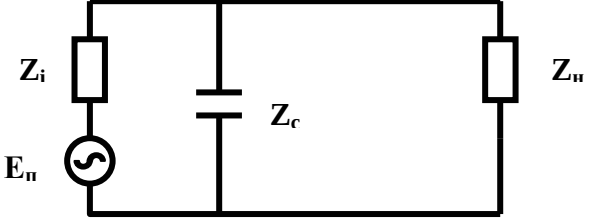
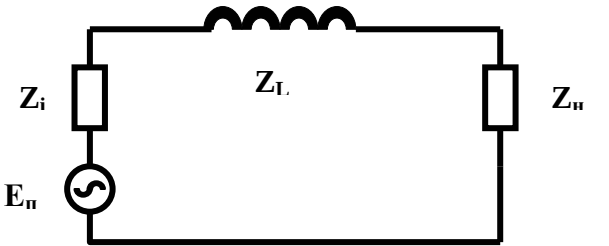
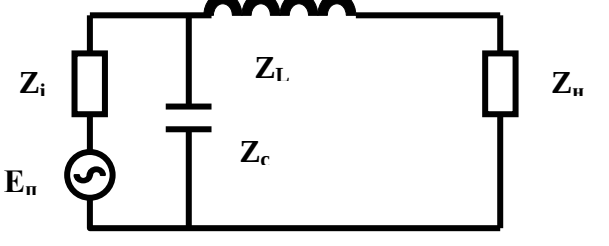
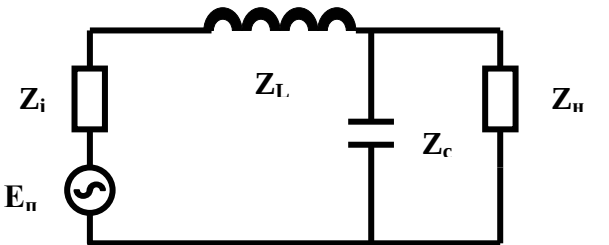
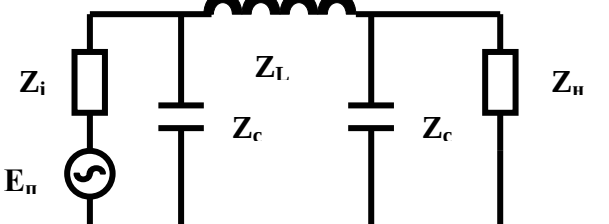
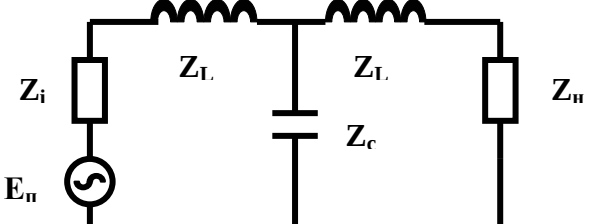
Эквивалентная схема фильтра	Вносимое затухание
	$B_c \approx \frac{Z_n}{Z_i + Z_n} \frac{Z_i}{Z_c}$ при $Z_i \ll Z_n$ $B_c \approx \frac{Z_i}{Z_c}$
	$B_L \approx \frac{Z_n}{Z_i + Z_n} \frac{Z_L}{Z_n}$ при $Z_n < Z_i$ $B_c \approx \frac{Z_L}{Z_i}$
	$B_{CL}^r \approx \frac{Z_n}{Z_i + Z_n} \frac{Z_i}{Z_c} \frac{Z_L}{Z_n} \approx$ $\approx \frac{Z_i + Z_n}{Z_n} B_c B_L$ при $Z_i \ll Z_n$ $B_{CL}^r \approx B_c B_L$
	$B_{LC}^r \approx \frac{Z_n}{Z_i + Z_n} \frac{Z_L}{Z_c} \approx$ $\approx \frac{Z_i + Z_n}{Z_i} B_L B_c$ при $Z_n \ll Z_i$ $B_{LC}^r \approx B_L B_c$
	$B_{CL}^n \approx \frac{Z_n}{Z_i + Z_n} \frac{Z_i}{Z_c} \frac{Z_L}{Z_c} \approx$ $\approx \frac{Z_i + Z_n}{Z_i} B_{CL}^r B_c$ при $Z_n \ll Z_i$ $B_{CL}^n \approx B_{CL}^r B_c$
	$B_{LC}^T \approx \frac{Z_n}{Z_i + Z_n} \frac{Z_L}{Z_n} \frac{Z_L}{Z_c} \approx$ $\approx \frac{Z_i + Z_n}{Z_n} B_{LC}^r B_L$ при $Z_i \ll Z_n$ $B_{LC}^T \approx B_{LC}^r B_L$

Рисунок 5.14. Основные типы фильтров нижних частот и формулы для их расчета

Фильтры электрических цепей, входящих в экранируемый объем (экранируемое пространство) или проходящих через него, размещают как внутри, так и вне экранов и аппаратуры. Фильтры, как правило, не переключают, не переключают. К ним предъявляют следующие требования, обусловленные специфическими условиями применения:

- малые потери в полосе прозрачности и достаточно высокое затухание во всей полосе задерживания, занимающей очень широкий интервал радиочастотного диапазона (иногда в пределах от 0,1 до 10^4 МГц);
- способность эффективно работать при сильных проходящих токах, высоких напряжениях, высоких уровнях мощности проходящих и задерживаемых электромагнитных колебаний, а для фильтров в цепях электропитания – при высоких уровнях мощности постоянного или переменного тока промышленных и других частот;
- способность сохранять основные технические характеристики в полосах пропускания и задерживания при механических и климатических нагрузках, которые могут быть нехарактерны для другого оборудования объектов и экранов.

Указанные требования означают, что элементы фильтров электрических цепей систем экранирования образуют, с точки зрения их назначения и условий применения, выделенную группу электрорадиоэлементов, основные и второстепенные параметры которых учитываются в широких диапазонах частот, токов, напряжений, мощностей и больших интервалах изменения температуры.

5.9.1. Элементы фильтров

Конденсаторы. Применяются как самостоятельные помехоподавляющие элементы и как параллельные звенья фильтров. Конструктивно помехоподавляющие конденсаторы делятся на:

- двухполюсные (с двумя выводами);
- опорные (одним из выводов является металлический корпус);
- проходные некоаксиальные (все выводы являются токонесущими);
- проходные коаксиальные (центральный вывод токонесущий проводник, другой – металлический корпус);
- конденсаторные блоки (конструктивно выполнены в одном корпусе).

При выборе типа и номинальной величины емкости конденсатора следует выполнять следующие условия:

$$R_k \leq \frac{L_{ш}}{\tau_{\phi} n} \quad \text{и} \quad C \geq \frac{(\tau_{\phi} n)^2}{L_{ш}}, \quad (5.111)$$

где R_k – модуль сопротивления конденсатора;

$L_{ш}$ – индуктивность шины питания;

n – кратность уменьшения помех;

$\tau_{\text{ф}}$ – длительность переднего фронта сигнала помехи.

Помехоподавляющие дроссели могут использоваться в качестве самостоятельных устройств фильтрации и в виде составных частей фильтра. Они устанавливаются непосредственно на источнике помех или вблизи и в фильтрах нижних частот включаются последовательно в провод, по которому распространяются помехи. Качеством дросселя в значительной степени определяются достоинства фильтра.

Характерной особенностью работы дросселей в защитных фильтрах является то, что они должны обладать достаточно большим сопротивлением в широком диапазоне частот. Однако для выполнения этого требования на низких частотах необходимо делать катушки со значительной индуктивностью и большим числом витков, в результате чего возрастает собственная емкость катушек, уменьшающая их сопротивление на высоких частотах. Применение в катушках секционированных обмоток снижает их собственную емкость, но уменьшает и индуктивность. Таким образом, следует искать компромиссное решение. Во избежание потерь надо стремиться к тому, чтобы активное сопротивление катушки было минимальным.

При конструировании дросселей для фильтров систем экранирования следует также помнить об обеспечении достаточной механической прочности, изоляции и влагоустойчивости. Кроме того, следует стремиться к сокращению габаритов катушки, к обеспечению большой поверхности охлаждения для ограничения нагрева, к уменьшению расхода цветных металлов, например, меди и изоляционных материалов. В некоторых случаях осуществляется экранирование дросселей. Обычно собственная частота дросселя подбирается равной средней частоте защищаемого диапазона. Чтобы частотная характеристика фильтра была по возможности равномерной в требуемом диапазоне частот, не следует применять больших индуктивностей. В большинстве случаев индуктивность дросселей не должна превышать 500 мкГ, при этом их конструкцию оформляют таким образом, чтобы собственная емкость не превышала 100 пФ.

В качестве помехоподавляющих дросселей могут применяться любые катушки, имеющие необходимые частотные характеристики полного сопротивления. Дроссель может быть как с ферромагнитным сердечником, так и без него. В качестве материала для сердечника рекомендуется сталь ВЧ-2, магнитная проницаемость которой сохраняет значительную величину в области высоких частот. Для обеспечения высокой проницаемости на высоких частотах при небольших протекающих по дросселю токах рекомендуется в качестве сердечника использовать ферриты, которые сохраняют необходимую величину индуктивности, позволяют значительно уменьшить габариты (число витков) дросселя.

Для определения индуктивности катушки круглого сечения можно воспользоваться соотношением

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{(\pi \cdot nD)^2 10^{-3}}{l + 0,45 D}, [\text{мкГн}] && \text{при } l > 0,3 D; \\ L &= \frac{(nD)^2}{100l}, && \text{при } l \gg D, \end{aligned} \right\} \quad (5.112)$$

где n – число витков; D – диаметр катушки, см; l – длина катушки, см.

При фильтрации сетей электропитания большой мощности используют безвитковые дроссели в виде прямолинейных токопроводящих стержней, окруженных толстостенным трубчатым магнитопроводом из ферромагнетиков.

Индуктивность такого дросселя определяется магнитным потоком, проходящим по трубе:

$$L = 0,2 \mu_r h \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right), \quad (5.113)$$

где μ_r – начальная магнитная проницаемость, мкГн/м;

h – длина магнитопровода, м;

d_2, d_1 – наружный и внутренний диаметры трубы.

Рекомендации к конструкции и монтажу фильтров:

1. Фильтр, как правило, необходимо экранировать (кроме емкостного). Обычно экраном служит корпус самого фильтра.

2. Входные и выходные проводники должны находиться с противоположных сторон как можно дальше и проходить вне корпуса. Экранирующая оплетка или труба (если они есть) должны иметь надежный контакт с корпусом фильтра по всему периметру отверстия для ввода (вывода) провода.

3. Необходимо уделять большое внимание экранированию входных и выходных цепей фильтра, включая входной и выходной конденсаторы.

4. Следует избегать расположения элементов фильтра на съемных частях корпуса.

5. Необходимо правильно размещать проходные конденсаторы.

6. Обычные конденсаторы лучше монтировать проходным способом, т.е. помехонесущий провод необходимо крепить непосредственно к выводу конденсатора. Соединение выполнять коротким проводом не более 10-15 мм и диаметром не менее 2 мм.

7. Крепление конденсаторов и дросселей должно быть прочным и вибропрочным.

8. Нельзя использовать вводы конденсатора для его механического крепления.

9. Помехоподавляющие элементы необходимо размещать так, чтобы был обеспечен хороший доступ для осмотра и замены.

10. Конденсаторы, которые при отключении аппаратуры от сети питания могут быть заряжены, должны иметь разрядные сопротивления со временем разряда не более 10 с.

5.10. Заземление

Система заземления - это электрическая цепь, обладающая свойством сохранять минимальный потенциал, являющийся устройством отсчета в конкретной аппаратуре [17, 24]. Например, в стационарном радиоэлектронном и электронном оборудовании нулевой потенциал может быть близок к потенциалу земного, а в подвижном оборудовании - отличен от него, но может являться опорным для любого элемента электрической системы.

При проектировании средств заземления необходимо найти компромисс между противоречащими друг другу требованиями. Заземляющая система должна:

- представлять собой цепь опорного источника напряжения (в типичном случае ± 100 мВ для аналоговых схем и ± 200 мВ для цифровых);
- обеспечивать сигнальные и силовые цепи возврата;
- образовывать опорные плоскости для антенн;
- препятствовать появлению вблизи антенн высокочастотных потенциалов;
- защищать людей и оборудование от грозовых разрядов;
- защищать людей и оборудование от неисправностей;
- в цепях источников питания снимать статические заряды.

Заземляющая система должна быть тщательно спроектирована, чтобы удовлетворять всем этим требованиям и одновременно свести к минимуму нежелательные паразитные связи между сигналами, приводящие к возникновению помех.

Рационально организованная система заземления в аппаратуре вместе с экранированием и фильтрацией является эффективным средством ослабления помех. При конструировании аппаратуры системе заземления предъявляют следующие основные требования:

- минимизация общего импеданса земли, позволяющая исключить образование напряжения помех, превышающего допустимый уровень за счет протекания токов отдельных каскадов, микросхем, функциональных узлов и т. д. через общие участки земли;
- отсутствие замкнутых контуров заземления, чувствительных к воздействию магнитных полей.

На рисунке 5.15 показана схема переноса помех из цепи источника в цепь рецептора за счет общего импеданса земли.

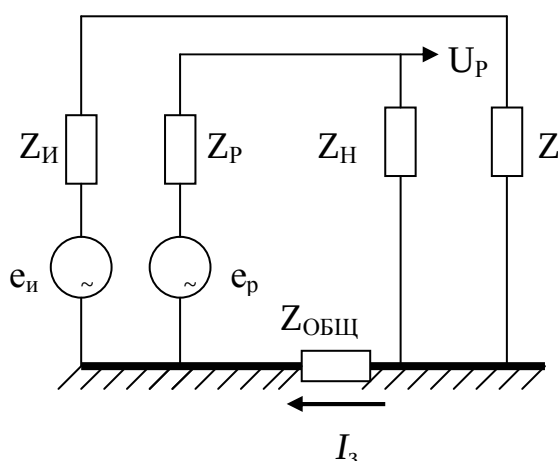


Рисунок 5.15. Схема переноса помех

Согласно схеме замещения, уровень помех на нагрузке рецептора

$$U_n = e_u \frac{Z_{общ}}{Z_u + Z} \frac{Z_n}{Z_p + Z_n} . \quad (5.114)$$

В аппаратуре требуются как минимум три отдельные цепи заземления:

- 1) для сигнальных цепей с низкими уровнями токов и напряжения;
- 2) для силовых цепей с высокими уровнями потребляемой мощности (источники питания, выходные каскады РЭА, схем управления реле, двигатели и т. д.);
- 3) для корпусных цепей (несущих конструкций: шасси, панелей, кожухов, крышек корпусов, экранов и металлизации).

Следует отметить, что в зависимости от назначения аппаратуры и условий ее эксплуатации защитное заземление может выполняться с помощью корпусных цепей. При этом цепи, соединяющие экраны в аппаратуре, могут быть с ними кондуктивно развязаны и электрически соединены только в одной опорной точке заземления.

5.10.1. Способы заземления

Электрические цепи в аппаратуре заземляются следующими способами:

1. В одной точке, причем это соединение может быть последовательным (рисунок 5.16) и параллельным (рисунок 5.17);

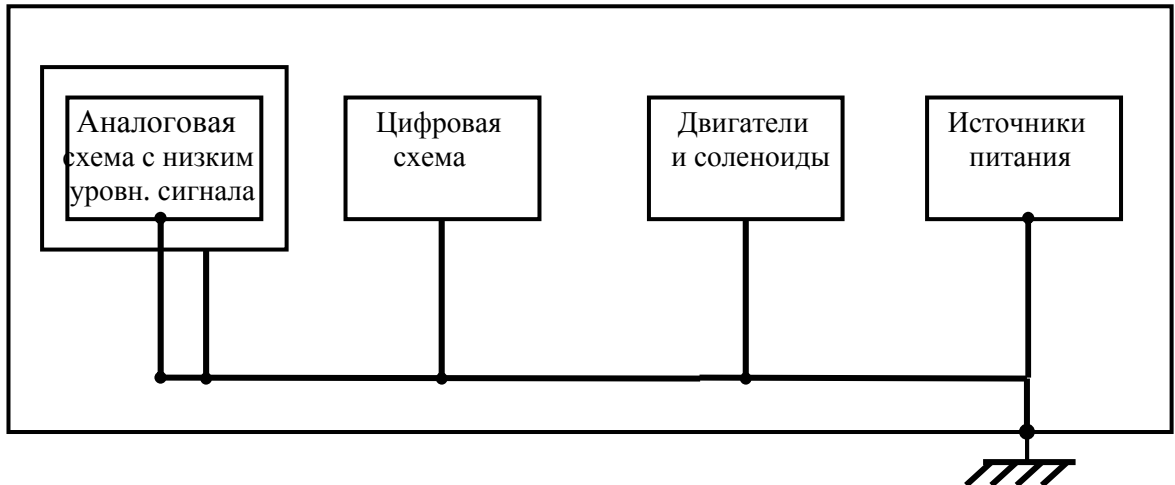


Рисунок 5.16. Одноточечная последовательная схема заземления

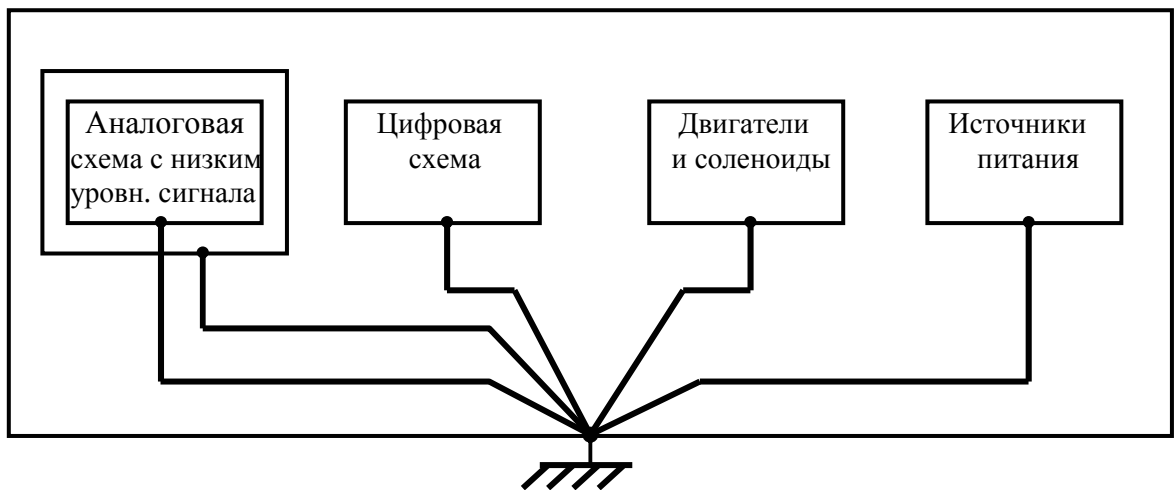


Рисунок 5.17. Одноточечная параллельная схема заземления

2. В нескольких точках, ближайших к опорной точке земли (рисунок 2.18).

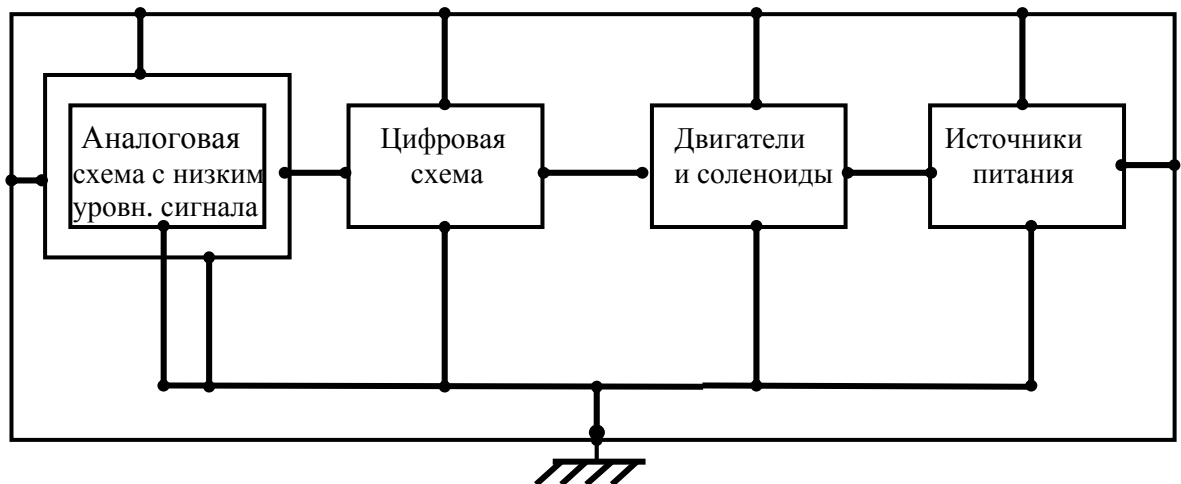


Рисунок 5.18. Многоточечная схема заземления

Соответственно системы заземления могут быть названы одноточечными (последовательная и параллельная) и многоточечными.

На рисунке 5.16 показана схема заземления, в которой реализован принцип заземления в одной (общей) точке (одноточечная последовательная). Каждая отдельная схема и каждый экран имеют свой отвод к общей точке. Каждое основание или каждая стойка соединяется с монтажной панелью с помощью одного проводника. При таком подходе исключается паразитная связь через общий импеданс и уменьшается вероятность образования низкочастотного паразитного контура с замыканием на землю. Заземление в общей точке очень эффективно до частот 1 МГц, а если система заземления имеет малый размер (не более $0,05\lambda$), частотный предел может достигнуть 10 МГц. Однако чувствительные аналоговые схемы могут воспринимать помехи вследствие индуктивной и емкостной паразитных связей, несмотря на многочисленные провода заземления. Тем не менее, в большинстве военных и космических устройств используются подобные заземления в общей точке. В большинстве устройств гражданского применения допустимо расстояние $0,1\lambda$, а при заземлении нечувствительных устройств расстояние можно увеличить до $0,15\lambda$.

Одноточечную параллельную систему заземления можно использовать на низких частотах, так как их применение приводит к увеличению длин соединительных проводников. При этом потенциалы функциональных узлов независимы.

Одноточечная параллельная система заземления конструктивно громоздка. На высоких частотах она применяться не может, так как индуктивности заземляющих проводников значительно увеличивают импеданс земли и между проводниками возникает емкостная и индуктивная связи. Для обеспечения малого импеданса заземляющих проводов их длина должна быть возможно короче.

Многоточечную систему заземления следует использовать на высоких частотах, подключая функциональные узлы аппаратуры в точках, ближайших к опорной земле (рисунок 5.18). При этом в качестве опорной применяется заземляющая поверхность с малым импедансом: металлическое шасси, слой многослойной печатной платы, металлизация пластмассового корпуса и т.д. Электрическое сопротивление между двумя точками сплошного заземления, выполненного, например, с помощью металлического листа, может быть рассчитано как

$$Z = R_{\text{с}}(l + |\operatorname{tg} 2\pi l/\lambda|), \quad (5.115)$$

где l - расстояние между точками заземления в направлении распространения токов заземления; λ - длина волны; $R_{\text{с}}$ - поверхностное сопротивление между точками заземления на высокой частоте.

Импеданс заземления на высоких частотах можно снизить, применив гальваническое покрытие с более высокой, чем у основного металла, проводимостью (например, серебрение для медного или латунного шасси), не

увеличивая толщину поверхности. Другим эффективным способом снижения импеданса заземления является уплотнение компоновки аппаратуры.

На частотах до 1 МГц рекомендуется применение однотоочечной системы заземления, свыше 10 МГц - многотоочечной. В диапазоне 1...10 МГц можно в зависимости от конкретной компоновки аппаратуры использовать как однотоочечный, так и многотоочечный способы заземления.

В электрических схемах с аналоговыми схемами и интегральными микросхемами часто используют комбинированную схему заземления – комбинацию однотоочечной (для аналоговых схем) и многотоочечной (для цифровых схем) систем заземления.

6. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СХЕМАХ

6.1. Виды и типы схем

ГОСТ 2.701-84 (СТ СЭВ 651-77) устанавливает общие требования к выполнению схем, их виды и типы (табл. 6.1).

Таблица 6.1. Виды и типы схем

Виды схем (зависят от элементов и связей, входящих в состав изделия)		Типы схем (зависят от основного назначения)	
Электрические	Э	Структурные	1
Гидравлические	Г	Функциональные	2
Пневматические	П	Принципиальные	3
Кинематические	К	Соединений	4
Оптические	Л	Подключения	5
Вакуумные	В	Общие	6
Газовые	Х	Расположения	7
Автоматизации	А	Объединенные	0
Энергетические	Р		
Комбинированные	С		
Деления	Е		

В приложении на рисунке 3 показана **структурная схема**, которая определяет основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи.

В приложении на рисунке 4 приведен пример **функциональной схемы**, которая разъясняет определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия или в изделии в целом. Эти схемы используются при изучении принципов работы изделий, при их наладке, контроле и ремонте.

В приложении на рисунке 6 представлена принципиальная, в данном случае электрическая схема.

Она определяет полный состав элементов и связи между ними и, как правило, дает детальное представление о принципах работы изделия.

Принципиальная схема служит исходным документом для разработки других конструкторских документов, в том числе, чертежей. Эти схемы также используются для изучения принципов работы изделий при их наладке, контроле и ремонте.

При разработке конструкторских документов, определяющих прокладку и способы крепления проводов, жгутов и кабелей или трубопроводов в изделии, а также для осуществления присоединений при кон-

троле, эксплуатации и ремонте изделий используют схему **соединений (монтажную)**.

Для осуществления внешних подключений изделий при их эксплуатации используют схему **подключения**.

Составные части комплекса, а также соединения их между собой на месте эксплуатации определяет **общая схема**.

Относительное расположение составных частей изделий и (при необходимости) проводов, жгутов, кабелей показывают на **схеме расположения**.

6.2. Общие требования к выполнению схем

Схемы выполняются без соблюдения масштаба на форматах, установленных ГОСТ 2.301-68 (СТ СЭВ 1181-78) и ГОСТ 2.004-79 (СТ СЭВ 4405-83), если схема выполняется автоматизированным методом. При выполнении схем применяются графические обозначения:

- условные, установленные стандартами ЕСКД на соответствующие схемы;
- упрощенные внешние очертания (в том числе аксонометрические);
- прямоугольники.

Стандарты на условные графические обозначения элементов содержат также размеры ряда обозначений. Остальные обозначения следует изображать в размерах, в которых они выполнены графически в стандартах. Допускается:

- пропорционально уменьшать все обозначения, сохраняя четкость схемы;
- увеличивать условные графические обозначения при вписывании в них поясняющих знаков;
- уменьшать условные графические обозначения, если они используются как составные части обозначений других элементов, например, резистор в ромбической антенне;
- поворачивать условное обозначение на угол, кратный 45° , по сравнению с изображением, приведенным в стандарте, или изображать зеркально повернутым (с буквенно-цифровыми обозначениями допускается разворачивать угол против часовой стрелки только на 45 или 90^0).

Расстояние между отдельными графическими обозначениями не должно быть менее 2 мм.

В общем случае толщина линий связи и графических обозначений одинакова (рекомендуется 0,3-0,4 мм). Утолщенными линиями изображают линии групповой связи (линии, условно изображающие группу линий электрической связи проводов, кабелей, шин, следующих на схеме в одном направлении). Утолщенные линии связи и графических обозначений выполняют вдвое толще принятой толщины линий связи.

Линии связи должны состоять, как правило, из горизонтальных и вертикальных отрезков с расстоянием между ними не менее 3 мм. При этом количество изломов и взаимных пересечений должно быть наименьшим. Если линия связи затрудняет чтение схемы, их можно оборвать, закончив стрелкой, и указать обозначение или наименование, присвоенное этой линии (например, номер провода, наименование сигнала, условное обозначение буквой, цифрой).

Около графических обозначений (справа или сверху) или на свободном поле схемы допускается помещать различные технические данные. Около графических обозначений элементов помещают, например, номинальные значения их параметров, а на свободном поле схемы – диаграммы, таблицы, текстовые указания.

7. НАДЕЖНОСТЬ РЭС

7.1. Основные понятия и определения теории надежности

Пригодность любого изделия к использованию по назначению определяется качеством изделия, которое оценивается совокупностью свойств, присущих изделию. Одним из таких свойств является надежность.

Надежность - свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели, в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки. Надежность изделия обуславливается его безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью, а также долговечностью его частей. Понятие надежности определяет общую надежность, или надежность в широком смысле. Иногда говорят о надежности в узком смысле, как о безотказности. Определение безотказности связано с понятием работоспособности [25, 26].

Работоспособность - состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации. Свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных простоев называется безотказностью.

Наработка - продолжительность или объем работы изделия, измеряемые в часах, циклах, кубометрах, или в других единицах.

Количественно надежность оценивается величинами, получившими название показателей надежности. Надежность относится к числу свойств, которые проявляются при использовании изделий по назначению в течение некоторого времени.

Отказ - это событие, заключающееся в полной или частичной потере работоспособности изделием.

Причиной отказа является основная неисправность, т. е. такое состояние, при котором изделие не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в отношении его основных параметров. Могут возникать второстепенные неисправности, при которых в данное время изделие не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в отношении его второстепенных параметров (например, поломка приспособления для транспортировки, порча защитных или декоративных покрытий и др.).

Долговечностью называется свойство изделия длительно (с возможными перерывами на ремонт) сохранять работоспособность в определенных режимах и условиях эксплуатации до разрушения или иного предельного состояния. В данном определении предполагается, что разрушение наступает не из-за допущенных производственных дефектов, а в результате естественных процессов износа и старения. Под предельным состоянием следует, например, понимать наступление технической или экономической нецелесообразности дальнейшего использования.

Долговечность оценивается **сроком службы**, под которым понимают суммарное рабочее или календарное время, протекающее от начала эксплуатации до разрушения или иного предельного состояния.

Будем условно считать, что срок службы телевизора составляет десять лет. В пределах этого срока наблюдаются неисправности, однако после их устранения аппарат вновь удовлетворяет предъявляемым требованиям. Очевидно, что за пределами срока службы дальнейшая эксплуатация телевизора станет нецелесообразной, так как неизбежен капитальный ремонт, который будет стоить дороже, чем новый приемник. Однако это относится не ко всякой аппаратуре. Например, сложная радиолокационная станция в пределах срока службы может подвергаться капитальному ремонту, если не успеет устареть в техническом отношении. Некоторую часть общего срока службы составляет **гарантийный срок службы**, представляющий собой суммарное рабочее или календарное время, в течение которого завод-изготовитель производит замену изделия или безвозмездное устранение неисправностей.

Требование возможно большей долговечности предъявляется не ко всем изделиям. Изделия однократного действия (например, аппаратура управляемых снарядов) часто могут иметь относительно небольшую долговечность.

Ремонтопригодностью называется свойство изделия, выражающееся в приспособленности к восстановлению исправности путем предупреждения, обнаружения и устранения неисправностей и отказов. Учитывая, что в этом определении говорится не только об устранении, но также о предупреждении и обнаружении отказов, ремонтопригодность следует считать универсальным свойством, т. е. относящимся как к восстанавливаемым, так и к невосстанавливаемым изделиям.

Невосстанавливаемым называют такое изделие, которое в случае отказа либо не подлежит, либо не поддается восстановлению в процессе эксплуатации.

Особенность надежности как параметра заключается в том, что она определяется не одним, а несколькими количественными показателями. На надежность оказывают влияние, главным образом, случайные факторы, поэтому эти показатели носят вероятностный характер. Экспериментальное определение показателей надежности требует длительного наблюдения за работой изделий.

Приведенное определение надежности является весьма близким к определению безотказности.

Безотказность - свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в определенных режимах и условиях эксплуатации. В более широком смысле под надежностью понимают свойство изделия, обусловленное его безотказностью, долговечностью и ремонтопригодностью и обеспечивающее нормальное выполнение заданных функций.

Некоторые современные сложные системы могут эксплуатироваться и в условиях частичного отказа, когда отдельные функции выполняться не могут, а также при таких неисправностях, которые выражаются в уходе рабочих параметров за установленные нормы.

Например, в радиолокационной станции, предназначенной для измерения дальности, азимута и высоты, отказал индикатор высоты. При этом станция может использоваться для измерения дальности и азимута, выполняя частично свои функции.

7.2. Показатели надежности

В первую очередь рассмотрим характеристики безотказности элементов: ламп, резисторов, конденсаторов и т.п. Как правило, это невосстанавливаемые изделия, поэтому для каждого отдельно взятого элемента самой лучшей количественной мерой надежности была бы его индивидуальная наработка до момента отказа, измеряемая случайным и неизвестным до отказа элемента временем.

7.2.1. Плотность распределения вероятности безотказной работы

Достаточно полной характеристикой наработки на отказ является плотность распределения вероятности случайной величины t , т.е. функции $f(t)$ или **распределение плотности вероятности безотказной работы**.

Для статистического определения функции $f(t)$, как и других характеристик надежности, используются данные о следующем опыте по испытанию надежности элементов.

Функция f_i может быть найдена как отношение вида:

$$f_i = \frac{\Delta n_i}{N \Delta t_i} . \quad (7.1)$$

Зная f_i для всех i от 1 до m , можно построить гистограмму отказов (рисунок 7.1), на которой высота каждого из прямоугольников равна значению f_i , а ширина – величине интервала Δt .



Рисунок 7.1. Плотность распределения безотказной работы

Огибающая есть график плотности распределения вероятности безотказной работы $f(t)$.

7.2.2. Вероятность безотказной работы

Вероятность безотказной работы можно определить, зная плотность распределения вероятности безотказной работы $f(t)$, как вероятность отказа q любого элемента за время t .

$$q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau. \quad (7.2)$$

Поскольку вероятность безотказной работы есть вероятность события, противоположного отказу, то

$$p(t) = 1 - q(t) = \int_0^{\infty} f(\tau) d\tau. \quad (7.3)$$

По результатам испытания вероятность безотказной работы может быть найдена как отношение числа исправно работающих элементов в момент времени t_i к общему числу элементов, поставленных на испытание:

$$p_i = \frac{N - n_i}{N}, \quad (7.4)$$

где n_i — общее число отказавших элементов за время t_i .

Таким образом, вероятностью безотказной работы изделия называется вероятность того, что в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не возникнет отказ изделия. Пользуясь данными испытания, можно построить график зависимости $p(t)$ (рисунок 7.2).

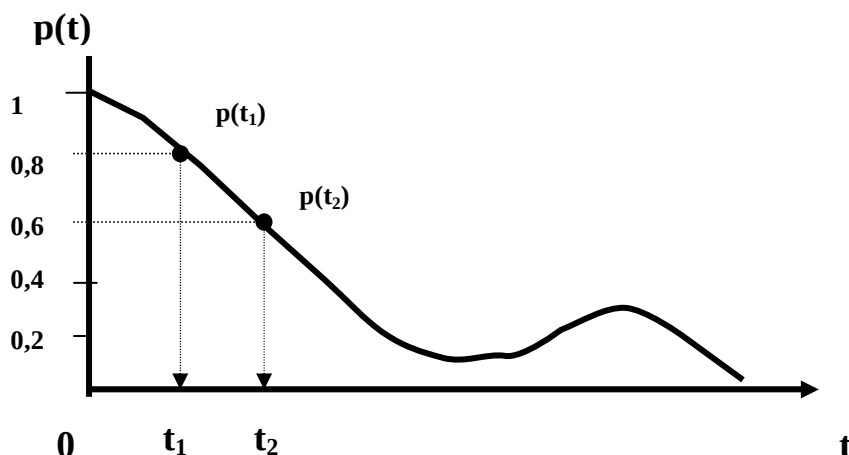


Рис. 7.2. Вероятность безотказной работы

Вид функции $p(t)$ зависит от типа исследуемого элемента, но некоторые свойства функции являются общими. В начале испытаний элемент исправен, поэтому вероятность безотказной работы равна единице. В конце испытаний все элементы гибнут, поэтому функция $p(t)$ стремится к нулю.

Иногда необходимо определить вероятность безотказной работы элемента от момента времени t_1 до момента t_2 при условии, что в момент времени t_1 он

был исправлен. Для этого пользуются условной вероятностью, которая определяется как отношение вероятностей $p(t_2)$ и $p(t_1)$:

$$p(t_2/t_1) = p(t_2)/p(t_1). \quad (7.5)$$

Вероятность безотказной работы $p(t)$ является одной из основных характеристик надежности элементов, и расчет ее не представляет трудностей, если известна интенсивность отказов элементов.

7.2.3. Интенсивность отказов

Под интенсивностью отказов понимают отношение числа отказов в единицу времени к среднему числу элементов, исправно работавших в данном промежутке времени,

Интенсивность отказов определяется из опытных данных. При рассмотренной постановке эксперимента интенсивность λ_i^* рассчитывается по формуле

$$\lambda_i^* = \frac{\Delta n_i}{(N - n_i) \Delta t_i} \quad [1/\text{ч}], \quad (7.6)$$

где n_i – общее число отказавших элементов, вычисленное для середины интервала Δt_i .

По результатам рассмотренного испытания можно вычислить значения λ^* за все время наблюдения и построить гистограмму. При увеличении числа испытанных элементов и при уменьшении отрезков времени Δt_i можно перейти от дискретных значений λ_i^* к непрерывным, т.е. к функции $\lambda(t)$, называемой лямбда-характеристикой. Лямбда-характеристику можно получить и по гистограмме, соединив плавной кривой точки значений λ_i^* (рисунок 7.3).

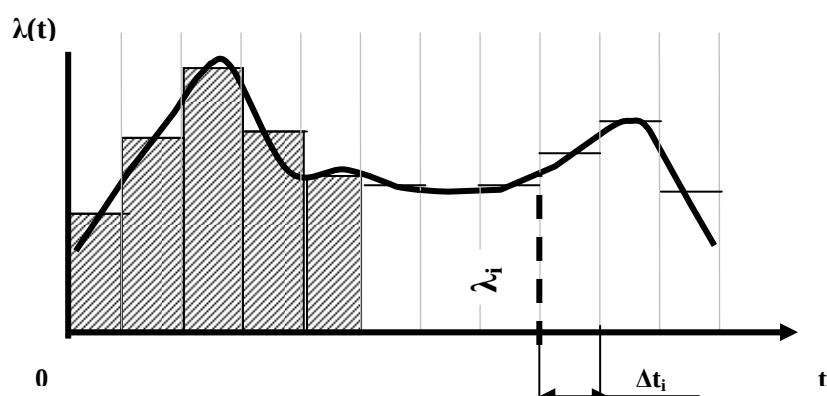


Рис. 7.3. Интенсивность отказов

Интенсивность отказов элементов к концу срока службы растет со временем, что вполне соответствует действительности.

Учитывая, что при возрастании количества испытываемых изделий статистические значения сходятся к математическим, получаем

$$\lambda = \frac{q(\Delta t)}{\Delta t}, \quad (7.7)$$

где $q(\Delta t)$ — вероятность отказа элемента;

Или, зная вероятность безотказной работы $p(t)$, интенсивность отказов можно определить

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}. \quad (7.8)$$

Следовательно, интенсивность отказов можно определить как вероятность отказа элемента в единицу времени после данного момента времени при условии, что отказ до этого момента не возник.

Соотношение (7.8) является основным выражением связи между показателями надежности элементов. Но, несмотря на важность этого соотношения, оно практически не используется, так как определение плотности распределения отказов сопряжено с большими трудностями. Поскольку вероятность безотказной работы является функцией плотности распределения отказов, имеется возможность исключить в выражении (7.8) плотность распределения отказов. Тогда, считая, что элемент РЭС еще не работал, т.е. $t_1 = 0$, вероятность безотказной работы можно определить следующим выражением:

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}. \quad (7.9)$$

Это соотношение сохраняется при любом законе изменения интенсивности отказов и поэтому иногда называется первым общим законом надежности. В одном, частном, случае при $\lambda(t) = \lambda_0 = \text{const}$ выражение (7.9) имеет вид

$$p(t) = e^{-\lambda_0 t}. \quad (7.10)$$

Это выражение наиболее часто используют для расчета вероятности безотказной работы.

Интенсивность отказов является основным показателем надежности элементов. Как видно из рисунка 7.4, в средней части кривой имеется участок, на котором интенсивность отказов примерно постоянна. Если предположить, что работа элементов будет проходить в период, совпадающий со средней частью кривой $\lambda(t)$, то надежность можно выразить через одно значение интенсивности отказов λ .

Определение количества вышедших из строя элементов за конечные промежутки времени Δt приводит к ступенчатой кривой $\lambda(t)$. На рисунке 7.4 представлен результат аппроксимации этой кривой.

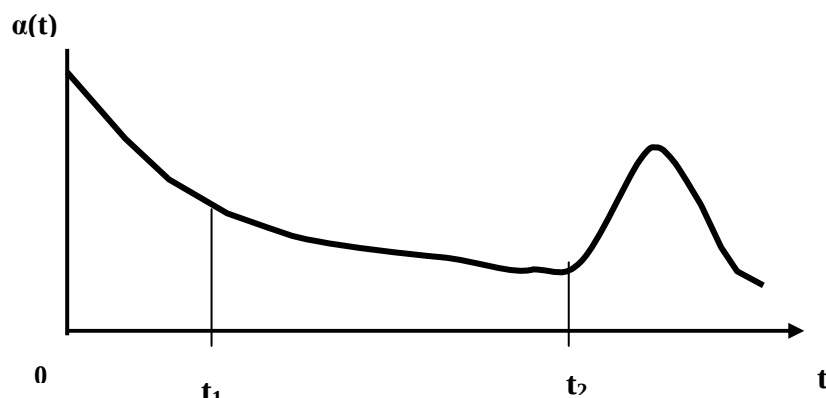


Рис.7.4. Зависимость интенсивности отказов от времени

Как видно из рисунка 7.4, интенсивность отказов вначале имеет большую величину, но интенсивно спадает (участок приработки), затем остается приблизительно постоянной (t_1 - t_2 - участок нормальной работы) и, наконец, возрастает (вследствие износа и старения). Такой вид кривой $\lambda(t)$ характерен для большинства элементов радиоэлектронной аппаратуры.

Пример определения интенсивности отказов

Пусть в начале промежутка времени $\Delta t = 2$ ч имелось 10 000 исправных изделий, а к концу осталось 9980, т. е. $\Delta n = 20$. Тогда на основании формулы (7.6)

$$\lambda_i^* = 20/10000 \cdot 2 = 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

7.2.4 Средняя наработка на отказ

В качестве показателя надежности элементов может применяться и средняя наработка до первого отказа или наработка до отказа, определяемая как математическое ожидание времени исправной работы элементов. Если при испытании на надежность партии из N элементов измерена наработка до отказа каждого из элементов, то средняя наработка до отказа может быть найдена как отношение суммарной наработки всех элементов к числу этих элементов:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}, \quad (7.11)$$

где t_i — время отказа i -го элемента.

Средняя наработка до отказа может быть вычислена и по основным показателям надежности элементов. Например, если известна плотность распределения времени работы до отказа, то

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt . \quad (7.12)$$

Значение t_{cp} можно вычислить и через вероятность безотказной работы

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} p(t) dt , \quad (7.13)$$

т.е. средняя наработка до отказа численно равна площади, ограниченной кривой вероятности безотказной работы и осями координат. Можно показать, что средняя наработка до отказа связана и с интенсивностью отказов, т.е. при $\lambda(t) = \lambda_0 = \text{const}$

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_0 t} dt = \frac{1}{\lambda_0} . \quad (7.14)$$

Следовательно, при постоянной интенсивности отказов средняя наработка до отказа обратно пропорциональна интенсивности отказов.

Пример расчета среднего времени между двумя соседними отказами

Испытываются 3 образца. Образец 1 исправно работал до первого отказа 25 час., между первым и вторым отказами - 30 час, между вторым и третьим отказами - 28 час.

На основании формулы (7.11) среднее время между соседними отказами образца 1

$$T_{cp} = \frac{25 + 30 + 28}{3} = 28 \text{ часов.}$$

Образец 2 исправно работал до первого отказа 20 час, между первым и вторым отказами - 24 часа, между вторым и третьим - 18 час. и между третьим и четвертым - 28 час., откуда

$$T_{cp} = \frac{20 + 24 + 18 + 28}{4} = 22,5 \text{ часа.}$$

Образец 3 исправно работал до первого отказа 25 час., между первым и вторым отказами - 28 час., между вторым и третьим - 26 час. и между третьим и четвертым - 28 час. Следовательно

$$T_{cp} = \frac{25 + 28 + 26 + 28}{4} = 26,8 \text{ часа.}$$

Среднее время между соседними отказами всех трех образцов

$$T_{cp} = \frac{28 + 22,5 + 26,8}{3} = 25,8 \text{ часа.}$$

7.3. Оценка структурной надежности

Под оценкой структурной надежности понимают определение основных количественных показателей надежности устройства при возможных внезапных отказах комплектующих элементов [26]. Оценка производится при условии, если известны структура и комплектация устройства. Исходными данными для расчета являются статистические характеристики надежности комплектующих элементов, полученные в результате лабораторных испытаний или подконтрольной эксплуатации аппаратуры одного или нескольких видов. Поскольку реальные условия отличаются от лабораторных и от условий подконтрольной эксплуатации, то достоверность результатов расчета оказывается ограниченной. Рассматриваемые методы оценки надежности отличаются различной степенью учета реальных условий эксплуатации: чем лучше учтены эти условия, тем выше точность оценки. Таким образом, основная сложность оценки структурной надежности заключается в выборе необходимых статистических данных и в учете реальных условий эксплуатации устройства.

Схемной особенностью радиоэлектронных устройств является наличие определенной последовательности в прохождении сигналов. Такие схемы, как правило, являются функционально необходимыми схемами, и выход из строя любого из элементов схемы вызывает отказ всего устройства. Поэтому независимо от характера принципиальной схемы устройства с функционально необходимой структурой для расчета надежности его представляют в виде цепочки последовательно соединенных элементов. На рисунке 7.5,а изображена схема усилителя, а на рисунке 7.5,б - эквивалент для расчета надежности.

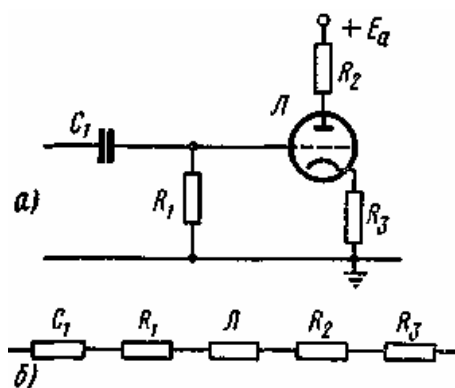


Рисунок 7.5. Принципиальная схема усилителя и ее эквивалент для расчета надежности

Отказ любого элемента последовательной схемы эквивалентен разрыву цепи и отказу всего устройства.

При выводе основного расчетного соотношения предполагается, что отказы всех элементов эквивалентной схемы являются независимыми со-

бытиями, а вероятности возникновения отказов каждого из элементов могут быть вычислены. Тогда на основании теоремы умножения вероятностей можно определить структурную надежность устройства:

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_N(t) = \prod_i^N p_i(t), \quad (7.15)$$

где $p_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го элемента.

Выражение (7.15) является основным для расчета структурной надежности устройств с функционально необходимой схемой.

При оценке структурной надежности плотность распределения наработки до отказа берут либо из результатов обработки статистического материала по отказам устройств, аналогичных проектируемому, либо используют имеющиеся табличные данные об интенсивности отказов элементов.

7.3.1. Оценка надежности по интенсивности отказов

Наиболее распространенный метод оценки надежности устройств основан на двух предположениях: наработка до отказа всех комплектующих элементов устройства подчиняется экспоненциальному распределению и имеющиеся табличные значения интенсивностей отказов соответствуют применяемым элементам/25,26/.

Первое предположение позволяет значительно упростить расчетные соотношения. Если плотность распределения наработки до отказа подчиняется зависимости (7.10), то, учитывая выражение (7.15), структурная надежность определяется как

$$P(t) = e^{-t \sum_i^N \lambda_i}. \quad (7.16)$$

Отсюда наработка на отказ соответственно будет

$$T_{cp} = \frac{1}{\sum_i^N \lambda_i}. \quad (7.17)$$

Следовательно, зная интенсивности отказов элементов, можно рассчитать показатели структурной надежности устройства. Расчет начинается с определения числа типов элементов, входящих в устройство. Обычно в радиоэлектронных устройствах это число невелико. При приближенной оценке надежности принимаются одинаковыми режимы работы всех элементов. Тогда суммарная интенсивность отказов всех элементов данного типа

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_i N_i, \quad (7.18)$$

где N_i — число элементов данного типа.

При выборе табличных данных об интенсивности отказов элементов и времени восстановления используют имеющиеся сведения о надежности

элементов радиоэлектронных устройств, аналогичных разрабатываемому. Наилучшие результаты будут получены при учете комплекса условий эксплуатации, т.е. при использовании данных о надежности элементов в устройствах одного вида с разрабатываемым. Выбранные табличные данные и результаты расчета сводятся в таблицу.

Выполненные расчеты с использованием средних значений интенсивности отказов и времени восстановления позволяют произвести точечную оценку характеристик надежности. Реальные условия эксплуатации отличаются от средних, поэтому более правильно указывать диапазон возможных значений показателей надежности. Для этого необходимо использовать минимальные и максимальные табличные значения исходных величин $\lambda_{\min}$ и $\lambda_{\max}$.

При использовании данных лабораторных испытаний аппаратуры на надежность расчеты выполняются так же, как и в рассмотренном выше случае. Полученные наработка на отказ или параметр потока отказов делятся или умножаются соответственно на обобщенный эксплуатационный коэффициент, который учитывает влияние условий внешней среды на надежность аппаратуры. В таблице 7.1 приведены значения обобщенных эксплуатационных коэффициентов k , для наиболее характерных условий эксплуатации радиоэлектронных устройств. Использование приведенных данных может быть рекомендовано только для учебных целей.

Таблица 7.1. Значения эксплуатационных коэффициентов

Условия эксплуатации (тип аппаратуры)	Эксплуатационный коэффициент k
Лабораторные условия	1
Помещение с регулируемой температурой и влажностью	1,1
Космический режим (свободное планирование)	2,0
Стационарные наземные условия	2,5
Полевая подвижная (переносимая) аппаратура	4,0
Корабельные условия для аппаратуры на транзисторах	7,6
Корабельные условия для аппаратуры на лампах	40
Бортовая самолетная аппаратура на транзисторах	13,3
Бортовая космическая (с ракетным ускорителем на старте)	20
Бортовая самолетная аппаратура на лампах	33
Бортовая ракетная аппаратура на транзисторах	62
Бортовая ракетная аппаратура на лампах	88

Данные об интенсивности отказов элементов аппаратуры, работающей в лабораторных условиях, сводятся в таблицы. В таблице 12 Приложения приведены значения интенсивностей отказов комплектующих элементов, полученные при лабораторных испытаниях.

7.3.2. Учет условий работы аппаратуры

Условия работы аппаратуры по-разному сказываются на надежности элементов. Поэтому при вычислении структурной надежности устройств с использованием обобщенных эксплуатационных коэффициентов можно получить лишь грубую оценку показателей надежности. Более строгий учет выявления условий эксплуатации может быть осуществлен, если известны эксплуатационные коэффициенты для каждого элемента. Тогда, параметр потока отказов устройства при экспоненциальном распределении наработки /26/

$$\omega = \sum_i^N \lambda_i \cdot k_{\text{э}i}, \quad (7.19)$$

где $k_{\text{э}i}$ - эксплуатационный коэффициент i -го элемента.

В действительности эксплуатационные коэффициенты $k_{\text{э}i}$ имеются только для групп элементов. При наличии k групп элементов

$$\omega = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot k_{\text{э}i} \cdot N_i. \quad (7.20)$$

Интенсивность отказов элементов или групп элементов (формулы 7.19 и 7.20) должна соответствовать тем условиям, которые считались исходными при оценке эксплуатационных коэффициентов. В таблице 13 Приложения даны эксплуатационные коэффициенты для наземной, корабельной и самолетной аппаратуры.

7.3.3. Расчет показателей надежности

Приведем методику расчета характеристик надежности, рекомендованную в /25/.

Согласно этой методике расчет надежности подразделяется на **предварительный** и **окончательный**.

Предварительный расчет обычно выполняется на этапе эскизного проектирования, когда производится сравнительный анализ различных вариантов электрической схемы по ожидаемой надежности.

Окончательный расчет производится тогда, когда имеется полностью разработанная схема и на основании расчетов или испытаний опытного образца известны режимы работы всех элементов (коэффициенты нагрузки, окружающая температура).

Коэффициентом нагрузки называют отношение силы тока, напряжения и рассеиваемой мощности к соответствующему для элемента данного типа предельно допустимому значению. При этом критерием степени нагрузки следует считать ту электрическую величину, которая практически оказывает решающее влияние на работоспособность элементов. Такой величиной для резистора является рассеиваемая мощность, для конденсаторов - приложенное напряжение, а для ламп чаще всего - мощность, рассеиваемая на аноде, для транзисторов – ток. Тогда коэффициент нагрузки будет определяться по формулам:

для резисторов

$$k_{нR} = \frac{P_R}{P_{R\partial}};$$

для конденсаторов

$$k_{нC} = \frac{U_c}{U_{C\partial}};$$

для ламп

$$k_{нL} = \frac{P_a}{P_{a\partial}};$$

для транзисторов

$$k_{нT} = \frac{I_T}{I_{T\partial}}.$$

Пример предварительного расчета

Требуется рассчитать вероятность безотказной работы в течение 20 час. и среднее время безотказной работы схемы, состоящей из 10 электронных ламп, 50 резисторов, 40 конденсаторов, 5 трансформаторов и 4 разъемов.

На основе анализа статистических материалов установлены следующие данные об опасности отказов отдельных элементов:

Элементы	$\lambda_{\text{ср}}, 1/\text{ч}$
Электронные лампы	$(0,08-0,11) \cdot 10^{-3}$
Резисторы	$(0,003-0,013) \cdot 10^{-3}$
Конденсаторы	$(0,0014-0,018) \cdot 10^{-3}$
Трансформаторы	$0,005 \cdot 10^{-3}$
Разъемы	$0,00005 \cdot 10^{-3}$

Максимальное значение вероятности безотказной работы в течение 20 часов найдем, подставив в формулу (7.16) наименьшие значения интенсивностей отказов:

$$P(20\text{ч}) = e^{-(0,08 \cdot 10 + 0,008 \cdot 50 + 0,0014 \cdot 40 + 0,005 \cdot 5 + 0,00005 \cdot 4) \cdot 0,003 \cdot 20} = 0,98.$$

Интенсивность отказов схемы

$$\lambda_{\text{сmin}} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час.}$$

Среднее время безотказной работы

$$T_{\text{ср}} = 1/\lambda_{\text{сmin}} = 970 \text{ часов.}$$

Минимальное значение вероятности безотказной работы найдем, подставив в формулу (7.16) наибольшие значения интенсивностей отказов:

$$P_{\text{min}}(20 \text{ час}) = e^{-0,05} = 0,95.$$

Пример окончательного расчета

Требуется рассчитать вероятность $P(t)$, а также среднее время $T_{\text{ср}}$ безотказной работы устройства, состоящего из двух электронных приемно-усилительных ламп, десяти углеродистых резисторов и четырех слюдяных конденсаторов. Устройство должно работать непрерывно в течение 100 час. в лабораторных условиях.

Коэффициенты нагрузки всех элементов известны, окружающая температура $+60^\circ \text{C}$.

По графику (рисунок 7.2) определяем интенсивность отказов резисторов, а по графику (рисунок 7.3) - интенсивность отказов конденсаторов.

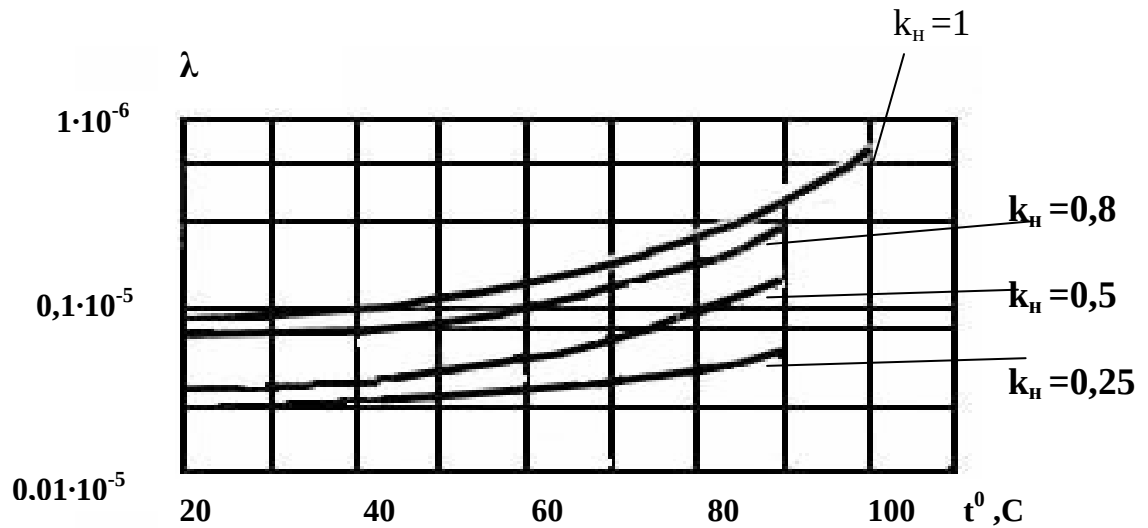


Рисунок 7.2. График интенсивности отказов резисторов от температуры

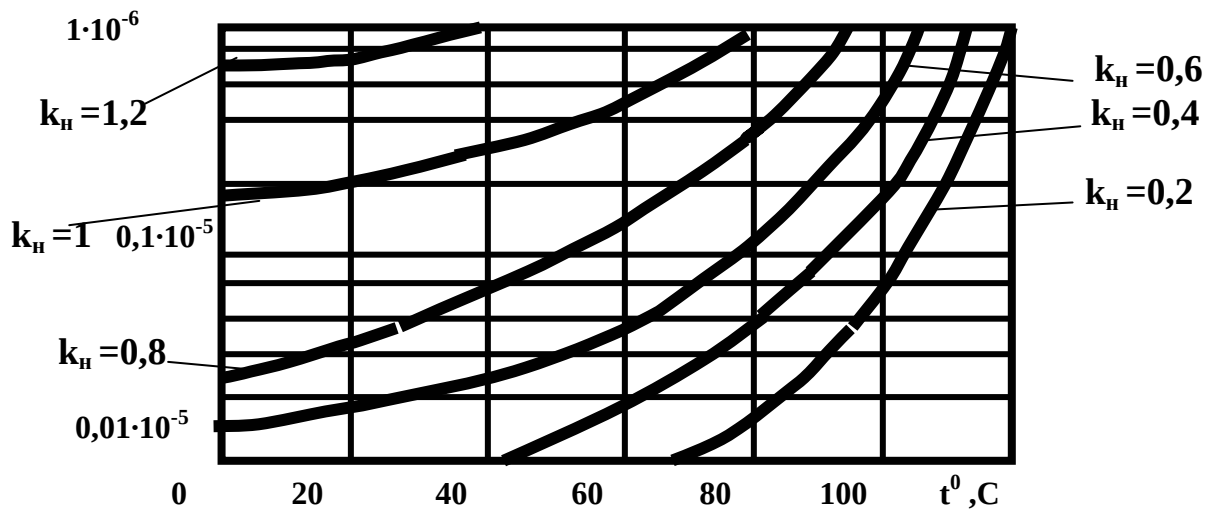


Рисунок 7.3. График интенсивности отказов конденсаторов от температуры

Принимаем интенсивность отказов ламп $\lambda = 1 \cdot 10^{-5}$ час и с помощью графика (рисунок 7.4) производим учет влияния коэффициента нагрузки и окружающей температуры. Полученные результаты приведены в таблице 7.2.

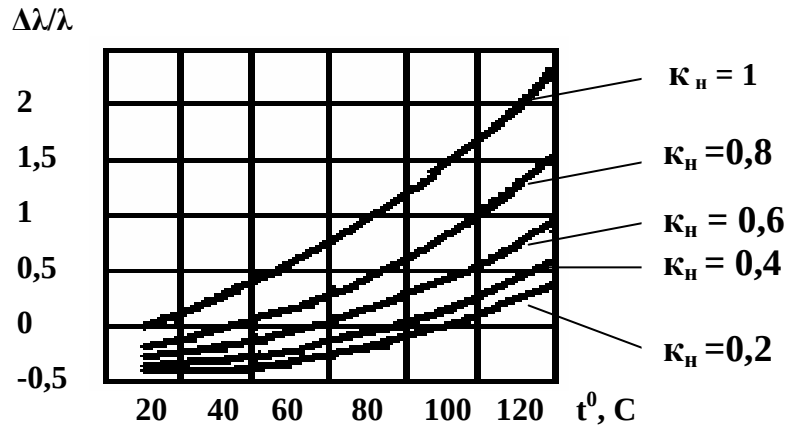


Рисунок 7.4. Зависимость относительного изменения опасности отказов электровакuumных приборов от температуры окружающей среды и коэффициента нагрузки

Таблица 7.2. Результаты расчетов интенсивностей отказов элементов

Наименования элементов	Количество	Режим работы		Интенсивность отказов λ , 10^{-4} 1/час
		Температура	Коэффициент нагрузки k_n	
Резисторы	4	+60	0,8	0,1
	6	+60	0,5	0,06
Конденсаторы	2	+60	0,6	0,04
	2	+60	0,4	0,02
Лампы	2	+60	0,8	1,1

Вероятность безотказной работы устройства в течение времени непрерывной работы, равного 100 час., на основании формулы (7.16)

$$P(100 \text{ Час.}) = e^{-3,08 \cdot 0,001} = 0,997.$$

Среднее время безотказной работы системы

$$T_{cp} = 1/\lambda_c = 1/3 \cdot 10^{-5} = 33 \text{ 000 часов.}$$

8. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ «КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ РЭС»

Введение

В результате изучения курса студенты должны получить знания по теоретическим и инженерным основам конструирования, технологии, методам расчета элементов, узлов, блоков и систем РЭС с точки зрения системного подхода к конструированию; уметь предлагать конструкторские решения, удовлетворяющие требованиям промышленного производства, а также готовить техническую документацию на основе современных методик и достижений компьютерных технологий.

Учебным планом специальности 200700 для студентов заочной формы дистанционного обучения изучение данной дисциплины предусмотрено в следующие сроки и в следующем объеме:

Семестр: восьмой.

Отчетность: зачет, экзамен - восьмой семестр.

Всего часов - 63, из них:

лекции - 36 часов;

расчетно-практические занятия - 18 часов.

В процессе обучения студент должен выполнить две текстовые контрольные работы. Первая контрольная работа – по расчету теплового режима и эффективности экранирования – содержит две задачи, вторая работа – по расчету амортизации - одну задачу. Работы с подробным решением и необходимыми пояснениями должны высылаться в университет для проверки.

Оценку "зачтено" студент получает при условии выполнения всех расчетно-практических заданий ; после этого он допускается к сдаче экзамена.

8.1. Краткая программа лекционного курса

1. Введение в курс - 2 часа.

Цели, структура и задачи курса. Взаимосвязь курса с другими дисциплинами, системный характер научно-технических проблем при решении задач конструирования РЭС. Специфика курса, методы исследований.

2. Проектирование печатных плат и печатных узлов. Чертежи печатных плат и узлов. Методы и технология изготовления печатных плат.
- 4 часа.

3. Общая характеристика теплообмена в РЭС. Основные законы передачи тепла за счет теплопроводности, конвекции и излучения. Методы расчета и системы обеспечения тепловых режимов. - 6 часов.

4. Вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС и обеспечение ЭМС при конструировании РЭС. Паразитные связи и наводки в конструкциях РЭС. Принципы электромагнитного экранирования, расчет и выбор конструкций экранов (электростатических, магнитостатических и электромагнитных). Фильтрация и заземление. - 8 часов.

5. Защита РЭС от механических воздействий. Вибрация, удары, перегрузки и комплексные воздействия. Расчет статических и динамических характеристик РЭС. Выбор системы амортизации и методы расчета системы амортизации для различных типов и конструкций РЭС. - 4 часа.

6. Защита РЭС от внешних воздействий. Процессы проникновения влаги и коррозии. Методы влагозащиты (оксидные покрытия, пропитка, обволакивание, заливка, герметизация) и расчет толщины защитных покрытий. - 2 часа.

7. Классификация РЭС (бортовое, морское, наземное, возимое, бытовое) и условия эксплуатации. Методы конструирования, стандартизации и унификации, типовые конструкции, технология изготовления конструкций. Стадии разработки РЭС и конструкторская документация, виды и типы схем. - 6 часов.

8. Основы теории надежности РЭС. - 4 часа.

8.2. Список рекомендуемой литературы

1. Разработка и оформление конструкторской документации: Справочник/ Под ред. Г.А.Романычевой. - М.: Сов.радио, 1993.
2. Астафьев А.В. Окружающая среда и надежность РЭА. - М.: Энергия, 1964.
3. Варламов Р.Г. Компонировка РЭА. - М.: Сов.радио, 1975.
4. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций: Справочник/ Под ред. Н.А.Сидорова. - М.: Сов.радио, 1976.
5. Волин М.Л. Паразитные процессы в РЭА. - М.: Сов.радио, 1972.
6. Справочник конструктора РЭА. /Под ред. Р.Г.Варламова.- М.: Радио и связь, 1980.- 480 с.
7. Справочник конструктора РЭА. /Под ред. Р.Г.Варламова.- М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

8. Пестряков В.Б., Кузенков В.Д. Радиотехнические системы. - М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
9. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.
10. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. – М.: Советское радио, 1976. – 232 с.
11. Суровцев Ю.А. Амортизация радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское радио, 1974. – 176 с.
12. Ненашев А.П., Коледов Л.А. Основы конструирования микроэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1981. – 304 с.
13. Князев А.Д. и др. Конструирование РЭА и ЭВА с учетом ЭМС.- М.: Радио и связь, 1989.- 224 с.
14. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для РЭА. - М.: Сов.радио, 1979.- 216 с.
15. Каден Г. Электромагнитные экраны. - М.: Энергия, 1957.-327 с.
16. Барнс Д. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами. – М.: Мир, 1990. – 238 с.
17. Гелль П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация РЭА. – Л.: 1984.

Дополнительная литература

1. Шерстнев В.В. Конструирование и микроминиатюризация ЭВА. – М.: Радио и связь, 1984.
2. Поляков К.П. Конструирование приборов и устройств РЭА. – М.: Радио и связь, 1982.
3. Хилл П. Наука и искусство проектирования. – М.: Мир, 1986.
4. Джонс Д. Методы проектирования. - М.: Мир, 1986.
5. Яншин А.Я. Теоретические основы конструирования , технологии и надежности ЭВА. - М.: Радио и связь, 1983.
6. Заковряшин А.И. Конструирование РЭА. - М.: Радио и связь, 1988.
7. Токарев М.Ф. и др. Механические воздействия и защита РЭА. - М.: Радио и связь, 1984.
8. Груев И.Д. Электрохимические покрытия изделий РЭА. Справочник. -М.: Радио и связь, 1988.
9. Фрумеин А.В. и др. Расчет и конструирование РЭА. – М.: Высшая школа, 1985.
10. Парфенов Е.М. Проектирование конструкций РЭА. Учебное пособие. - М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.
11. Фридман Е.И. Герметизация РЭА. - М.: Сов.радио, 1978.

8.3. Контрольные работы

В контрольной работе № 1 – "Расчет теплового режима ЭРЭ и эффективности экранирования РЭС" – студент должен выполнить расчеты по методикам и примерам, изложенным в учебном пособии в разделе 3 "Тепломассобмен в РЭС" и в разделе 5 "Обеспечение электромагнитной совместимости РЭС".

В контрольной работе № 2 – "Расчет системы амортизации" – студент должен выполнить расчеты по методике и примерам, изложенным в учебном пособии в разделе 4.7 "Расчет системы амортизации" и по примеру, приведенному в данном разделе.

Пример расчета системы амортизации. Блок формирования сигналов имеет массу $M = 40$ кг и габаритные размеры $540 \times 200 \times 580$ мм³. Блок предназначен для работы в кузове автомобиля. На платформу автомобиля действуют виброперегрузки в диапазоне частот $7 \dots 50$ Гц.

1. Задается схема расположения амортизаторов. При этом производится рациональное размещение. Как правило, в большинстве случаев применяется нижний монтаж (рис.4.4,а)

2. Определяем статическую нагрузку на каждый амортизатор P_i из системы уравнений:

$$\sum_{i=1}^n P_{ix} = C_x; \quad \sum_{i=1}^n P_{iy} = C_y; \quad \sum_{i=1}^n P_{iz} = C_z;$$

$$\sum_{i=1}^n (P_{ix} y_i - P_{iy} x_i) = 0; \quad \sum_{i=1}^n (P_{iy} z_i - P_{iz} y_i) = 0;$$

$$\sum_{i=1}^n (P_{iz} x_i - P_{ix} z_i) = 0,$$

где C – вес изделия; n – число амортизаторов; x_i и y_i – координаты точек крепления амортизаторов относительно центра масс прибора.

$$\begin{cases} P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 392, \\ (P_3 + P_4) 0,27 - (P_1 + P_2) 0,2 = 0, \\ (P_2 + P_3) 0,25 - (P_1 + P_4) 0,25 = 0, \\ (P_1 - P_2) 0,05 - (P_3 - P_4) 0,0675 = 0. \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений, находим

$$P_1 = P_2 = 112,6 \text{ Н}; P_3 = P_4 = 83,4 \text{ Н}.$$

3. По номинальной статической нагрузке выбираем тип амортизатора. В данном случае, учитывая условия эксплуатации и конструктивные особенности, подходят пружинные амортизаторы с воздушным демпфированием типа АД-10 и АД-15.

Амортизаторы АД-10 имеют номинальную статическую нагрузку 70 ...100 Н, коэффициент жесткости 117,7 Н/см и могут быть использованы в качестве амортизаторов A_3 и A_4 . Амортизаторы АД-15 (для A_1 и A_2) имеют соответственно $P_{\text{ном}} = 1000 \dots 150 \text{ Н/см} = 186,4 \text{ Н/см}$. Показатель затухания амортизаторов $\varepsilon = 0,5$.

1. Определяем статическую осадку каждого амортизатора (по ф.4.5)

$$\delta_{\text{ст}} = P_i / K_i;$$

$$\delta_{\text{ст } 1, 2} = 112,6 / 186,4 = 0,6 \text{ см};$$

$$\delta_{\text{ст } 3, 4} = 83,4 / 117,7 = 0,71 \text{ см}.$$

Так как осадка амортизаторов получилась разной, то требуется произвести выравнивание блока с помощью нивелирующих прокладок под амортизаторы A_3 и A_4 .

4. Определяем толщину прокладок по формуле $\Delta i = \delta_i - \delta_{\text{стmin}}$:

$$\Delta_{3, 4} = 0,71 - 0,6 = 0,11 \text{ см}.$$

5. Произведем динамический расчет системы амортизаторов.

Для этого определим, прежде всего, частоту собственных колебаний системы по формуле 4.6:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{M}},$$

где K_{Σ} — суммарная жесткость системы.

В данном случае $K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 K_{\text{вм}i} = 608,2 \text{ Н/см}$.

Получаем

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{60820}{40}} = 6,2 \text{ Гц}.$$

По графику (рис.4.2) определяем коэффициент динамичности системы для кинематического возбуждения в диапазоне частот 7...50 Гц.

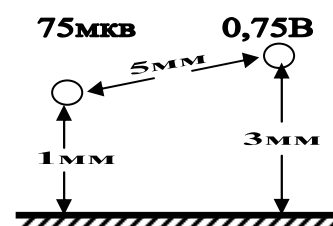
8.3.1. Контрольная работа № 1

"Расчет теплового режима ЭРЭ и эффективности экранирования РЭС"

ВАРИАНТ 1

1. Кристалл полупроводникового прибора диаметром 2мм размещён на поликоровой подложке. Толщина подложки 3мм, максимально допустимая температура кристалла 85°C , температура подложки не более 50°C , коэффициент теплопроводности поликора 25 Вт/м*К. Определить допустимую мощность данного полупроводникового прибора.

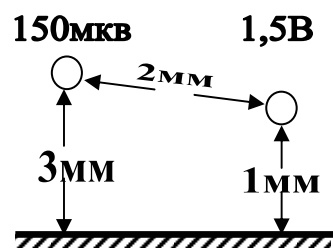
2. Два проводника с уровнями сигналов 75 мкВ и 0,75 В на длине 75 мм расположены параллельно друг другу и корпусу прибора. Диаметр проводников 0,75мм. Частота сигнала 3,5 МГц. Определить требуемую эффективность экранирования проводников, если допустимое соотношение сигнал/помеха составляет 40 дБ. Выбрать материал и толщину экрана.



ВАРИАНТ 2

1. Транзистор 2Т962А закреплен на радиаторе винтовым соединением. Толщина радиатора 4 мм. Коллектор изолирован от радиатора слюдяными шайбами толщиной 0,5мм. Для механической защиты слюды от гайки использована стальная шайба толщиной 1мм. Определить температуру транзистора, если радиатор нагревается до 50°C при токе коллектора 5А и напряжении коллектор-эмиттер 10В. (Коэффициент теплопроводности слюды 0,5 Вт/м*К, стали 45 Вт/м*К).

2. Два проводника с уровнями сигналов 150 мкВ и 1,5 В на длине 150 мм расположены параллельно друг другу и корпусу прибора. Диаметр проводников 2мм. Частота сигнала 2,5 МГц. Определить требуемую эффективность экранирования проводников, если допустимое соотношение сигнал/помеха составляет 40 дБ. Выбрать материал и толщину экрана.



ВАРИАНТ 3

1. РЭС заключена в шарообразную оболочку с внутренним диаметром 1 м, выполненную из теплоизоляционного материала с коэффициентом теплопроводности $0,1 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$. Определить необходимую толщину теплоизоляционной оболочки, если температура внутри оболочки должна быть не ниже 20°C при охлаждении внешней поверхности до -155°C . Мощность тепловыделения объекта 500 Вт.

2. Сетчатый экран изготовлен из латунной сетки с шагом $S = 0,25 \text{ мм}$ и радиусом проволоки $r_s = 0,045 \text{ мм}$. Определить ЭЭ на длине волны 3 м, если в месте крепления экранов имеются щели длиной 8 мм.

ВАРИАНТ 4

1. Определить конвективно-кондуктивный коэффициент теплопередачи для вертикально ориентированной воздушной прослойки толщиной 50 мм, длиной 250 мм, шириной 200 мм. Температуры нагретых поверхностей 70°C и 35°C .

2. Постороннее помехонесущее поле наводит в катушке колебательного контура передатчика с $f_0 = 30 \text{ кГц}$ ЭДС. Для обеспечения нормальной работы ЭЭ должна составлять 30 дБ. Определить толщину длинного цилиндрического экрана, диаметр которого $D = 40 \text{ мм}$.

ВАРИАНТ 5

1. Какой максимальный ток выдержит одиночный провод диаметром 0,5 мм без разрушения изоляции при естественной конвекции, если сопротивление погонного метра 0,1 Ом, температура среды не выше 50°C , давление нормальное? Температура разрушения изоляции 150°C , толщиной изоляции пренебречь.

2. Определить величину затухания электромагнитного поля с частотой 75 КГц в экране из конструкционной стали, в дБ, если в месте стыка экрана имеется щель высотой 0,5 мм. Сечение щели близкое к прямоугольному. Толщина экрана 1 мм.

ВАРИАНТ 6

1. Транзистор П601 установлен в центре металлического диска радиусом 50 мм и толщиной 3 мм. Степень черноты поверхности резистора $\epsilon = 0,8$, температура окружающей среды 20°C при нормальном давлении. Среднеповерхностная температура диска 60°C . Рассчитать мощность на транзисторе.

2. Оценить ЭЭ экранов одинакового размера $0,5*0,4*0,2 \text{ м}^3$, изготовленных из листовой стали и алюминия, на длине волны 300 м и 0,3 м. Определить толщину экранов.

ВАРИАНТ 7

1. Через резистор ПЭ-20 сопротивлением 470 Ом течет ток 0,1 А. Степень черноты поверхности резистора 0,8, температура окружающей среды 20°C . Размеры резистора $0,05*0,018 \text{ м}$. Рассчитать среднеповерхностную температуру при нормальном давлении.

2. Определить величину затухания электромагнитного поля с частотой 300 КГц в экране из конструкционной стали, в дБ, если в месте стыка экрана имеется щель высотой 0,75 мм. Сечение щели близкое к прямоугольному. Толщина экрана 1,0 мм, $R_s = 0,5 \text{ м}$.

ВАРИАНТ 8

1. Транзистор ГТ804 установлен в центре прямоугольной металлической пластины $0,12*0,18 \text{ м}$. Мощность, рассеиваемая транзистором 7 Вт, он и пластина находятся в продольном потоке воздуха, протекающего вдоль большой стороны со скоростью 2,5 м/с, при температуре окружающей среды 15°C . Тепловое сопротивление переход-корпус $2,5^{\circ} \text{ C/Вт}$, прибор-пластина $0,1^{\circ} \text{ C/Вт}$. Рассчитать температуру р-п перехода при нормальном давлении. Мощностью, рассеиваемой непосредственно корпусом, пренебречь.

2. Сетчатый экран изготовлен из латунной сетки с шагом $S=0,25 \text{ мм}$ и радиусом проволоки $r_s = 0,045 \text{ мм}$. Определить ЭЭ на длине волны 30 м, если в месте крепления экранов имеются щели длиной 8 мм.

ВАРИАНТ 9

1. Бескорпусной транзистор с размерами основания 2×2 мм приклеен к подложке из диэлектрика. Толщина подложки 0,5 мм, клеевого слоя 0,1 мм. Коэффициент теплопроводности подложки $1 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, клея $0,1 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$. Подложка размещена на радиаторе. Определить максимальную величину теплового потока, протекающую за счёт теплопроводности от транзистора к радиатору, если температура радиатора 50°C , транзистора не более 85°C .

2. Определить величину затухания электромагнитного поля с частотой 150 КГц в экране из конструкционной стали, в дБ, если в месте стыка экрана имеется щель высотой 0,5 мм. Сечение щели близкое к прямоугольному. Толщина экрана 0,8 мм.

ВАРИАНТ 10

1. Транзистор 2Т829В закреплён на радиаторе винтовым соединением. Толщина радиатора 4 мм. Коллектор изолирован от радиатора слюдяными шайбами толщиной 0,3 мм. Слюдяная шайба защищается от гайки стальной шайбой толщиной 0,1 мм. Определить температуру кристалла, если радиатор нагревается до 60°C при токе коллектора 3 А и напряжении коллектор-эмиттер 50 В.

2. Определить ЭЭ алюминиевого перфорированного экрана на длине волны 3 м и 0,3 м. Толщина экрана $d = 1$ мм; шаг отверстий $a = 15$ мм; диаметр отверстий $D = 10$ мм. Большой размер щели равен диаметру перфорации.

ВАРИАНТ 11

1. Определить тепловой поток, рассеиваемый вертикально ориентированной поверхностью размерами $0,6 \times 0,4$ м, температура поверхности 50°C , степень черноты 0,78, температура окружающей среды 30°C .

2. Определить величину затухания электромагнитного поля с частотой 100 КГц в экране из конструкционной стали в дБ, если в месте стыка экрана имеется щель высотой 0,5 мм. Сечение щели близкое к прямоугольному. Толщина экрана 1,5 мм.

ВАРИАНТ 12

1. Нагреватель с оболочкой представляет собой плоский диск диаметром 200 мм, расположенный горизонтально. Предельная температура оболочки 300°C , степень черноты 0,9. Определить максимальную мощность, которую способен рассеивать нагреватель при нормальном атмосферном давлении и температуре воздуха 40°C .

2. Усилитель низкой частоты (УНЧ) с чувствительностью 1,25 мкВ расположен на расстоянии 0,42 м от электромашиного усилителя (ЭМУ), работающего от сети 50 Гц. УНЧ настроен на частоту 100 Гц. Индукция магнитного поля, создаваемая ЭМУ на этом расстоянии, составляет $2,5 \cdot 10^{-3}$ Тл. Длина входного кабеля УНЧ составляет 1,5 м, расстояние между сигнальным и нулевым проводом составляет 2 мм. Определить необходимую эффективность экранирования входного кабеля УНЧ, если допустимое соотношение сигнал/помеха составляет 30 дБ. Выбрать материал и толщину экрана.

ВАРИАНТ 13

1. Рассчитать тепловой поток между горизонтально расположенными поверхностями (более нагретая поверхность снизу) при нормальном атмосферном давлении. Температуры поверхностей 40° и 20°C , степени черноты 0,4 и 0,8 соответственно.

2. Сетчатый экран изготовлен из латунной сетки с шагом $S = 0,3$ мм и радиусом проволоки $r_s = 0,05$ мм. Определить ЭЭ на длине волны 1 м, если в месте крепления экранов имеются щели длиной 10 мм.

ВАРИАНТ 14

1. Плоская поверхность $0,5 \times 0,4$ с температурой 45°C находится в продольном потоке воздуха со скоростью 2 м/с при температуре 20°C . Степень черноты поверхности 0,82. Рассчитать рассеиваемый тепловой поток.

2. Сетчатый экран изготовлен из латунной сетки с шагом $S = 0,5$ мм и радиусом проволоки $r_s = 0,03$ мм. Определить ЭЭ на длине волны 3 м, если в месте крепления экранов имеются щели длиной 20 мм.

ВАРИАНТ 15

1. Баллон электронной лампы рассеивает мощность 8,5 Вт и имеет размер 64,5*21,6 мм. Степень черноты поверхности 0,6, температура окружающей среды 20⁰С. Рассчитать среднеповерхностную температуру баллона при нормальном давлении.

2. Определить величину затухания электромагнитного поля с частотой 105 КГц в экране из конструкционной стали, в дБ, если в месте стыка экрана имеется щель высотой 0,8 мм. Сечение щели близкое к прямоугольному. Толщина экрана 1мм.

ВАРИАНТ 16

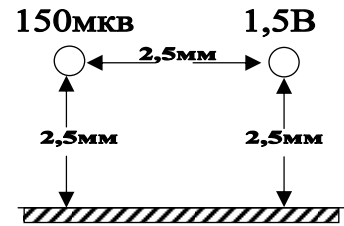
1. Транзистор 2Т829В закреплён на радиаторе винтовым соединением. Толщина радиатора 6 мм. Коллектор изолирован от радиатора слюдяными шайбами толщиной 0,3 мм. Слюдяная шайба защищается от гайки стальной шайбой толщиной 0,1 мм. Определить температуру кристалла, если радиатор нагревается до 70⁰С при токе коллектора 4А и напряжении коллектор-эмиттер 60В.

2. Усилитель низкой частоты (УНЧ) с чувствительностью 1,0 мкВ расположен на расстоянии 0,1 м от электромашинного усилителя (ЭМУ), работающего от сети 50Гц. УНЧ настроен на частоту 100 Гц. Индукция магнитного поля, создаваемая ЭМУ на этом расстоянии, составляет $2 \cdot 10^{-3}$ Тл. Длина входного кабеля УНЧ составляет 1,5 м, расстояние между сигнальным и нулевым проводом составляет 2 мм. Определить необходимую эффективность экранирования входного кабеля УНЧ, если допустимое соотношение сигнал/помеха составляет 40 дБ. Выбрать материал и толщину экрана.

ВАРИАНТ 17

1. Кристалл полупроводникового прибора диаметром 3 мм размещён на поликоровой подложке. Толщина подложки 2 мм, максимально допустимая температура кристалла 85⁰С, температура подложки не более 50⁰С, коэффициент теплопроводности поликора 25 Вт/м*К. Определить допустимую мощность данного полупроводникового прибора.

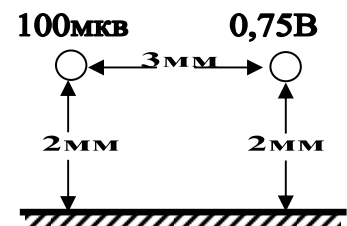
2. Два проводника с уровнями сигналов 150 мкВ и 1,5 В на длине 200 мм расположены параллельно друг другу и корпусу прибора. Диаметр проводников 2 мм. Частота сигнала 7,5 МГц. Определить требуемую эффективность экранирования проводников, если допустимое соотношение сигнал/помеха составляет 40 дБ. Выбрать материал и толщину экрана.



ВАРИАНТ 18

1. Транзистор 2Т962А закреплен на радиаторе винтовым соединением. Толщина радиатора 6 мм. Коллектор изолирован от радиатора слюдяными шайбами толщиной 0,3 мм. Для механической защиты слюды от гайки использована стальная шайба толщиной 1 мм. Определить температуру транзистора, если радиатор нагревается до 50°C при токе коллектора 5 А и напряжении коллектор-эмиттер 10 В. (Коэффициент теплопроводности слюды 0,5 Вт/м*К, стали 45 Вт/м*К).

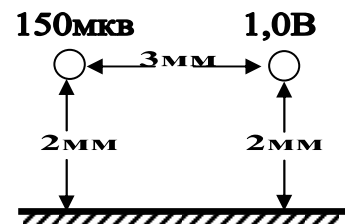
2. Два проводника с уровнями сигналов 100 мкВ и 0,75 В на длине 150 мм расположены параллельно друг другу и корпусу прибора. Диаметр проводников 3 мм. Частота сигнала 3,5 МГц. Определить требуемую эффективность экранирования проводников, если допустимое соотношение сигнал/помеха составляет 56 дБ. Выбрать материал и толщину экрана



ВАРИАНТ 19

1. РЭС заключена в шарообразную оболочку с внутренним диаметром 1,5 м, выполненную из теплоизоляционного материала с коэффициентом теплопроводности 0,2 Вт/м*К. Определить необходимую толщину теплоизоляционной оболочки, если температура внутри оболочки должна быть не ниже 20°C при охлаждении внешней поверхности до -155°C. Мощность тепловыделения объекта 600 Вт.

2. Два проводника с уровнями сигналов 150 мкВ и 1,0 В на длине 200 мм расположены параллельно друг другу и корпусу прибора. Диаметр проводников 1,5 мм. Частота сигнала 5 МГц. Определить требуемую эффективность экранирования проводников, если допустимое соотношение сигнал/помеха составляет 40 дБ. Выбрать материал и толщину экрана.



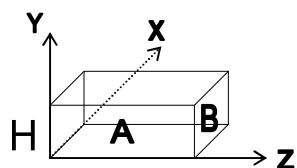
ВАРИАНТ 20

1. Определить конвективно-кондуктивный коэффициент теплопередачи для вертикально ориентированной воздушной прослойки толщиной 50мм, длиной 250мм, шириной 200мм. Температуры нагретых поверхностей 70°C и 35°C .

2. Определить ЭЭ латунного перфорированного экрана на длине волны 2 м и 0,3 м. Толщина экрана $d = 1$ мм; шаг отверстий $a = 15$ мм; диаметр отверстий $D = 10$ мм. Большой размер щели равен диаметру перфорации.

8.3.2. Контрольная работа № 2**"Расчет системы амортизации"****ВАРИАНТ 1**

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: $B=30$; $H=15$; $A=20$.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

$m_1=2$ $m_2=2$ $m_3=1$ $m_4=1$

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	m_1	m_2	m_3	m_4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

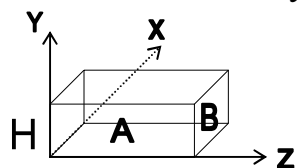
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 2

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: $B=30$; $H=12$; $A=30$.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

$m_1=2$ $m_2=1$ $m_3=1$ $m_4=2$

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	m_1	m_2	m_3	m_4
X	7	20	20	10
Y	7	6	5	5
Z	7	7	20	20

Условия эксплуатации:

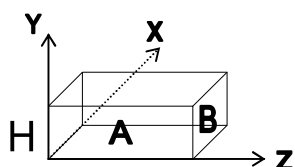
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 3

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: $B=20$; $H=15$; $A=30$.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

$m_1=1$ $m_2=2$ $m_3=2$ $m_4=1$

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	м1	м2	м3	м4
X	8	13	15	5
Y	4	6	7	7
Z	10	10	22	22

Условия эксплуатации:

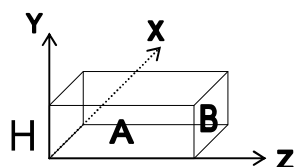
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 4

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: B=30; H=10; A=30.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

м1=1 м2=2 м3=2 м4=1

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	м1	м2	м3	м4
X	7	20	23	10
Y	7	6	5	3
Z	7	7	22	21

Условия эксплуатации:

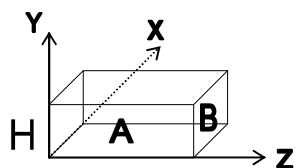
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 5

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда
с размерами: B=20; H=15; A=30

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

m1=2,4 m2=2,4 m3=2 m4=2

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	M1	m2	m3	m4
X	8	13	15	5
Y	4	6	7	7
Z	10	10	22	22

Условия эксплуатации:

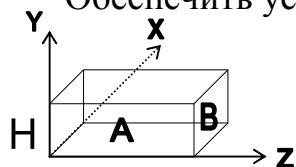
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 6

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда
с размерами: $B=20$; $H=15$; $A=30$.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

$m_1=1,4$ $m_2=2$ $m_3=2$ $m_4=1,4$

координаты центра тяжести ФУ (см):

	m_1	m_2	m_3	m_4
X	7	15	15	5
Y	6	6	8	5
Z	7	7	20	22

Условия эксплуатации:

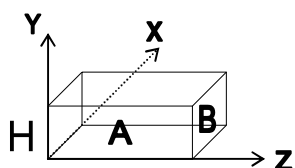
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 5...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%;

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 7

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда
с размерами: $B=20$; $H=15$; $A=30$.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

$m_1=1$ $m_2=2$ $m_3=2$ $m_4=1$

координаты центра тяжести ФУ (см.):

	m_1	m_2	m_3	m_4
X	8	13	15	5
Y	4	6	7	7
Z	10	10	22	22

Условия эксплуатации:

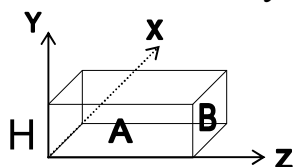
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 8

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: B=30; H=12; A=30.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

m1=1 m2=2 m3=2 m4=1

координаты центра тяжести ФУ (см):

	m1	m2	m3	m4
X	7	20	20	9
Y	7	6	5	8
Z	7	7	15	15

Условия эксплуатации:

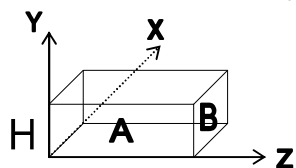
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 9

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда
с размерами: $B=30$; $H=15$; $A=20$.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

$m_1=2$ $m_2=2$ $m_3=1$ $m_4=1$

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	m_1	m_2	m_3	m_4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

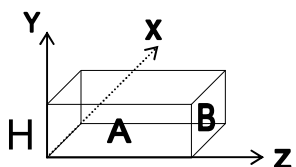
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 10

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда
с размерами: $B=30$; $H=15$; $A=20$.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

$m_1=3$ $m_2=3$ $m_3=2$ $m_4=1$

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	м1	м2	м3	м4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

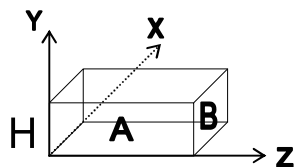
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 11

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: $B=30$; $H=15$; $A=20$.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

$m_1=1$ $m_2=3$ $m_3=2$ $m_4=1$

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	м1	м2	м3	м4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

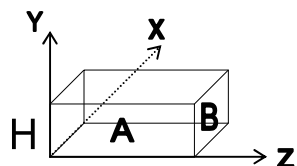
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 12

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: $B=30$; $H=15$; $A=20$.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

$m_1=2$ $m_2=1$ $m_3=3$ $m_4=2$

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	m_1	m_2	m_3	m_4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

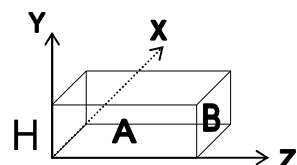
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 13

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: $B=30$; $H=15$; $A=20$.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

$m_1=1$ $m_2=1$ $m_3=2$ $m_4=3$

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	м1	м2	м3	м4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

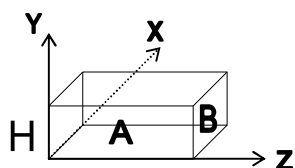
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 14

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда
с размерами: B=30; H=15; A=20.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

м1=3 м2=3 м3=3 м4=1

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	м1	м2	м3	м4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

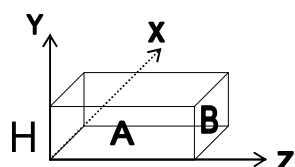
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 15

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: $B=30$; $H=15$; $A=20$.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

$m_1=3$ $m_2=3$ $m_3=3$ $m_4=2$

Координаты центра тяжести ФУ (см.):

	m_1	m_2	m_3	m_4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

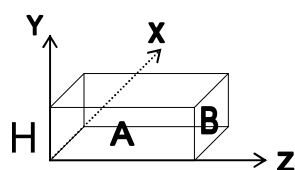
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 16

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: $B=30$; $H=15$; $A=20$.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

$m_1=2$ $m_2=2$ $m_3=2$ $m_4=3$

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	м1	м2	м3	м4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

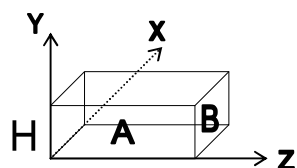
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 17

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: B=40; H=20; A=30.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

м1=2 м2=2 м3=3 м4=1

Координаты центра тяжести ФУ (см.):

	м1	м2	м3	м4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

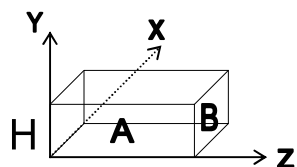
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 18

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: B=50; H=30 A=40.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

m1=2 m2=3 m3=1 m4=1

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	m1	m2	m3	m4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

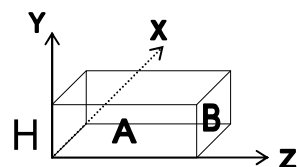
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 19

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: B=40; H=35; A=30.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

m1=1 m2=2 m3=1 m4=2

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	м1	м2	м3	м4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

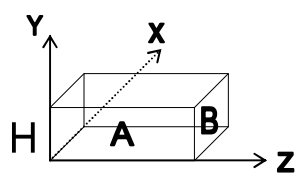
- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

ВАРИАНТ 20

Обеспечить устойчивость блока к механическим воздействиям.



Блок имеет форму параллелепипеда с размерами: B=30; H=35; A=30.

Блок состоит из функциональных узлов, масса которых (кг):

м1=2 м2=2 м3=1 м4=2

Координаты центра тяжести ФУ (см):

	м1	м2	м3	м4
X	8	20	20	9
Y	8	7	5	8
Z	6	7	12	15

Условия эксплуатации:

- ускорения при вибрации в диапазоне частот 50...2000 Гц не более 15g;
- линейное ускорение не более 15g;
- пониженная температура не ниже -55°C ;
- повышенная температура не выше $+55^{\circ}\text{C}$;
- пониженное атмосферное давление не ниже 5,46 кПа;
- относительная влажность не выше 98%.

Допустимые параметры механических воздействий на наиболее критические электрорадиоэлементы:

- вибрационное ускорение не более 13g;
- линейные ускорения не более 50g.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 26632-85. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств по функционально-конструктивной сложности. Термины и определения. - М.: Госстандарт, 1985.
2. Справочник конструктора РЭА. /Под ред. Р.Г.Варламова.- М.: Радио и связь, 1980.- 480 с.
3. Справочник конструктора РЭА. /Под ред. Р.Г.Варламова.- М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Пестряков В.Б., Кузенков В.Д. Радиотехнические системы. - М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
5. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ.
6. ГОСТ 20406-75. Платы печатные. Термины и определения. - М.: Госстандарт, 1975.
7. ОСТ 4.010.022-85. Платы печатные. Методы конструирования и расчета. - М.: Госстандарт, 1985.
8. ГОСТ 23752-79. Платы печатные. Общие технические условия. - М.: Госстандарт, 1979.
9. ГОСТ 10317-79. Платы печатные. Основные размеры. - М.: Госстандарт, 1979.
10. Разработка и оформление конструкторской документации. Справочник / Под ред. Э.Т. Романычевой. – М.: Радио и связь, 1989. – 448 с.
11. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.
12. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. – М.: Советское радио, 1976. – 232 с.
13. Суровцев Ю.А. Амортизация радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское радио, 1974. – 176 с.
14. Ненашев А.П., Коледов Л.А. Основы конструирования микроэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1981. – 304 с.
15. ГОСТ 23611-79. Совместимость РЭС электромагнитная. Термины и определения. - М.: Госстандарт, 1979.
16. Бадалов А.Л., Михайлов А.С. Нормы на параметры ЭМС РЭС. Справочник. - М.: Радио и связь, 1990.- 272с.
17. Князев А.Д. и др. Конструирование РЭА и ЭВА с учетом ЭМС.- М.: Радио и связь, 1989.- 224 с.
18. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. - М.: Связь, 1971.- 487 с.
19. Никольский В.В. Электродинамика и РРВ.- М.: Наука, 1978.- 544 с.
20. Конструкции СВЧ устройств и экранов/ Под ред. Чернушенко А.М. – М.: Радио и связь, 1989.- 400 с.
21. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для РЭА. - М.: Сов.радио, 1979.- 216 с.

22. Каден Г. Электромагнитные экраны. - М.: Энергия, 1957.-327 с.
23. Минин Б.А. СВЧ и безопасность человека. - М.: Сов.радио, 1974.- 352 с.
24. Барнс Д. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами.- М.: Мир,1990. – 238 с.
25. Зиземский Е.И. Надежность РЭА. – Л.: Судостроение, 1967.- 152 с.
26. Широков А.М. Надежность радиоэлектронных устройств. – М.: Высшая школа, 1972. – 272 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Параметры РЭА и определяющие их дестабилизирующие факторы для воздушной и ракетно-космической РЭА

Параметры	Для самолетов и вертолетов		Ракетная	Космическая
	Штатная	Аварийная		
1. Устойчивость к синусоидальным вибрациям: Δv , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, ч	5...2000 0,1...10 -	10...70 19,6...34,3 1	0...500 до 196,2 -	1,5-2500 4,9...58,9 0,5
2. Устойчивость к механическим ударам: $t_{\text{и}}$, м/с a , м/с ² N_{Σ} , ударов	15 58,8...117,7 18	- 736 500	10...12 490...981	
3. Устойчивость к циклическим изменениям температуры: $\Delta\theta$, К		223...333		
4. Воздействие повышенной влажности: Вл, % $\Delta\theta$, К $t_{\text{выд}}$, СУТ	93...100 321...330 4...7	98 313	100	
5. Воздействие термоударов: $\Delta\theta$, К/мин $\Delta\theta_{\text{пред}}$, К	2...10 213...588	221...326	208...437	
6. Воздействие пониженного атмосферного давления: p , Па	$(2..101) \cdot 10^3$	$(2..101) \cdot 10^3$	$(0,13-101) \cdot 10^3$	$(0..101) \cdot 10^8$
7. Воздействие тумана с дисперсной водностью A и водностью B : $\Delta\theta$, К	306±5			

Продолжение табл. 1

Параметры	Для самолетов и вертолетов		Ракетная	Космическая
	Штатная	Аварийная		
A , мкм B , г/м ³ $t_{\text{выд}}$, СУТ	≤ 20 2...3 -	до 5		
8. Прочность при падении с высоты h : h , мм N_{Σ} , ударов			750 10	
Примечание. Воздействие повышенной влажности (п.4) проверяется при конденсации водяных паров в процессе эксплуатации и в заданном по ТУ диапазоне температур.				

Таблица 2. Параметры РЭА и определяющие их дестабилизирующие факторы для РЭА, возимой во внутренних помещениях речных судов (4 группа по ГОСТ 16019-78)

Параметры	4 группа
1. Прочность при синусоидальных вибрациях: $\Delta\nu$, Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, ч	20 19,6 ≥ 0.5
2. Обнаружение резонансов в конструкции: $\Delta\nu$, Гц ξ , мм $t_{\text{выд}}$, мин	10...30 0,5...0.8 ≥ 4
3. Устойчивость к синусоидальным вибрациям: $\Delta\nu$, Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, ч	10...30 2,4...10,7 ≥ 4
4. Устойчивость к механическим ударам: $t_{\text{и}}$, м/с a , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 147 ≥ 60
5. Устойчивость к циклическим изменениям температуры: $\Delta\theta$, К $t_{\text{выд}}$, ч	223... 333 2...6
6. Воздействие повышенной влажности: Вл, % $\Delta\theta_1 (\Delta\theta_2)$, К $t_{\text{выд}}$, ч	93 298 (313) 72
7. Воздействие пониженной температуры: $\Theta^1_{\text{пред}} (\Theta^2_{\text{пред}})$, К $\Theta^1_{\text{раб}} (\Theta^2_{\text{раб}})$, К $t_{\text{выд}}$, ч	233 (223) 263 2...6
8. Воздействие инея и росы: $\Delta\theta$, К $t_{\text{выд}}$, ч	263 2...6

Продолжение табл. 2

Параметры	4 группа
9. Воздействие повышенной температуры: $\Theta_{\text{пред}}$, К $\Theta_{\text{раб}}$, К $t_{\text{выд}}$, ч	333 323 2...6
10. Воздействие пониженного атмосферного давления: p , Па Θ , К $t_{\text{выд}}$, ч	263 61 2...6
11 Прочность при транспортировании: $t_{\text{и}}$, мс v , мин ⁻¹ a_{max} , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 49...245 $\geq 13\,000$
12. Прочность при воздействии синусоидальной вибрации: Δv , Гц $t_{\text{выд}}$, ч a , м/с ²	10...30 2 9,8...89.2
13. Прочность при воздействии многократных ударов: $t_{\text{и}}$, мс v , мин ⁻¹ a_{max} , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 147 $\geq 12\,000$
14. Воздействие дождя с интенсивностью A : A , мм/мин $t_{\text{выд}}$, мин	3 ≥ 20
15. Воздействие соляного (морского) тумана с дисперсной водностью (95% капель) A и водностью B : $\Delta\theta$, К A , мкм B , г/м ³ $t_{\text{выд}}$, СУТ	300 1...10 2...3 ≥ 48

Таблица 3. Параметры РЭС и определяющие их дестабилизирующие факторы для стационарной РЭС 1 и 2 групп (ГОСТ 16019-78)

Параметры	Жесткость эксплуатации	
	1 группа	2 группа
1. Прочность при синусоидальных вибрациях: ν , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, ч	20 19,6 $\geq 0,5$	20 19,6 $\geq 0,5$
2. Обнаружение резонансов в конструкции: $\Delta\nu$, Гц ξ , мм $t_{\text{выд}}$, мин	10.. 30 0.5...0.8 $\geq 0,4$	10...30 0,5... 0,8 ≥ 4
3. Воздействие повышенной влажности: Вл, % Θ_1 (Θ_2), К $t_{\text{выд}}$, ч	80 298 (298) 48	93 298 (313) 72
4. Воздействие пониженной температуры: $\Theta^1_{\text{пред}}$ ($\Theta^2_{\text{пред}}$), К $\Theta^1_{\text{раб}}$ ($\Theta^2_{\text{раб}}$), К $t_{\text{выд}}$, ч	233 (233) 278 (278) 2...6	233 (223) 263 (248) 2...6
5. Воздействие инея и росы: $\Theta_{\text{пред}}$, К $t_{\text{выд}}$, ч	- -	263 2...6
6. Воздействие повышенной температуры: $\Theta_{\text{пред}}$, К $\Theta_{\text{раб}}$, К $t_{\text{выд}}$, ч	328 313 2...6	333 323 2..6
7. Воздействие пониженного атмосферного давления: Θ , К p , кПа $t_{\text{выд}}$, ч	263 61 2...6	263 61 2...6
8. Прочность при транспортировании: $t_{\text{и}}$, мс ν , мин ⁻¹	5...10 40...80	5...10 40...80

Продолжение табл. 3

Параметры	Жесткость эксплуатации	
	1 группа	2 группа
$a_{\max}$, м/с ² N_{Σ} , ударов	49...245 13000	49...245 13000
9. Воздействие дождя с интенсивностью А: А, мм/мин $t_{\text{выд}}$, мин		3 ≥20
10. Воздействие воздушно-пылевого потока: V, м/с $t_{\text{выд}}$, мин		≥10 ≥60
11. Воздействие соляного (морского) тумана с дисперсностью (95% капель) А и водностью Б: Θ, К А, мкм Б, г/м ³ $t_{\text{выд}}$, ч	300 1...10 2...3 ≥24	300 1...10 2...3 ≥48

Таблица 4. Параметры РЭС и определяющие их дестабилизирующие факторы для возимой РЭА и 3 и 5 групп (ГОСТ 16019-78)

Параметры	3 и 5 группы
1. Прочность при синусоидальных вибрациях: $\Delta\nu$, Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, ч	20 19,6 $\geq 0,5$
2. Обнаружение резонансов в конструкции: $\Delta\nu$, Гц ξ , мм $t_{\text{выд}}$, мин	10...30 0,5...0.8 ≥ 4
3. Устойчивость к синусоидальным вибрациям: $\Delta\nu$, Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, ч	10...70 6,8...37 ≥ 12
4. Устойчивость к механическим ударам: $t_{\text{и}}$, м/с ν , мин ⁻¹ a , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 147 ≥ 60
5. Устойчивость к циклическим изменениям температуры: $\Delta\theta$, К $t_{\text{выд}}$, ч	223...333 2...6
6. Воздействие повышенной влажности: Вл, % $\Delta\theta_1$ ($\Delta\theta_2$), К $t_{\text{выд}}$, ч	93 298 (313) 72
7. Воздействие пониженной температуры: $\Theta^1_{\text{пред}}$ ($\Theta^2_{\text{пред}}$), К $\Theta^1_{\text{раб}}$ ($\Theta^2_{\text{раб}}$), К $t_{\text{выд}}$, ч	233 (223) 249 (233) 2...6
8. Воздействие инея и росы: $\Delta\theta$, К $t_{\text{выд}}$, ч	263 2...6
9. Воздействие повышенной температуры: $\Theta_{\text{пред}}$, К $\Theta_{\text{раб}}$, К	333 323

Продолжение табл. 4

Параметры	3 и 5 группы
$t_{\text{выд}}, \text{ч}$	2...6
10. Воздействие пониженного атмосферного давления: $p, \text{Па}$ $\Theta, \text{К}$ $t_{\text{выд}}, \text{ч}$	263 61 2...6
11. Прочность при транспортировании: $t_{\text{и}}, \text{мс}$ $v, \text{мин}^{-1}$ $a_{\text{max}}, \text{м/с}^2$ $N_{\Sigma}, \text{ударов}$	5...10 40...80 49...245 ≥ 13000
12. Прочность при воздействии синусоидальной вибрации: $\Delta v, \text{Гц}$ $t_{\text{выд}}, \text{ч}$ $a, \text{м/с}^2$	10...70 1,5...0,75 9.8...39,2
13. Прочность при воздействии многократных ударов: $t_{\text{и}}, \text{мс}$ $v, \text{мин}^{-1}$ $a_{\text{max}}, \text{м/с}^2$ $N_{\Sigma}, \text{ударов}$	5...10 40...80 147 ≥ 12000
14. Воздействие дождя с интенсивностью A : $A, \text{мм/мин}$ $t_{\text{выд}}, \text{мин}$	3 ≥ 20
15. Воздействие воздушно-пылевого потока: $v, \text{м/с}$ $t_{\text{выд}}, \text{мин}$	≥ 10 ≥ 60
16. Воздействие соляного (морского) тумана с дисперсной водностью (95% капель) A и водностью B : $\Delta\theta, \text{К}$ $A, \text{мкм}$ $B, \text{г/м}^3$ $t_{\text{выд}}, \text{СУТ}$	300 1...10 2...3 ≥ 48
Примечание: индексы 1 и 2 относятся к первой и второй степени жесткости при эксплуатации.	

Таблица 5. Параметры РЭА и определяющие их дестабилизирующие факторы для носимой и портативной РЭА 6 и 7 групп (ГОСТ 16019 -78)

Параметры	6 группа	7 группа
1. Прочность при синусоидальных вибрациях: Δv , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, ч	20 19,6 $\geq 0,5$	20 19,6 $\geq 0,5$
2. Обнаружение резонансов в конструкции: Δv , Гц ξ , мм $t_{\text{выд}}$, мин	10...30 0.5...0.8 ≥ 4	10...30 0,5...0,8 ≥ 4
3. Устойчивость к синусоидальным вибрациям: Δv , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, мин	10...70 7,8...37 ≥ 12	10...30 2,4...10,7 ≥ 4
4. Устойчивость к механическим ударам: $t_{\text{и}}$, м/с v , мин ⁻¹ a , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 98 ≥ 60	
5. Устойчивость к циклическим изменениям температуры: $\Delta \theta$, К $t_{\text{выд}}$, ч	223...333 2...6	223...333 2...6
6. Воздействие повышенной влажности: Вл, % $\Delta \theta_1$ ($\Delta \theta_2$), К $t_{\text{выд}}$, ч	93 298 (313) 72	80 298 48
7. Воздействие пониженной температуры: $\Theta^1_{\text{пред}}$ ($\Theta^2_{\text{пред}}$), К $\Theta^1_{\text{раб}}$ ($\Theta^2_{\text{раб}}$), К $t_{\text{выд}}$, ч	233 (223) 263 (248) 2...6	233 (223) 278 (263), 2...6
8. Воздействие инея и росы: $\Delta \theta$, К $t_{\text{выд}}$, ч	263 2...6	
9. Воздействие повышенной температуры: $\Theta_{\text{пред}}$, К $\Theta_{\text{раб}}$, К $t_{\text{выд}}$, ч	333 232 2...6	328 313 2...6

Продолжение табл. 5

Параметры	6 группа	7 группа
10. Воздействие пониженного атмосферного давления: p, Па Θ, К t _{выд} , ч	263 61 2...6	263 61 2...6
11. Прочность при транспортировании: t _и , мс v, мин ⁻¹ a _{max} , м/с ² N _Σ , ударов	5... 10 40...80 49...245 ≥13 000	5... 10 40...80 49...245 ≥13 000
12. Прочность при воздействии синусоидальной вибрации: Δv, Гц t _{выд} , ч a, м/с ²	10...70 1,5...7,5 9.8...39.2	10...30 2 9.8...39,2
13. Прочность при воздействии многократных ударов: t _и , мс v, мин ⁻¹ a _{max} , м/с ² N _Σ , ударов	5...10 40...80 98 ≥6000	5...10 40...80 98 ≥6000
14. Прочность при падении с высоты h [мм]: m<5 кг m>5 кг N _Σ , ударов	750 500 11	500 - 11
15. Герметичность при погружении в воду на глубину h: h, м t _{выд} , мин	≥0,5 ≥60	
16. Воздействие дождя с интенсивностью A: A, мм/мин t _{выд} , мин	3 ≥20	3 ≥20
17. Воздействие воздушно-пылевого потока: v, м/с t _{выд} , мин	≥10 ≥60	

Продолжение табл. 5

Параметры	6 группа	7 группа
18. Воздействие соляного (морского) тумана с дисперсной водностью (95% капель) A и водностью B :		
$\Delta\theta$, К	300	300
A , мкм	1...10	1...10
B , г/м ³	2...3	2...3
$t_{\text{выд}}$, СУТ	≥ 48	≥ 48
Примечание: индексы 1 и 2 относятся к первой и второй степени жесткости при эксплуатации.		

Таблица 6. Линейные размеры, мм, ОПП, ДПП и МПП
на жестком основании

Ширина	Длина	Ширина	Длина	Ширина	Длина	Ширина	Длина	Ширина	Длина
22,5	60	60	60	90	(90)	120	140	170	170
30	40		(75)		100		(160)		200
	55		80		110		180		240
	60		90		120		200		250
	(90)		(100)		130		220		270
35	100		110		150		240		280
			120		160		280		300
40	(40)		(160)		170				340
			180		(180)				
					200				
					260				
50	(50)	62,5	125	100	100	130	150	185	205
		65	90		110		170		270
			100		120		200		
					150		300		220
					160				240
	(80)	70	(70)		170	140	(140)	200	320
			(90)		180		150		
			110		(170)		220		
			120		180		240		300
			(140)		200		280		320
	(70)		150			150	170	240	
							(180)		
							200		
							240		
							280		
	(60)								
	(50)								
	(40)								
	(30)								
	(20)								
	(10)								
	(5)								
	(0)								

Примечание. Размеры ПП без скобок являются предпочтительными.

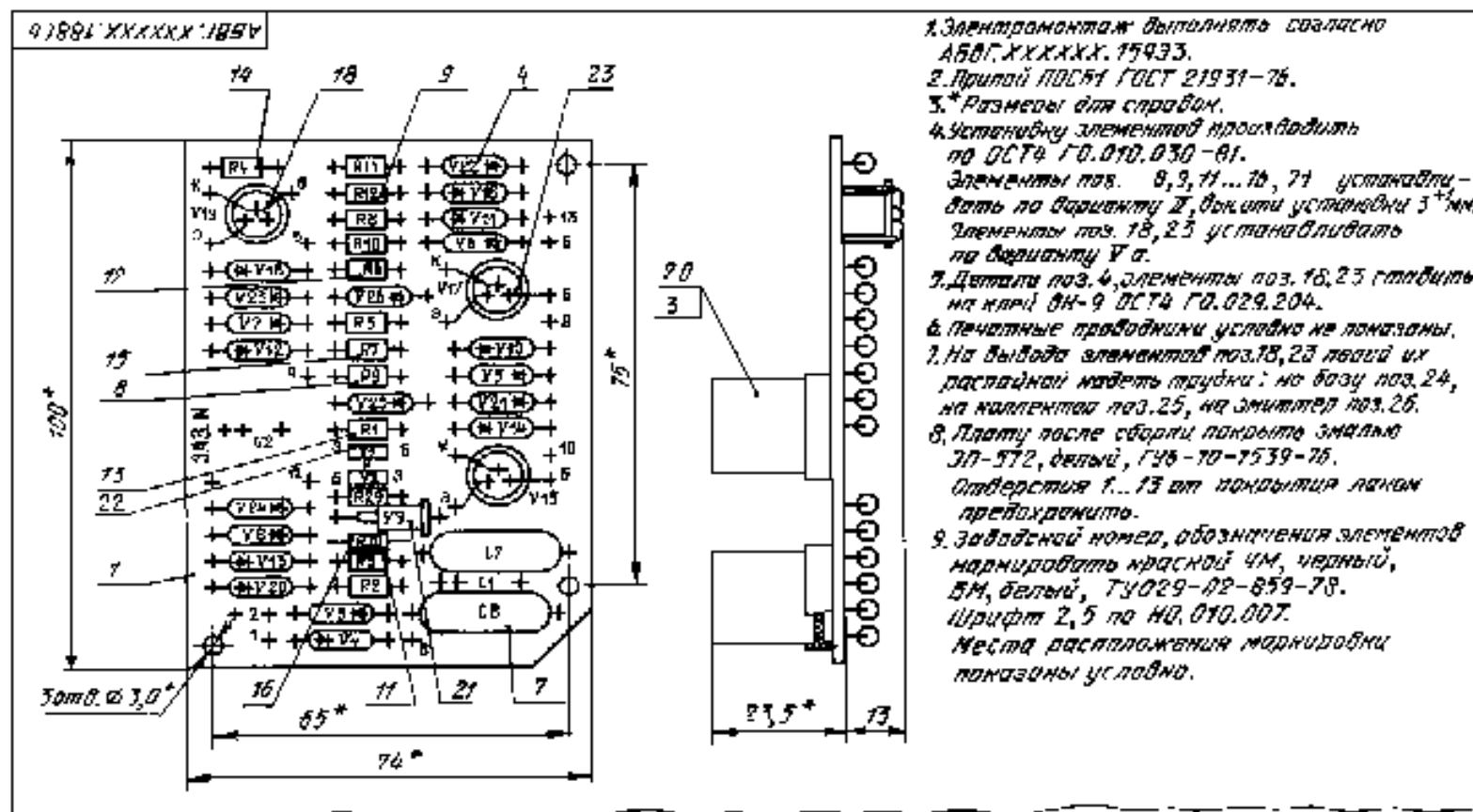


Рисунок 1. Печатный узел

Таблица 7. Материалы для печатных плат

Наименование	Марка	Область
Стеклотекстолит фольгированный толщиной 0,5...3,0 мм	СФ-1-35Г СФ-2-35Г СФ-1-50Г СФ-2-50Г	ОПП, ДПП
Стеклотекстолит нагревостойкий фольгированный толщиной 0,5...3,0 мм	СФ-1Н-35Г СФ-1Н-50Г СФ-2Н-35Г СФ-2Н-50Г	ОПП, ДПП с повышенной нагреваемостью
Стеклотекстолит фольгированный повышенной нагревостойкости	СФПН-1-50 СФПН-2-50	ОПП, ДПП с повышенной нагреваемостью
Стеклотекстолит теплостойкий фольгированный	СТФ-1 СТФ-2	ОПП, ДПП повышенной нагревостойкости
Стеклотекстолит фольгированный травящийся	ФТС-1-18-А ФТС-2-18-А ФТС-1-18-Б ФТС-2-18-Б	МПП, ГПП
Диэлектрик фольгированный тонкий	ФДМ-1А ФДМ-2А ФДМ-1Б ФДМ-2Б ФДМЭ-1А ФДМЭ-2А ФДМЭ-1Б	МПП
Гетинакс фольгированный общего назначения	ГОФ-1-35Г ГОФ-2-35Г ГОФВМ-1-35Г ГОФВМ-2-35Г	ОПП
Стеклотекстолит общего назначения негорючий фольгированный	СОНФ-1 СОНФ-2	ОПП, ДПП
Прокладочная стеклоткань	СПТ-3	МПП

Таблица 8. Основные конструктивные параметры ПП

Параметр	Класс точности			
	1	2	3	4
Минимальное значение номинальной ширины проводника a , мм	0,60	0,45	0,25	0,15
Номинальное расстояние между проводниками S , мм	0,60	0,45	0,25	0,15
Гарантийный пояс b , на наружном слое, мм	0,30	0,20	0,10	0,05
То же, на внутреннем слое, мм	0,15	0,10	0,05	0,03
Отношение диаметра отверстия к толщине платы	$\geq 0,50$	$\geq 0,50$	$\geq 0,33$	$\geq 0,33$
Допуск на отверстие Δd , мм, без металлизации, $\varnothing \leq 1$ мм	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$
То же, $\varnothing \geq 1$ мм	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$
Допуск на отверстие Δd , мм, с металлизацией, $\varnothing \leq 1$ мм	+ 0,10 - 0,15	+ 0,10 - 0,15	+ 0,05 - 0,10	+ 0,05 - 0,10
То же, $\varnothing \geq 1$ мм	+ 0,15 - 0,20	+ 0,15 - 0,20	+ 0,10 - 0,15	+ 0,10 - 0,15
Допуск на ширину проводника Δa , мм, без покрытия	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	+ 0,03 - 0,05	$\pm 0,03$
То же, с покрытием	+ 0,25 - 0,20	+ 0,15 - 0,10	+ 0,10 - 0,08	$\pm 0,05$
Допуск на расположение отверстий δd , мм, при размере платы менее 180 мм	0,20	0,15	0,08	0,05
То же, при размере платы от 180 до 360 мм	0,25	0,20	0,10	0,08
То же, при размере платы более 360 мм	0,30	0,25	0,15	0,10
Допуск на расположение контактных площадок диаметр, мм, на ОПП и ДПП при размере платы менее 180 мм	0,35	0,25	0,20	0,15
То же, при размере платы от 180 до 360 мм	0,40	0,30	0,25	0,20
То же, при размере платы более 360 мм	0,45	0,35	0,30	0,25

Продолжение табл. 8

Параметр	Класс точности			
	1	2	3	4
Допуск на расположение контактных площадок δ_r , мм, на МПП при размере платы менее 180 мм	0,40	0,35	0,30	0,25
То же, при размере платы от 180 до 360 мм	0,50	0,45	0,40	0,35
То же, при размере платы более 360 мм	0,55	0,50	0,45	0,40
Допуск на расположение проводников на ОПП и ДПП δ_r , мм	0,15	0,10	0,05	0,03
То же, на МПП	0,20	0,12	0,07	0,05
Допуск на подтравливание диэлектрика МПП $\Delta_{атр}$, мм	0,03	0,03	0,03	0,03

Таблица 9. Значения плотности ρ , удельной теплоемкости c_p , теплопроводности λ , кинематической вязкости ν и числа Прандтля (Pr) сухого воздуха при давлении 10^5 Па и различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	c_p Дж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(мК)	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
- 50	1,584	1010	2,04	9,23	0,728
-20	1,395	1010	2,28	12,79	0,716
0	1,293	1000	2,44	13,28	0,707
10	1,247	1000	2,51	14,16	0,705
20	1,205	1000	2,60	15,06	0,703
30	1,165	1000	2,68	16,00	0,701
40	1,128	1000	2,76	16,96	0,699
50	1,093	1000	2,83	17,95	0,698
60	1,060	1000	2,90	18,97	0,696
70	1,029	1000	2,97	20,02	0,694
80	1,000	1000	3,05	21,09	0,692
90	0,972	1000	3,13	22,10	0,690
100	0,946	1009	3,21	23,13	0,688
120	0,898	1000	3,34	25,45	0,686

Т а б л и ц а 1 0 . Коэффициенты черноты различных поверхностей

Материалы и состояние поверхности	Температура, °С	Коэффициент черноты, ϵ
Алюминий (тщательно полированная пластина)	200-600	0,04-0,06
Алюминий (сильно окислен)	35-500	0,20-0,31
Силуминовое литье (в песчаной форме)	100-500	0,33-0,31
Силуминовое литье (в кокильной форме)	100-500	0,16-0,23
Дюралюминий Д-16	50-350	0,37-0,41
Сталь полированная	100	0,066
Сталь листовая холоднокатаная	93	0,075-0,085
Сталь листовая сильно окисленная	25	0,80-0,82
Сталь различных сортов после окисления	300-800	0,86-0,92
Латунь прокатанная	22	0,06
Латунь прокатанная и обработанная грубым наждаком	22	0,20
Латунь тусклая	50-350	0,22
Латунь хромированная полированная	100	0,075
Латунь торговая шлифованная	20	0,030
Медь, шабренная до блеска	22	0,072
Медь (пластина после нагрева до 600° С)	200	0,57
Никель, проволока окисленная	70-200	0,44
Олово, луженое кровельное железо	100	0,07-0,08
Цинк, оцинкованное железо	25	0,23-0,27
Асбестовый картон, бумага, ткань	20-300	0,93
Бумага тонкая, наклеенная на лакированную пластинку	20	0,92
Краски эмалевые, лаки различных цветов	20-100	0,92
Краски матовые различных цветов	100	0,92-0,96
Лак черный матовый	40-100	0,96-0,98
Муар серый, черный	20	0,86-0,90
Краска защитно-зеленая	20	0,90
Краска бронзовая	100	0,51
Краска алюминиевая	100	0,28
Краски алюминиевые разной давности с переменным содержанием алюминия	100	0,28-0,67
Алюминиевая фольга без масла	100	0,09
Алюминиевая фольга, покрытая слоем масла	100	0,56
Окиси металлов	20	0,04-0,8
Никелированные поверхности		0,05- 0,07

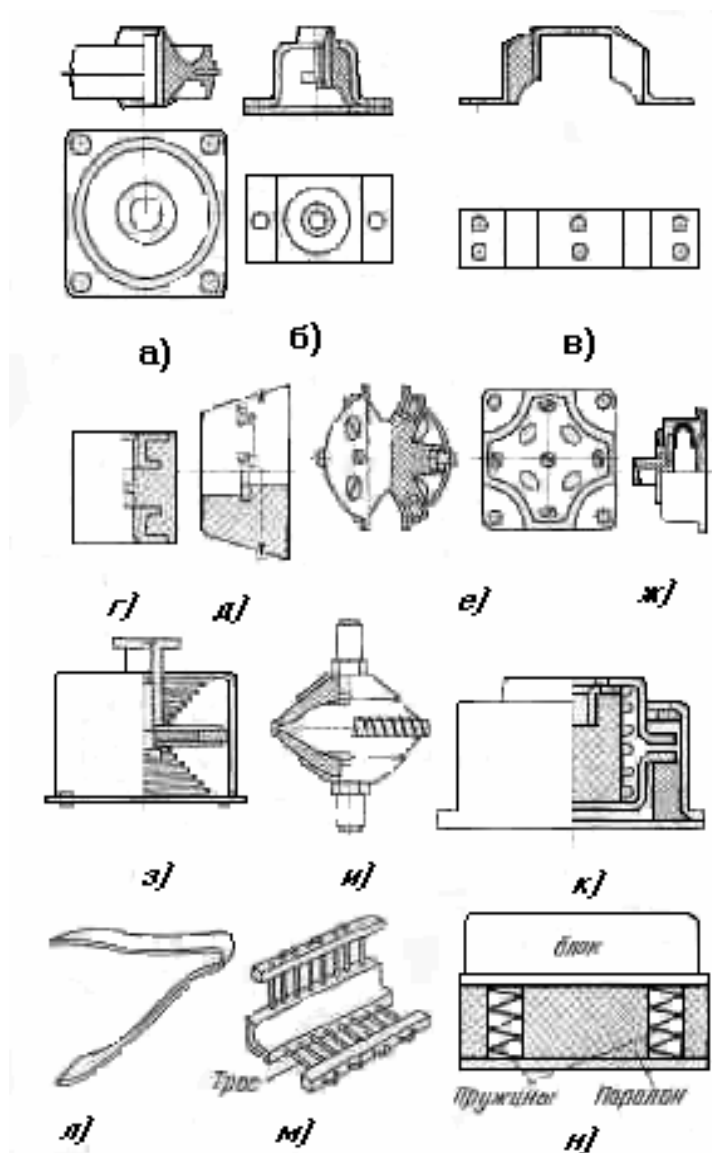


Рисунок 2. Схематическое изображение наиболее распространенных амортизаторов

а - АП, АЧ; *б* - АКСС; *в* - АМ; *г* - АН; *д* - АО; *е* - АР; *ж* - АД; *з* - АФД, АПН;
и - ДК; *к* - АЦМ, АЦП; *л* - лепестковый; *м* - тросовый;
н - пружинно-поролоновый

Таблица 11. Параметры приборных амортизаторов

Тип	Резонансная частота при номинальной нагрузке, Гц	Амплитуда вибраций не более, мм	Диапазон нагрузок на один амортизатор, Н	Вибропрочность	Диапазон рабочих температур, °С	Относительный коэф-т демпфирования
АП, АЧ	15 20, 30 35	0,5	4,5 157	малая	- 45 +80	0,05
АКСС	10 15	-	100 1200	-	- 5 +70	
АМ	20 30, 35 45	-	180 1200	малая		—
АН	10 13, 6 8	0 5	60 500	—	—	—
АО	23 30	0,5	100 600	—		
АР	11 12	1	20.. 80	достаточная	—	—
АД	8 10	0,5 1,5	3... 150		-60 +70	0,03 0,25
АФД	15 20, 25 30	—	2 ... 150		-60 +170	
АПН	10 20	-	5 150		-60 +150	—
ДК	11 12	1	4 400		- 50 +170	0,4 0 5
АПН	8 12	1	0,5 5		- 50 +150	
АЦП	8 10	1	5 300		- 50 +150	
Лепестковый	10 ..12	—			- 60 +170	-1
Тросовый	10... 12	большая	20 680		- 70 +260	высокий

Таблица 12. Значения интенсивностей отказов комплектующих элементов, в лабораторных условиях

Наименование группы элементов	Интенсивность отказов λ на 10^6 ч.		
	Максимальная	Средняя	Минимальная
Магнетроны	1000	100	8
Клистроны	80	40	15
Лампы бегущей волны	20	46	10
Генераторные лампы: стеклянные	10	5	3
металлокерамические	-	60	-
Модуляторные лампы	25	10	0,2
Резонансные разрядники	50	16	4
Тиратроны импульсные	15	6,0	2,5
Приемно-усилительные лампы	2,6	1,7	1,1
Стабилизаторы напряжения	2,5	0,8	0,4
Электронно-лучевые трубки	22	10	6
Кенотроны высоковольтные	14	11	8
Транзисторы	0,85	0,75	0,2
Диоды смесительные	1,2	0,6	0,03
Селеновые выпрямители	1,5	0,7	0,01
Резисторы:			
постоянные непроволочные	0,6	0,1	0,01
постоянные проволочные	0,8	0,4	0,2
переменные непроволочные	1,5	0,5	0,1
переменные проволочные	0,6	0,2	0,05
Конденсаторы:			
бумажные	0,29	0,05	0,003
металло-бумажные	0,2	0,04	0,001
слюдяные	0,06	0,02	0,003
керамические	0,08	0,04	0,02
электролитические	1,3	0,45	0,07
Трансформаторы	2	0,15	0,01
Дроссели	0,15	0,10	0,03

Катушки индуктивности	—	0,02	—
Переключатели	2,2	0,1	0,02
Тумблеры	0,6	0,15	0,01
Кнопки	0,6	0,16	0,08
Микровыключатели	0,4	0,25	0,05
Разъемы	—	0,02	—
Электродвигатели	19	4,0	0,16
Сельсины	0,6	0,4	0,1
Вращающиеся трансформаторы	—	0,55	
Реле: электромагнитные тепловые времени	0,7 10 1,5	0,5 4,0 0,75	0,2 1,2 0,3
Контакты	—	0,23	—
Линии задержки	—	0,15	—
Кварцы	—	0,75	—
Панели ламповые	—	0,02	—

Таблица 13. Эксплуатационные коэффициенты для наземной, корабельной и самолетной аппаратуры

Наименование группы элементов	Эксплуатационные коэффициенты, k,		
	Наземная	Корабельная	Самолетная
Магнетроны	2	6	16
Клистроны	3	7	21
Лампы бегущей волны	3	12	21
Генераторные лампы: стеклянные	10	10	30
металлокерамические	3	4,5	8
Модуляторные лампы	3	3	9
Резонансные разрядники	2	6,5	18
Тиратроны импульсные	5	10	60
Приемо-усилительные лампы	3	6	18
Стабилизаторы напряжения	5	10	20
Электронно-лучевые трубки	2	5	10
Кенотроны высоковольтные	3	5	15
Транзисторы	1	3	6
Диоды смесительные	1,5	4,5	9
Кристаллические детекторы			
Селеновые выпрямители	1,5	5	9
Резисторы постоянные: непроволочные	1,5	4	7,5
проволочные	1	3	8
Резисторы переменные: непроволочные	1,5	1,5	10
проволочные	1	3	30
Конденсаторы: бумажные	1,5	4	17
металло-бумажные	1,5	4,5	13
слюдяные	1	2	8
керамические	1,5	3	10
электролитические	3	9	15
Трансформаторы	4	8	12
Дроссели	1	2	5
Катушки индуктивности	4	10	24

Переключатели	4,5	9	18
Тумблеры	4	8	18
Кнопки	4	6	20
Микровыключатели	4	8	36
Разъемы	4	4	12
Электродвигатели	1,5	5	6
Сельсины	3	9	13,5
Вращающиеся	5	15	22
Реле:			
электромагнитные	4	6	30
тепловые	3	6	14
времени	4	12	18
Контакты	4,5	4,5	10
Линии задержки	4	7	10
Кварцы	4	6	9
Панели ламповые	2,5	5	8

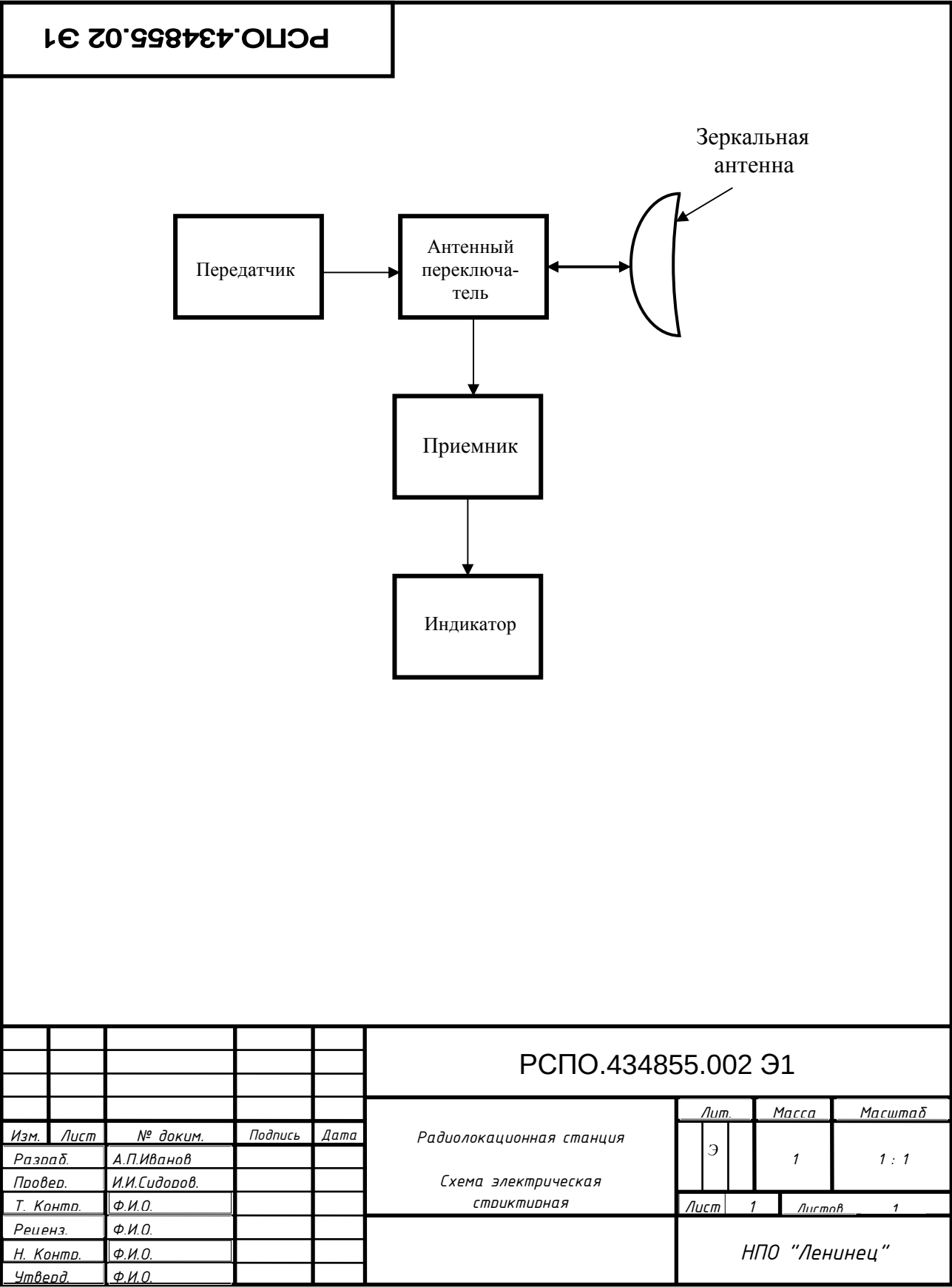
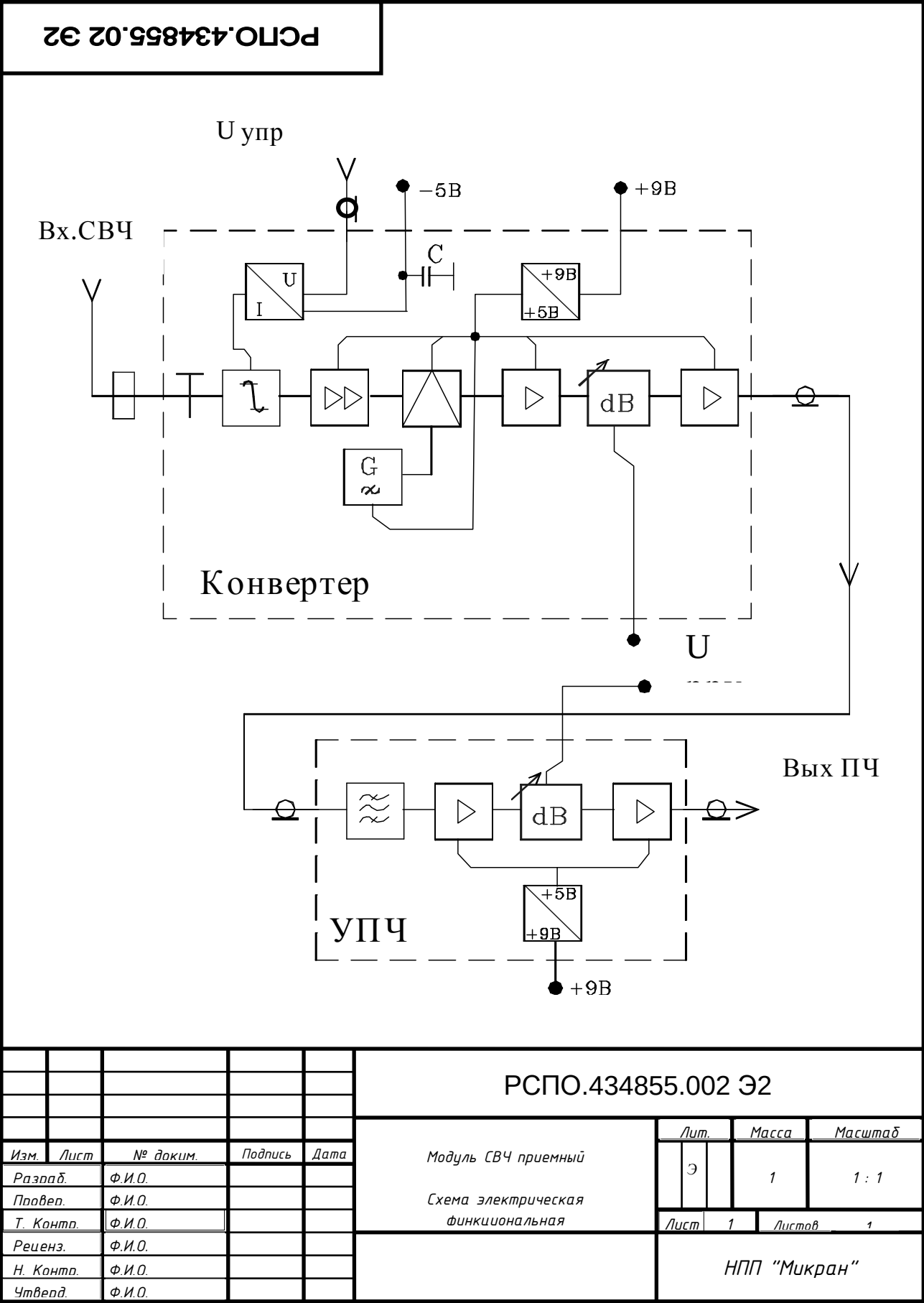


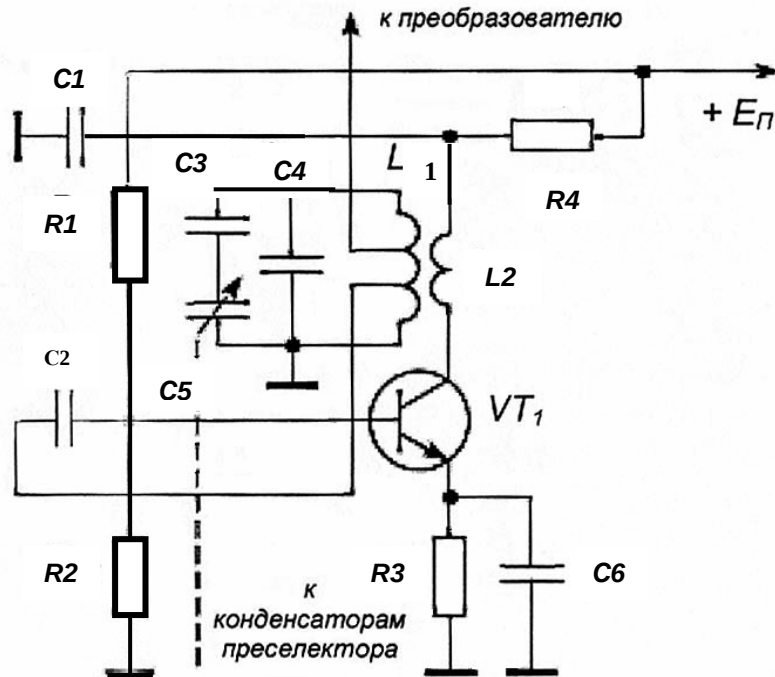
Рисунок 3. Схема электрическая структурная



[illegible]

Рисунок 5. Спецификация к электрической функциональной схеме

РСПО.434855.002 ЭЗ



					РСПО.434855.002 ЭЗ			
					Гетеродин	Лит.	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ док-им.	Подпись	Дата				
Разраб.		Ф.И.О.			Схема электрическая принципиальная		1	1 : 1
Провер.		Ф.И.О.				Лист	1	Листов 1
Т. Контр.		Ф.И.О.				ТУСУР		
Реценз.		Ф.И.О.						
Н. Контр.		Ф.И.О.						
Утверд.		Ф.И.О.						

Рисунок 6. Схема электрическая принципиальная

[illegible]

Рисунок 7. Спецификация к схеме электрической принципиальной