

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиоэлектронных средств

***КОНСТРУИРОВАНИЕ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ***

Учебно-методическое пособие по курсовому проектированию
для студентов специальностей

I-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС»,
I-39 02 02 «Проектирование и производство РЭС»,
I-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности»
дневной и заочной форм обучения

Минск 2007

УДК 681.321(075.8)
ББК 32.844-02 я 73
К 64

Р е ц е н з е н т
доцент кафедры ЭВС БГУИР,
канд. техн. наук В. П. Луговский

Авторы:
Н. С. Образцов, Н. И. Каленкович, А. М. Ткачук,
Н. А. Смирнова, А. П. Шокурова

К 64 **Конструирование** радиоэлектронных устройств : учебно-метод. пособие по курсовому проектированию для студ. спец. I-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС», I-39 02 02 «Проектирование и производство РЭС», I-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности» дневн. и заоч. форм обуч / Н. С. Образцов [и др.]. – Минск : БГУИР, 2007. – 71 с.

ISBN 978-985-488-116-4

Рассмотрены порядок и основные правила конструирования радиоэлектронных средств (РЭС). Изложены методы проектирования печатных плат. Приведены мероприятия по защите конструкций РЭС от основных дестабилизирующих факторов.

Пособие может быть полезно студентам других специальностей, изучающим конструирование РЭС.

УДК 681.321(075.8)
ББК 32.844-02 я 73

ISBN 978-985-488-116-4

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2007

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цель и задачи курсового проектирования	4
2 Общие требования к содержанию и составу проекта	4
2.1 Содержание пояснительной записки	7
2.2 Состав графической части	8
3 Разработка технического задания	8
4 Выбор и обоснование материалов конструкций и покрытий деталей	11
5 Компоновка РЭС	16
5.1 Аппликационная компоновка	20
5.2 Модельная компоновка	20
5.3 Графическая компоновка	21
5.4 Натуральная компоновка	21
6 Тепловые режимы РЭС	22
6.1 Тепловые модели РЭС	22
6.2 Тепловой режим блока РЭС в герметичном корпусе с крупными детальями на шасси	24
6.3 Тепловой режим РЭС в перфорированном корпусе при естественной вентиляции РЭА	27
6.4 Общая принудительная вентиляция	29
6.5 Инженерные методики расчета теплового режима блоков РЭС	30
6.5.1 Методика расчета теплового режима блоков РЭС в герметичном корпусе	30
6.5.2 Методика расчета теплового режима блоков РЭС в перфорированном корпусе	32
6.5.3 Методика расчета теплового режима с принудительной вентиляцией	34
6.5.4 Выбор способа охлаждения на ранней стадии конструирования	35
6.5.5 Радиаторы охлаждения полупроводниковых приборов	38
7 Защита от механических воздействий	43
8 Оценка эффективности экранирования	49
9 Расчет параметров печатных проводников	52
9.1 Постоянный ток в печатных проводниках	52
9.2 Переменный ток в печатных проводниках	53
9.3 Ёмкость и индуктивность между печатными проводниками	56
9.4 Конструкторско-технологический расчет печатных плат	60
10 Общие указания по оформлению курсовых проектов	62
10.1 Структура и объем пояснительной записки	62
10.2 Требования к оформлению пояснительной записки	63
ЛИТЕРАТУРА	70

1 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Целью курсового проектирования является завершение изучения курса «Конструирование РЭУ».

В процессе выполнения курсового проекта одновременно решаются следующие задачи:

- систематизация, закрепление и углубление теоретических и практических знаний по курсу и применение их для решения конкретных инженерных задач;
- приобретение умений и навыков самостоятельного планирования и выполнения проектно-конструкторских работ по специальности;
- приобретение навыков обобщения и анализа результатов ОКР и НИР, выполненных другими разработчиками и исследователями;
- совершенствование умений разработки и оформления технической документации, отражающей принятые технические решения;
- подтверждение подготовленности студента к самостоятельной работе в условиях современного производства, проектных и научно-исследовательских организаций.

2 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И СОСТАВУ ПРОЕКТА

В курсовых проектах по дисциплине «Конструирование РЭУ» (КРЭУ) решаются задачи по разработке или модернизации радиоэлектронных и электронно-вычислительных устройств или функциональных частей (блоков, субблоков и т.п.), входящих в их состав. Разработка или модернизация конструкций выполняется на уровне эскизного или технического проекта с дальнейшим отображением принятых решений в конструкторской документации (чертежах).

Примерами тем курсовых проектов при разработке изделий могут быть:

- блоки осциллографов, вольтметров и других измерительных приборов;
- блоки аппаратуры медицинского назначения;
- источники вторичного электропитания РЭА и ЭВА;
- электронно-вычислительная аппаратура для производства, контроля, испытаний, настройки блоков и устройств РЭС и ЭВС;
- устройства управления специальным технологическим оборудованием с применением мини- и микроЭВМ, микропроцессоров;
- вычислительные устройства робототехнических систем, гибких автоматизированных производств и средства их сопряжения с исполнительными механизмами;
- интерфейсы «общая шина», узлы и блоки технических средств САПР (координатографы, графопостроители, дисплеи, печатающие устройства и т.д.);
- узлы и блоки терминальных станций;
- устройства группового управления пультами;
- лазерные устройства отображения графической информации;
- устройства регистрации и считывания графической и алфавитно-цифровой информации в САПР;

- устройства взаимодействия разработчиков в процессе проектирования;
- устройства распознавания графической и символьной информации;
- устройства считывания трехмерной информации для ЭВМ;
- устройства сопряжения САПР конструкторского и технологического назначения с гибкими автоматизированными производствами и др.

В проектах при разработке изделий задание на проектирование должно касаться той части устройства, которая является объектом проектирования в соответствии с формулировкой темы курсового проекта либо которая выделена для детальной конструкторской проработки в случае, если тема сформулирована достаточно широко. Задание на проектирование должно включать:

- название темы проекта;
- назначение и объект установки разрабатываемого изделия, его связь с другими частями устройства, внешней средой и человеком-оператором;
- электрическую схему, электрические показатели с указанием наиболее характерных данных для проектируемого изделия;
- вид источника электрического питания (сеть, генератор, аккумулятор и т.п.), его напряжение и стабильность;
- эксплуатационные характеристики: режим и характер работы изделия (непрерывный, циклический и т.д.), требования к устойчивости проектируемого изделия к различным видам воздействий (диапазон рабочих температур, относительная влажность, частотный диапазон и уровень вибраций и т.д.);
- основные конструктивные характеристики (форма, габариты, масса);
- требования к основным качественным показателям проектируемого изделия (точность и стабильность выходных параметров, надежность, стоимость и др.);
- планируемый годовой объем выпуска проектируемого изделия или указание о типе производства (массовое, крупносерийное и т.д.);
- специальные требования, специфичные для проектируемого изделия и не оговоренные выше.

В проектах по курсу КРЭУ особое внимание при проектировании должно быть уделено следующим вопросам:

- анализу исходных данных на проектирование и разработке технического задания на конструирование изделия;
- патентному поиску и обзору по теме проекта;
- выбору и обоснованию схемотехнических решений изделия;
- выбору, обоснованию и оптимизации конструктивных элементов и материалов конструкции проектируемого изделия;
- выбору, обоснованию и оптимизации конструкторского исполнения изделия в целом, способа защиты его от воздействия дестабилизирующих факторов (температуры, вибрации и т.п.) в частности;
- обеспечению эксплуатационных и энергосберегающих требований, требований безопасности, технической эстетики и эргономики;
- детальной проработке основных конструктивных элементов изделия (печатные платы, несущие конструкции, элементы защиты от воздействующих факторов и т.п.) и разработке необходимой конструкторской документации;

- конструкторским расчетам по оценке совместимости изделия с объектом установки, внешней средой и человеком, а также расчетам, подтверждающим пригодность изделия к производству и эксплуатации с учетом экономических показателей;

- технологической проработке изделия или его частей (деталей, сборочных единиц) на основе применения типовых технологических процессов.

Конструкторская проработка проектируемого изделия должна быть достаточно полной и всесторонней. Конструкторское исполнение изделия (форма, компоновочная схема, габариты), используемые пассивные элементы, материалы, способы защиты от воздействующих факторов, эстетическое исполнение и т.д. должны быть выбраны на основе детального рассмотрения хотя нескольких альтернативных вариантов. В качестве конечного варианта должен быть выбран не только тот, который отвечает требованиям задания на проектирование, а лучший (рациональный) с точки зрения важнейших технико-экономических показателей проектируемого устройства, безопасных приемов сборки и монтажа, энергосберегающих и экологических аспектов.

Конструкторские расчеты и оптимизация должны сопровождать выбор и обоснование конструкторских решений на всех этапах конструкторского проектирования изделия, начиная с анализа исходных данных на проектирование и кончая оценкой качественных показателей.

В общем случае основными могут быть следующие конструкторские расчеты:

- электрические расчеты отдельных частей схемы с целью определения мощности тепловых потерь, коэффициентов нагрузки и других параметров, необходимых для дальнейших расчетов;

- компоновочных характеристик изделия и его составных частей (печатных плат);

- теплового режима;

- параметров радиаторов охлаждения мощных полупроводниковых приборов;

- вибропрочности и виброизоляции изделия;

- точности и стабильности выходных параметров функционально законченных частей изделия с учетом технологического разброса и эксплуатационного ухода первичных параметров;

- показателей надежности с учетом электрического режима работы элементов и условий их эксплуатации в составе проектируемого изделия;

- точности и прочности отдельных деталей и механических узлов;

- технологических показателей изделия.

Из-за ограниченности времени на проектирование уделить внимание всем указанным конструкторским расчетам даже в случае несложной функциональной части не всегда представляется возможным. В этих случаях необходимо остановиться по согласованию с преподавателем проекта на четырех-пяти расчетах, важнейших для проектируемого изделия. Конкретное содержание и объем расчетного материала зависят от темы проекта или функциональной части

устройства, выбранных для детального рассмотрения, а также от исходных данных для проектирования. Пример оформления задания по содержанию пояснительной записки и составу графической части курсового проекта приведен ниже.

Пример задания на курсовое проектирование.

Тема курсового проекта: «Блок управления устройством контроля качества многослойных печатных плат».

Исходные данные:

1 Электрические схемы: структурная устройства, функциональная и принципиальная блока; частота следования тактовых импульсов 10 кГц.

2 Питание: вторичный источник питания напряжением $\pm 15 \text{ В} \pm 5\%$.

3 Габаритные размеры: 200 x 120 x 160 мм (длина, ширина, высота); присоединительные размеры устройства: в соответствии с его чертежом.

4 Масса блока: не более 1,5 кг.

5 Условия эксплуатации по ГОСТ 15150–69 для исполнения УХЛ 4.1.

6 Годовой объем выпуска: 500 шт.

7 Требования к показателям надежности: среднее время безотказной работы блока не менее 15 000 ч.

8 Другие требования уточняются в процессе проектирования.

2.1 Содержание пояснительной записки

Введение.

1 Анализ требований задания на проектирование и разработка технического задания на конструирование блока.

2 Патентный поиск и обзор по устройствам контроля качества многослойных печатных плат.

3 Анализ электрической схемы и обоснование конструктивного исполнения блока.

3.1 Анализ электрической схемы.

3.2 Расчет отдельных узлов электрической схемы.

3.3 Учет влияния на работу блока объекта установки (устройства), человека-оператора и внешней среды.

3.4 Обоснование конструкторского исполнения блока, выбор вида электрического монтажа.

4 Выбор и обоснование комплектующих элементов и материалов конструкции блока.

4.1 Обоснование выбора конструктивных элементов.

4.2 Обоснование выбора материалов и покрытий деталей.

5 Разработка компоновки блока.

5.1 Обоснование варианта внутриблочной компоновки.

5.2 Обоснование размещения элементов передней панели органов управления и индикации.

6 Защита блока от воздействия дестабилизирующих факторов.

6.1 Обоснование способа защиты от тепловых воздействий.

6.2 Обоснование способа обеспечения точности и стабильности частоты генератора тактовых импульсов.

6.3 Обоснование способов защиты от других факторов (влажность, загрязнение, радиация и т.д.).

7 Конструкторские расчеты.

7.1 Расчет элементов электрической схемы.

7.2 Расчет основных компоновочных характеристик блока (коэффициента заполнения по объему).

7.3 Оценка теплового режима блока в составе устройства (с использованием ЭВМ).

7.4 Оценка точности и стабильности частоты генератора тактовых импульсов.

8 Реализованные в проекте мероприятия по энергосбережению.

Заключение (выводы).

Список литературы.

Приложение А – Распечатки программ и результатов расчетов, полученных с помощью ЭВМ.

Приложение В – Спецификация сборочных единиц, перечень элементов электрической принципиальной схемы.

2.2 Состав графической части

1 Электрическая принципиальная схема блока.

2 Сборочный чертеж блока.

3 Сборочный чертеж субблока (платы) задания режимов.

4 Сборочный чертеж передней панели блока.

5 Чертеж печатной платы.

3 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Техническое задание разрабатывают на основе исходных требований заказчика, результатов выполнения научно-исследовательских работ, научного прогнозирования, экономических исследований, анализа передовых достижений и технического уровня отечественной и зарубежной техники, а также изучения патентной документации и маркетинговых исследований.

Иногда техническое задание составляют на группу изделий. В общем техническом задании указывают требования, которые являются общими для всей группы изделий. В ТЗ на конкретное изделие не указывают требования, которые являются общими для всей группы изделий, а дают ссылку на общее техническое задание.

Техническое задание должно состоять из введения и следующих разделов:

- основание для разработки;
- источники разработки;
- технические требования;
- экономические показатели;
- порядок испытаний.

В особых случаях допускается уточнять отдельные разделы (опускать или вводить новые).

Рекомендуется, чтобы во «Введении» был указан шифр разрабатываемого изделия. Кроме того, должно быть оговорено, для чего данное изделие предназначено. Можно привести краткую характеристику области применения данного изделия,

В разделе «Основание для разработки» приводят наименование и шифр разрабатываемого изделия.

В разделе «Источники разработки» указывают:

- перечень законченных научно-исследовательских и других работ, обосновывающих возможность или необходимость проведения разработки;
- наименование изделия, на базе которого выполняют разработку и наименование изделия, взамен которого проводят разработку.

Раздел «Технические требования» должен состоять из следующих подразделов:

- состав изделия;
- технические параметры (показатели);
- требования к надежности;
- принцип работы;
- программное обеспечение;
- конструктивные требования;
- условия эксплуатации;
- требования безопасности;
- дополнительные технические требования;
- требования к упаковке, маркировке, транспортированию и хранению;
- требования к патентной чистоте.

В каждой конкретной ситуации допускается уточнять содержание подразделов или объединять отдельные подразделы. Требования рекомендуется располагать в зависимости от степени их важности и характера.

Значения технических показателей изделия приводят с предельными отклонениями или указывают максимальные и минимальные значения.

Требование, подлежащее уточнению в процессе разработки, излагают в редакции: например, числовое значение – уточняется в процессе проектирования. При этом изменение в ТЗ не вносится.

В подразделе «Состав изделия» должны быть указаны:

- наименование и назначение составных частей основного исполнения изделия и возможность его изменения;
- требования к стандартным, унифицированным к заимствованным составным частям (включая покупные), сырью и материалам, в том числе к материалам, используемым при обслуживании и эксплуатации изделия;
- требования к использованию комплектующих элементов;
- требования к запасным частям, инструменту и принадлежностям.

В подразделе «Технические параметры» должны быть приведены основные технические показатели изделия, определяющие целевое назначение изде-

лия (например производительность), время выполнения операции, тактовая частота, объем оперативной памяти, точность, чувствительность, требования к электропитанию электрической прочности и сопротивлению изоляции, потребляемая мощность, коды, используемые для обмена и обработки информации, и другие необходимые требования.

В подразделе «Требования к надежности» должны быть указаны значения показателей надежности.

В подразделе «Принцип работы» должно быть приведено описание работы изделия (например система команд, алгоритм работы и взаимодействие с другими сопрягаемыми изделиями).

В подразделе «Программное обеспечение» должны быть указаны состав и общие требования к программному обеспечению, включая тестовые и диагностические программы. Техническое задание на программное обеспечение является самостоятельным документом, который разрабатывают и оформляют по ГОСТ 19.201–78.

В подразделе «Конструктивные требования» должны быть приведены требования к исполнению корпуса, панели и шасси (степень защищенности, использование типовых унифицированных или нормализованных элементов корпусов, панелей и шасси), необходимость и тип вентиляции, экранировки, теплоотвода, корпусной изоляции, весовые характеристики, габариты, координаты крепления, присоединительные элементы (колодки, разъемы гермовыводы, элементы управления и регулировки прибора и их желательное расположение, требования по взаимозаменяемости, требования инженерной психологии, безопасности, удобства обслуживания, заданные коэффициенты унификации, применяемости;

- «специальные требования», где указываются дополнительные требования, связанные с особыми условиями работы (например радиационная стойкость, пожаро- и взрывобезопасность и т.д.);

- конструктивные требования к изделию в целом и его составным частям (например базовые конструкции, габаритные, установочные и присоединительные размеры, способы крепления и регулирования органов управления, масса изделия);

- требования к уровню радиопомех, создаваемых изделием;

- требования технической эстетики (художественного конструирования);

- эргономические требования.

В подразделе «Условия эксплуатации» должны быть указаны допускаемые воздействия климатических условий (например температуры, влажности, атмосферного давления, пыли, агрессивных сред), механических нагрузок (например вибрационных, ударных), электромагнитных волн, а также виды обслуживания (например постоянное или периодическое).

В подразделе «Требования безопасности» должны быть изложены требования к обеспечению безопасности при монтаже, эксплуатации, обслуживании и ремонте.

В подразделе «Дополнительные технические требования» должны быть изложены требования к изделию, не указанные в других подразделах технического задания.

В подразделе «Требования к упаковке, маркировке, транспортированию и хранению» должны быть изложены требования к упаковке изделия, маркировке, наносимой на изделие и тару, в которую упаковано изделие, а также указаны виды транспортных средств, условия транспортирования и хранения.

В подразделе «Требования к патентной чистоте» должен быть приведен перечень стран, в отношении которых должна быть обеспечена патентная чистота изделия.

В разделе «Экономические показатели» должны быть приведены экономические преимущества разрабатываемого изделия по сравнению с изделиями, указанными в разделе «Источники разработки» технического задания и (или) лучшими образцами и аналогами.

В разделе «Порядок испытаний» должен быть указан срок и общие требования к проведению испытаний изделия.

В разделе «Исходные и справочные материалы» должны быть указаны все известные заказчику технические материалы, необходимые для выполнения ТЗ, общие ТУ на аналогичные изделия, ТУ на применяемые в изделии блоки, узлы, тактико-технические требования, номера принципиальных электрических схем, инструкции, описания и т.д.

В разделе «Перечень материалов», представляемых исполнителем, должны быть указаны все материалы, представляемые в результате выполнения ТЗ, – рабочие чертежи, схемы и другая документация, сведения о повторяемости узлов и блоков, расчет коэффициента унификации, технические отчеты, протоколы испытаний, макеты, патентный формуляр.

В разделе «Приложение к ТЗ» должны быть перечислены все материалы, непосредственно передаваемые вместе с ТЗ, например схемы, чертежи, образцы, технические данные и габариты элементов.

4 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИЙ И ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ

Несущая конструкция должна обеспечивать требуемую жесткость и прочность при малой массе, поэтому в процессе ее производства чаще всего применяют прокат в виде листов, лент толщиной до 2 мм, гнутых профилей из сталей, алюминиевых, магниевых и титановых сплавов. Рассмотрим марки некоторых типовых «представителей» номенклатуры материалов, используемых в производстве узлов и деталей НК (таблица 4.1).

Сталь 10 кп – низкоуглеродистая, конструкционная, высокой пластичности; хорошо сваривается и деформируется в холодном состоянии. Применяется для изготовления статически умеренно нагруженных деталей и узлов, когда при их производстве (кожухов, колпачков, скоб, косынок, планок и т.п.) необходимы значительные пластичные деформации: гиб, высадка, холодная штамповка, отбортовка и др.

Наиболее высокопластичный из алюминиевых сплавов – алюминиево-марганцевый (АМц), обладающий повышенной коррозионной стойкостью. Как и другие алюминиевые сплавы, он в три раза легче стали; для обеспечения мягкости и вязкости при штамповке и гибке применяется в отожженном состоянии; рекомендуется для изготовления деталей, когда необходима высокая пластичность и свариваемость (каркасы, рамы, гнутые профили, кожухи, планки и т.п.).

Таблица 4.1 – Основные материалы деталей НК

Наименование материала	ГОСТ, ТУ
1	2
Сталь 10 кп	ГОСТ 1050–74
Алюминиевый сплав АЛ2 Алюминиевый сплав АЛ9	ГОСТ 2685–75
Алюминиевый сплав АМц Алюминиевый сплав АМг Алюминиевый сплав АД31 Алюминиевый сплав Д16 Алюминиевый сплав В95 Алюминиевый сплав 1915	ГОСТ 4784–74
Алюминиевый сплав 1935	ТУ-ОП-1-144–72
Латунь ЛС59-1 Латунь Л63	ГОСТ 15527–70
Бронза БрБ2 Медь МЗ	ГОСТ 493–54 ГОСТ 859–66
Магниевый сплав МА2-1 Магниевый сплав МА5 Магниевый сплав МА8	ГОСТ 14957–69
Титановый сплав ВТ1-0 Титановый сплав ОТ4 Материал прессовочный АГ-4 Пресс-материал ДСВ-2-Р-2М Смола полиамидная 68 Пенополиуретан ППУ-3 Смола анидная стеклонаполненная АС-30а Смола поликарбонатная «Дифлон» Композиция на основе полиамидов 6.610 и 66/6	ОСТ1 90013–71 ГОСТ 19807–74 ГОСТ 20437–75 МРТУ6-11-74–67 ГОСТ 10589–73 ТУ-В-151–69 ТУ6-11-209–71 ТУ 6-05-1668–74 ОСТ6-05-408–75

Более прочный и более жесткий, чем АМц, сплав Д16 используется в виде лакированных листов (при изготовлении они покрываются с двух сторон тонкими листами мягкого коррозионно-стойкого алюминия). Из Д16 производят детали НК, не соприкасающиеся с морской водой, воспринимающие средние нагрузки и работающие при нормальных температурах (каркасы, крышки, колпачки, шкалы и др.).

Алюминиево-магниевый сплав АМг обладает довольно высокой прочностью, пластичностью и коррозионной стойкостью, имеет наиболее высокий пре-

дел выносливости по сравнению с другими алюминиевыми сплавами. Для повышения коррозионной стойкости в атмосферных условиях его подвергают анодированию с последующей покраской. Используют для производства средненагруженных деталей и сварных НК (каркасы, корпуса, кронштейны, кожухи, лапы и т.п.).

Высокопрочный деформируемый алюминиевый сплав В95 весьма чувствителен к острым надрезам и циклическим нагрузкам, поэтому для уменьшения напряжения требуется тщательная обработка, большая плавность всех переходов при изменении сечения детали. Из В95 изготавливают элементы сильно нагруженных НК, без длительных перегревов до 373 К, не воспринимающие динамические нагрузки: корпуса, каркасы и др.

Алюминиево-кремниевый сплав АЛ2 (силумин эвтетический) имеет высокие литейные свойства; готовые отливки подвергают анодированию с последующим нанесением лакокрасочных покрытий; рекомендуется для средненагруженных деталей НК, обладающих легким весом, достаточной прочностью и устойчивостью к атмосферной коррозии (фасонное литье, корпуса, крышки, кронштейны, втулки и т.д.).

Силумин специальный АЛ9 имеет хорошие литейные, а в термически обработанном состоянии и механические свойства. Сплав не допускает длительного контакта с морской водой. Для повышения коррозионной стойкости готовые изделия должны подвергаться анодированию с последующим нанесением лакокрасочного покрытия. Из АЛ9 производят детали НК средней нагруженности и сложной конфигурации, от которых требуется достаточная механическая прочность, высокая герметичность и малый вес, а также узлы, подвергаемые сварке (корпуса, кронштейны и т.п.).

Сплаву меди с бериллием БрБ2 присущи высокие механические и упругие свойства, сопротивление усталости, антифрикционные качества, повышенная электро- и теплопроводность. Из-за дефицита его следует применять только в технически обоснованных случаях. БрБ2 используют для изготовления ответственных деталей НК, работающих в условиях трения и повышенных давлений, плоских спиральных и цилиндрических пружин, пружинящих контактов, мембран и др.

Магниевые сплавы в 1,5 раза легче алюминиевых. Если особое внимание уделяется массе конструкции, то предпочтение отдается первым. Однако по многим другим параметрам, в том числе по коррозионной стойкости и стоимости, они уступают вторым. Тем не менее марки МА2-1 и МА5 находят довольно широкое применение.

Титан обладает высокой прочностью и твердостью, сравнимой с твердостью стали, он коррозионно стоек (это свойство выше, чем у нержавеющей стали), почти в два раза легче стали. Однако в морской воде при контакте с медными сплавами и нержавеющей сталью подвергается электрохимической коррозии. Его теплопроводность в четыре раза ниже, чем у стали, электропроводность в 30 раз слабее, чем у меди. Для штамповки применяются листы марки ВТ1-0, причем изготовление деталей НК штамповкой затрудняется из-за быстрого

го износа оборудования. Стоимость титана и его сплавов значительно выше стоимости стали. ВТ1-0 применяют для изготовления деталей НК, к которым предъявляются требования высокой прочности и коррозионной стойкости, а также для производства элементов, работающих в условиях высоких температур – до 573...623 К, деталей виброизоляторов, втулок и т.д.

Пресс-материал АГ-4 имеет высокие механические и диэлектрические свойства, мало зависящие от температуры и влажности; из него изготавливают детали РЭС, работающие при повышенной влажности и температуре, требующие высокой механической прочности и электроизоляции элементов, применяемых в условиях тропического климата.

Смола полиамидная 68 (пластмасса) характеризуется высокими механическими и диэлектрическими свойствами, устойчивостью к износу и хорошим сцеплением с металлами. Из нее получают детали электронных схем (ЭС), к которым предъявляются повышенные требования по механической прочности, износоустойчивости и изоляционным качествам (штепсельные разъемы, ламповые панели, корпуса переменных сопротивлений и др.).

Динамические нагрузки на элементы ЭС резко возрастают при значительных ускорениях носителя. Очевидно, чем меньше масса НК, тем меньшие силы будут действовать на нее. Таким образом, при конструировании НК необходимо прежде всего оценить возможность использования более легкого материала при условии сохранения необходимой прочности и жесткости.

Материал для деталей НК рекомендуется выбирать с учетом удельной прочности:

$$\sigma_{уд} = \frac{\sigma_{0,2}}{\rho} \quad (4.1)$$

и удельной жесткости:

$$E_{уд} = \frac{E}{\rho}, \quad (4.2)$$

где $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, т.е. напряжение, вызывающее в испытываемом образце остаточную деформацию, равную 0,2 %, Па;

ваемом образце остаточную деформацию, равную 0,2 %, Па;

ρ – плотность материала, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

E – модуль упругости первого рода (модуль Юнга), Па.

Произведение удельных прочности и жесткости – обобщенный коэффициент $K_{об}$:

$$K_{об} = \sigma_{уд} \cdot E_{уд} = \frac{\sigma_{0,2} \cdot E}{\rho^2}. \quad (4.3)$$

Таблица 4.2 – Характеристики прочности и жесткости некоторых материалов

Наименование	$\sigma_{0,2}$, МПа	$E \cdot 10^3$, МПа	$\rho \cdot 10^3$,	$\sigma_{уд}$	$E_{уд} \cdot 10^3$	$K_{об} \cdot 10^4$
--------------	----------------------	----------------------	---------------------	---------------	---------------------	---------------------

материала			кг·м ⁻³			
Ст. углеродистые	200...500	200	7,85	63,7	25,4	162
Ст. легированные	600...1200	200	7,85	152,8	25,4	388
Титановые сплавы	600...1200	115	4,5	266	25,5	678
Алюминиевые сплавы	250...450	70	2,8	160	25	400
Магниевые сплавы	150...250	40	1,8	138	22,2	306
Стеклопластик	270...400	30	1,8	222	16,6	368

В таблице 4.2 приведены значения $\sigma_{y\partial}$, $E_{y\partial}$ и $K_{об}$. Выбирая материал для изготовления деталей, обеспечивающих прочность НК, используют $\sigma_{y\partial}$, а для деталей, создающих жесткость конструкции, – $E_{y\partial}$. Для ряда материалов значения $E_{y\partial}$ отличаются незначительно, поэтому при выборе материала следует в подобных случаях пользоваться обобщенным коэффициентом $K_{об}$. Он характеризует свойство материала воспринимать наиболее высокие нагрузки при наименьших деформациях и массе.

Эффективность использования конструкционных материалов можно оценить, определив их удельный расход на один схемный элемент:

$$\eta_{э} = \frac{mg}{N_{э}}, \quad (4.4)$$

где $N_{э}$ – количество входящих в ЭС элементов;

m – масса ЭС, кг.

Таблица 4.3 – Масса применяемых покрытий

Наименование материала	Условия эксплуатации по ГОСТ 14007-68	Гальванические покрытия		Лакокрасочные покрытия		Масса гальванического и лакокрасочного покрытия по отношению к массе материала, %
		вид покрытия	масса покрытия по отношению к массе материала, %	вид покрытия	масса покрытия по отношению к массе материала, %	
Сталь углеродистая	Ж, ОЖ С, Ж	Кадмиевое	6,6	Эмаль МЛ-12 с подслоем грунта	1,5	8,1
		Никелевое	9,6		1,5	11,1
		Серебряное	10,2		1,5	11,7
Титановые сплавы	Ж, ОЖ	Серебряное	8	То же	2,6	10,6
Алюминиевые сплавы	Ж С	Кадмиевое	27,4	То же	4,3	31,7
		Никелевое	16		4,3	20,3
		Серебряное	25		4,3	29,3
Магниевые сплавы	Л	Кадмиевое	47,5	То же	6,5	54
		Никелевое	47,7		6,5	54,2
		Серебряное	49		6,5	55,5

В процессе проектирования НК сравнивают различные варианты и выбирают тот, который имеет минимальную массу.

Металлические и неметаллические покрытия составляют существенную часть от общей массы покрываемых деталей. В таблице 4.3 приведены массы

покрытий в процентах от массы листа площадью 1 м^2 и толщиной $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Из нее следует, что суммарная масса применяемых покрытий составляет от 8,1 до 55,5 % массы покрываемого материала. Ясно, что это обстоятельство следует учитывать при выборе соответствующего покрытия для элементов НК.

5 КОМПОНОВКА РЭС

Компоновка представляет собой размещение элементов РЭС в пространстве или на плоскости. Компоновка – это не абстрагированные схемные обозначения, а геометрическая модель. Компоновочный эскиз – это документ, облегчающий работу конструктора, художника, технолога. По компоновочному эскизу можно выполнить предварительный расчет теплового режима блока и затем по этим данным рассчитать надежность с учетом не только электрических коэффициентов, но и температурного режима.

Одна из основных задач при разработке РЭС – правильно скомпоновать элементы схемы электрической (СхЭ) в соответствии с требованиями ТЗ. Эта компоновка определяет работу коллектива разработчиков.

При этом осуществляется выбор форм, основных геометрических размеров, ориентировочное определение массы и расположения в пространстве любых элементов или изделий радиоэлектронной техники.

Имея СхЭ и компоновочный эскиз узла, можно до разработки рабочих чертежей и изготовления функционального макета оценить возможный характер и величину паразитных связей, рассчитать тепловые режимы узла и т.д.

Выделяют четыре типа факторов, учитываемых при компоновке:

1 Внутренние факторы, определяющие особенности компоновки собственно радио- или электронного аппарата.

2 Факторы, связанные с геометрическими размерами элементов, их формой, расположением выводов.

3 Факторы, определяющие паразитные связи между отдельными цепями и элементами.

4 Факторы, обусловленные наличием перегревов внутри изделия.

Часто на компоновку и ее критерии могут оказывать немаловажное влияние связи между оператором и объектом. Эти связи могут действовать непосредственно или косвенно.

Используются следующие виды компоновочных работ:

- аналитическая компоновка;
- номографическая компоновка;
- аппликационная компоновка;
- модельная компоновка;
- графическая компоновка;
- натурная компоновка.

При аналитической компоновке оперируют численными значениями различных компоновочных характеристик: геометрическими размерами, объемом, массой. Зная соответствующие компоновочные характеристики элементов изделия и законы их суммирования, можно вычислить компоновочные характе-

ристики изделия и его частей. Трудно в этом случае вычислить объем деталей сложной формы. Ее разбивают на ряд простых фигур, которых может быть очень много. При аналитическом определении объемов замещающих фигур стремятся ввести их количество к минимуму.

Принципиально можно вычислить $V_{уст}$ и другие параметры элементов РЭС, пользуясь выражением

$$KП = K_{\partial} \sum_{i=1}^m N_i, \quad (5.1)$$

где $KП$ – компоновочный параметр (вес, объем, площадь);

K_{∂} – коэффициент дезинтеграции;

m – количество составляющих компоновочных параметров;

N_i – элементарный компоновочный параметр.

Используют следующие выражения для определения объема:

$$V_{\Sigma} = K_v \left(\sum_{i=1}^n V_{\sigma_i} + \sum_{j=1}^m V_{\alpha_j} \right); \quad (5.2)$$

массы изделия:

$$\sigma = K_{\sigma} \sum_{i=1}^n \sigma_i, \quad (5.3)$$

где V_{Σ} – общий установочный объем изделия;

K_v – обобщенный коэффициент заполнения блока изделия элементами σ и α ;

V_{σ_i} и V_{α_j} – значения установочных объемов однотипных V_{σ} и V_{α} i -х элементов.

Однако непосредственное вычисление таких формул затрудняется ввиду большого объема вычислительной работы.

Для определения установочной площади или объема элемент заменяют в соответствии с рисунком 5.1 эквивалентной фигурой (прямоугольником), в который может быть вписан данный элемент вместе с устройствами крепления и монтажа.

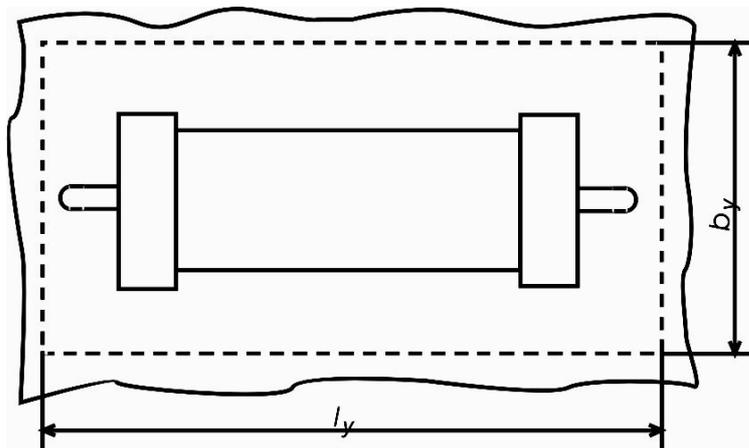


Рисунок 5.1

Минимальный установочный размер (l_y) в миллиметрах для элемента в соответствии с рисунком 5.2 следует рассчитывать по формуле

$$l_y = L + 2l_0 + 2R + d,$$

где L – максимальная длина корпуса, мм;

l_0 – минимальный размер до места изгиба вывода, мм;

R – радиус изгиба вывода, мм;

d – номинальный диаметр вывода элемента, мм.

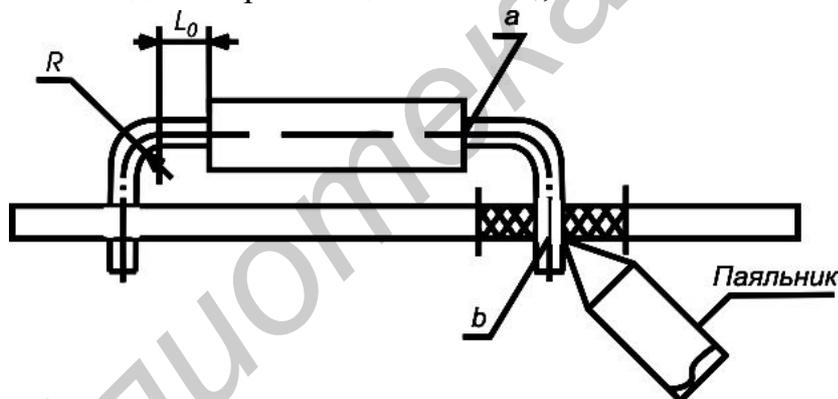


Рисунок 5.2

При формовке выводов элемента размером от корпуса элемента до места изгиба вывода l_0 считают размер от корпуса элемента вдоль оси вывода до места приложения паяльника или зеркала припоя (размер, определяющий расстояние между точками a и b вдоль оси вывода, как указано на рисунке 5.2), в том числе при пайке вывода в металлизированное отверстие.

Минимальный размер от корпуса элемента до места изгиба при формовке выводов l_0 , мм:

- для резисторов, конденсаторов.....0,5;
- для микросхем и других элементов в корпусах
типа 4 по ГОСТ 17467.....1,0;
- для полупроводниковых приборов.....2,0;
- для дросселей.....3,5.

- Минимальный внутренний радиус изгиба выводов R, мм:
- для выводов диаметром или толщиной до 0,5 мм включительно.....0,5;
 - для выводов диаметром или толщиной свыше 0,5 мм до 1,00 мм включительно.....1,0;
 - для выводов диаметром или толщиной свыше 1,00.....1,5.

В технически обоснованных случаях допускается уменьшать внутренний радиус изгиба выводов до 0,3 мм.

Минимальный размер от корпуса элемента до места пайки – 2,5 мм.

Допускается уменьшение указанного размера при условии обеспечения теплоотвода в процессе пайки.

Предельные отклонения размеров между осями двух любых выводов элемента, устанавливаемых в монтажные отверстия, – +0,2 мм, а на контактные площадки – +0,1 мм. Остальные размеры формовки выводов элементов должны быть обеспечены инструментом.

Установочные размеры для элементов, устанавливаемых в отверстия печатных плат, следует выбирать кратными шагу координатной сетки 2,5 или 1,25 мм в соответствии с ГОСТ 10317–79.

Для законченных систем и аппаратов используют аналитические данные по геометрическим размерам, массе и энергопотреблению. Их сопровождают фотографиями, рисунками или габаритными чертежами.

Аналитические методы компоновки включают в себя две трудоемкие операции: расчет отдельных установочных объемов $V_{уст}$ и их суммирование. Определение веса выполняется по значению V_{Σ} довольно просто. Если ограничиться определениями общего объема V_{Σ} , геометрических размеров и веса, то использование номограмм упрощает вычисления. Это упрощение будет еще большим, если вместо натурального ряда численных значений оперировать нормированными значениями $V_{уст}$.

Возможность этого определяется следующим. Рассмотрим блок в виде куба со стороной, равной единице. Его объем будет равен единице заданной размерности. Если ребро куба будет определено с погрешностью Δ , малой по отношению к размеру ребра, то легко показать, что погрешность определения объема будет в три раза больше:

$$(1 + \Delta)^3 \approx 1 + 3\Delta.$$

Отсюда видно, что при определении стороны с погрешностью в 5 % можно определить объем блока с погрешностью в 15 %.

Точность определения стороны блока в 5 % более чем достаточна не только для стадии эскизного, но и технического проектирования.

5.1 Аппликационная компоновка

Аналитическая и номографическая компоновки выполняются по перечням принципиальных схем. Они не обладают наглядностью и не дают возможности получить пространственные компоновочные эскизы. Эти способы используются только при разработке аванпроекта.

После оценки компоновочных характеристик с помощью аналитического расчета или номограмм переходят к использованию других методов. Рассмотрим, например, метод аппликаций. В этом случае на тонком картоне или миллиметровке вычерчивают необходимые проекции элементов. Количество проекций зависит от сложности элемента. Для малогабаритных элементов аппликации вычерчивают в увеличенном масштабе (2:1, 5:1 и более), для крупногабаритных – в уменьшенном. По возможности нужен масштаб 1:1 (наилучшее представление о компоновочных характеристиках). Затем вырезают по контуру изображения элементов, которые и будут собственно аппликациями.

Если элемент имеет несколько разнохарактерных выходов или его части могут перемещаться в процессе работы, то все эти особенности необходимо учесть при вычерчивании его аппликации. На аппликациях источников питания, конденсаторов и т.д. следует указывать их полярность около соответствующих выводов.

На аппликациях полупроводниковых приборов, трансформаторов, дросселей, модулей необходима цоколевка выводов. На аппликациях с перемещающимися частями пунктиром следует указать их крайние положения и траекторию движения.

Такие аппликации очень наглядны, но изготовление их довольно сложно. Поэтому чаще их заменяют прямоугольниками, равными по величине установочной площади элемента в данной проекции.

На них даются необходимые условные обозначения. Затем, наложив на комбинацию аппликаций пергамент или работая на столе с подсветкой, можно получить очень наглядный компоновочный эскиз.

Наиболее удобен этот способ для компоновки в одной плоскости объемных элементов устройств, выполненных с использованием печатного или одноплоскостного проволочного монтажа. Удовлетворительные результаты получаются, когда коэффициент использования объема по $V_{уст}$ не превышает 0,5...0,7 и используются детали с хорошо согласующимися формами и размерами.

5.2 Модельная компоновка

При изготовлении моделей элементов формы их выбирают такими, чтобы они имели достаточно простые, но характерные обводы, зависящие от используемого материала. Клееные модели из плотной бумаги или тонкого картона могут быть только простых форм в виде цилиндров, конусов, кубов, параллелепипедов и их комбинаций. Выполняются модели из дерева, пенопласта, который хорошо обрабатывается, из пластилина, гипса.

Для повышения практичности и более полного соответствия моделей отображаемым ими изделиям их целесообразно окрасить, разместить на них места крепления, дать расположения и цоколевку электрических выводов, оси симметрии и другие необходимые при компоновке сведения. Макеты шасси клеят из картона или фанеры. На них наносят координатную сетку соответствующего размера. Очень наглядны макеты шасси из стекла. Для крепления моделей на них сверлят отверстия диаметром 1 или 1,5 мм для проволочных скрепок.

Кроме моделей, позволяющих получить натурное изображение компонуемого изделия, делают «условные» макеты печатных плат. С их помощью можно выполнить «прикидку» соответствующих узлов, на основе которой легко сделать необходимые чертежи.

5.3 Графическая компоновка

Сущность ее – использование упрощенных способов начертания элементов. Графическая компоновка дает максимальное упрощение ручных графических работ. Это достигается упрощением начертания элементов, применением различных трафаретов, штампов, радиотехнических линеек. Повышение наглядности изображения дает использование цвета для выделения элементов различного типа.

5.4 Натурная компоновка

При натурной компоновке используются различные реальные компоненты. Существует три способа выполнения натурной компоновки.

1 Собирают все элементы заданного устройства, плотно укладывают в коробку и, задаваясь коэффициентом заполнения объема, пересчитывают полученное значение в предположительно необходимое. Однако нарушение правил учета вспомогательных и монтажных объемов может привести к значительным ошибкам.

2 Элементы устройства подготавливают к монтажу, дополнительно изгибая их выводы так, чтобы элементы можно было поставить на плоскость, и раскладывают их в необходимом порядке на листе бумаги или миллиметровке. После достижения удобного расположения элементов их места отмечают простым карандашом, а места точек пайки – цветным. Наложив лист пергамента по цветным точкам, выполняют монтажный эскиз, а по контурам – компоновочные эскизы.

3 Используя элементы устройства, выполняют его работающий макет, соответствующий СХЭ. Часто в таком макете величина паразитных связей мала, а требования по электрическому монтажу не соответствуют нормам. В таких случаях после конструкторской разработки приходится дополнительно доводить разработанный образец до соответствия требованиям ТЗ.

6 ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ РЭС

6.1 Тепловые модели РЭС

Анализ тепловых полей РЭС путем математического описания – задача очень сложная. Практикой выработаны другие методы, когда анализ и решения задачи выполняются приближенными методами с большим количеством ограничений, условностей, допущений по отношению к реальному объекту. На определенном этапе проектирования это достигается путем замены реального блока его тепловой моделью (рисунок 6.1), которая реализуется математически и адекватна изучаемому объекту.

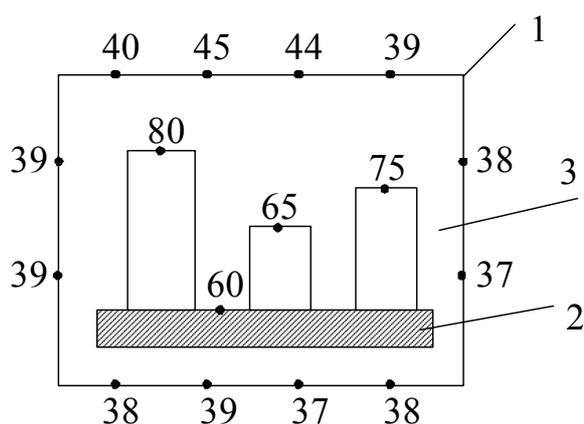


Рисунок 6.1

На рисунке 6.1 схематично представлена конструкция блока РЭС: корпус (1), шасси (2) с крупными радиоэлементами и среда (3), а также указана температура различных участков блока, что и является тепловой моделью блока. Плату или шасси с элементами в тепловой модели называют нагретой зоной. Недостаток такого схематичного изображения нагретой зоны состоит в том, что сложно рассчитать площадь поверхности, охватывающей

зону нагрева. Для упрощения расчета площади поверхности нагретой зоны в тепловой модели ее представляют в соответствии с рисунком 6.2 простейшей геометрической фигурой – прямоугольным параллелепипедом с определенными геометрическими параметрами ($l_1 \times l_2 \times h_3$).

Получаем более грубую, но удобную для расчета тепловую модель, в виде системы двух тел:

- 1 – оболочка кожуха корпуса;
- 2 – нагретая зона в форме прямоугольного параллелепипеда.

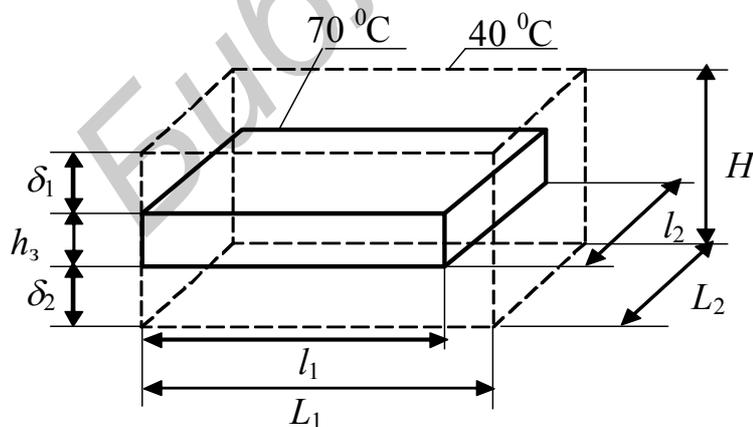


Рисунок 6.2

Параметры нагретой зоны можно условно разделить на геометрические и температурно-энергетические.

Геометрические параметры тепловой модели принято соотносить с габаритами блока. Так, горизонтальные параметры соответствуют горизонтальным размерам кожуха корпуса, то есть $l_1 = L_1$; $l_2 = L_2$, а h_3 – высота параллелепипеда (нагретой зоны). Для

определения h_3 вводят понятие коэффициента заполнения:

$$k_{зан} = \frac{V_3}{V_{блока}} = \frac{\sum V_{дет} + V_{шасси}}{V_{блока}} = \frac{l_1 l_2 h_3}{L_1 L_2 H}, \text{ тогда } k_{зан} = \frac{h_3}{H},$$

откуда получаем

$$h_3 = k_{зан} H. \quad (6.1)$$

Следовательно, площадь поверхности нагретой зоны:

$$S_3 = 2 \cdot (l_1 l_2) + 2 h_3 (l_1 + l_2) = [(l_1 l_2) + h_3 (l_1 + l_2)]. \quad (6.2)$$

Теплоэнергетическими характеристиками блока являются:

$$1) \text{ мощность тепловыделения } P = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (6.3)$$

где P_i – мощность элементной базы;

2) среднеповерхностная температура – \bar{t}_3 , т.к. поверхность нагретой зоны считают изотермической, а также \bar{t}_k и \bar{t}_g .

Цель расчета теплового режима на первом этапе – определение интегральных тепловых характеристик: средних поверхностных температур корпуса блока (\bar{t}_k), нагретой зоны (\bar{t}_3) и среднеобъемной температуры среды между ними (воздуха) – \bar{t}_g .

Таким образом, тепловой режим блока характеризуют $T = f(t_k, t_3, t_g)$.

При разработке тепловых моделей следует руководствоваться принципом иерархии: начинать тепловое моделирование надо с последнего, более крупного уровня, на котором учитываются мощности всех источников, внешнее и полное внутреннее тепловое воздействие. Следует учесть характеристики общей системы охлаждения приборного корпуса, взаимное влияние модулей и элементов. Только после этого можно рассматривать теплообмен на других, более мелких уровнях блока. Это модели первой группы.

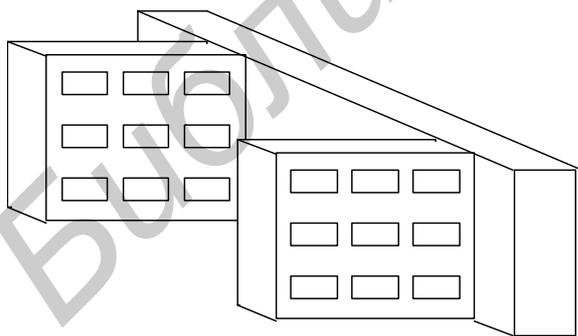


Рисунок 6.3

В тепловых моделях второй группы в соответствии с рисунком 6.3 нагретая зона представляется в виде однородного анизотропного тела. Такой подход обоснован тем, что некоторые РЭУ (например ТЭЗы) содержат большое количество одинаковых элементов (микросхемы, модули). Так как ИМС стандартны по размерам, способу сборки, монтажа, то их можно рассматривать как элементарную конструктивную ячейку, которая повто-

ряется на плате в трех измерениях, и тогда типовой элемент замены можно рассматривать как квазиоднородное тело. Эта система обладает дальним порядком. В такой модели прослеживается аналогия с твердым кристаллическим телом, свойства которого характеризуются теплопроводностью и теплоемкостью. Ос-

новными характеристиками модели являются эффективная теплопроводность и эффективная теплоемкость, которые удобно искать для элементарной ячейки.

6.2 Тепловой режим блока РЭС в герметичном корпусе с крупными деталями на шасси

Рассмотрим тепловой режим блока в герметичном корпусе. Тепловая модель представлена на рисунке 6.4. Заданы суммарная мощность, поэлементно равная $P = \sum P_i$; температура корпуса t_k ; степени черноты всех поверхностей – ε_i и габаритные размеры $L_1 \times L_2 \times H$. Надо найти температуру нагретой зоны – \bar{t}_3 .

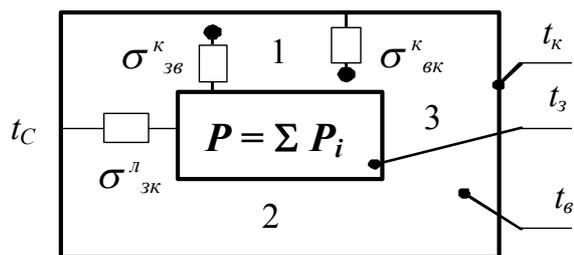


Рисунок 6.4

Рассмотрим теплообмен блока с окружающей неограниченной средой. Данный теплообмен можно разбить на два этапа:

- 1) внутренний теплообмен (до стенок корпуса);
- 2) внешний теплообмен.

Проанализируем эти два этапа для реального блока.

Первый этап:

а) конвективный обмен. Если шасси блока – горизонталь, то конвективное движение воздуха развивается только в верхней части аппаратуры – над шасси, то есть в объеме воздушной прослойки, ограниченной крышкой корпуса блока и поверхностью верхних ЭРЭ, расположенных на шасси. Обозначим эту область в тепловой модели 1. Под шасси конвекция практически отсутствует, так как более нагретые поверхности расположены выше более холодной поверхности дна корпуса. Обозначим эту область 2;

б) лучистый теплообмен. Представляет передачу тепла к внутренним стенкам корпуса через воздух, который практически прозрачен для лучистой энергии. В этом теплообмене участвуют только периферийные поверхности элементов, так как излучение центральных деталей и шасси не достигает стенок корпуса блока из-за их расположения в глубине зоны и экранирования соседними телами;

в) кондуктивный теплообмен. На основании опытов и практики установлено, что кондуктивные связи шасси с корпусом блока слабо влияют на тепловой режим нагретой зоны аппарата.

Второй этап: внешний теплообмен блока – передача тепловой энергии от корпуса блока в окружающую среду конвекцией и излучением.

Таким образом,

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = P_{зк}^{внут} = P_{кс}^{внеш} = P_k^{внеш} + P_l^{внеш}. \quad (6.4)$$

Теплообмен блока можно представить в виде тепловой схемы в соответствии с рисунком 6.5, где $\sigma_{KC} = \sum_{i=1}^2 \sigma_i = \sigma_{KC}^K + \sigma_{KC}^L$, и описать системой уравнений теплового баланса:

$$\begin{cases} P_{3K} = \sigma_{3B}^K (\vartheta_3 - \vartheta_B) + \sigma_{3K}^L (\vartheta_3 - \vartheta_K), \\ \sigma_{3B}^K (\vartheta_3 - \vartheta_B) = \sigma_{BK}^K (\vartheta_B - \vartheta_K), \\ P_{KC} = \sigma_{KC} (V_K - V_C). \end{cases} \quad (6.5)$$

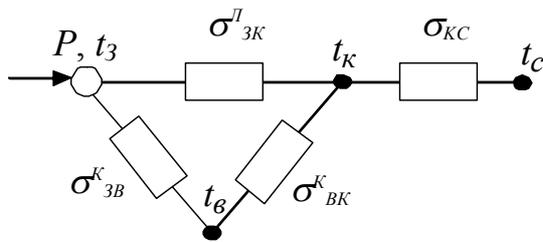


Рисунок 6.5

Для определения t_3 тепловую энергию, передаваемую от нагретой зоны к корпусу, выразим как

$$P_{3K} = \sigma_{3K} (t_3 - t_K),$$

откуда

$$t_3 = t_K + \frac{P_{3K}}{\sigma_{3K}}. \quad (6.6)$$

Учтем, что t_K и $P_{3K} = P = \sum_{i=1}^n P_i$ заданы,

требуется определить

$$\sigma_{3K} = \sum_{i=1}^2 \sigma_i = \sigma_{3K}^L + \sigma_{3K}^K. \quad (6.7)$$

В общем случае тепловая энергия, выделяемая поверхностью корпуса РЭС, передается среде и соседним телам, совокупность которых может рассматриваться как условная среда:

$$\Delta t = t_K - t_C = \frac{P}{\sigma_{KC} + \sigma_{Ki}},$$

где σ_{Ki} – тепловая проводимость для условной среды.

Если исследуемый объект находится в неограниченной среде и влиянием других тел можно пренебречь, то $\sigma_{Ki} = 0$:

$$\text{тогда} \quad t_K - t_C = \frac{P}{\sigma_{KC}} \quad \text{или} \quad t_K = t_C + \frac{P}{\sigma_{KC}}. \quad (6.8)$$

Пусть задан герметичный корпус аппарата размерами $L_1 \times L_2 \times L_3$, внутри которого действует источник мощностью P . Также задана температура среды t_C и давление вне аппарата H . Надо найти t_K , используя (6.8).

В соответствии с рисунком 6.6 для нахождения σ_{KC} учтем теплообмен корпуса с окружающей средой (это конвекция и лучеиспускание):

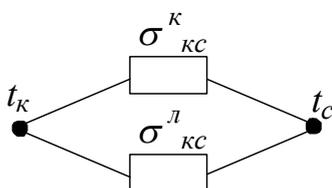


Рисунок 6.6

$$\sigma_{KC} = \sigma_{KC}^K + \sigma_{KC}^L. \quad (6.9)$$

Рассмотрим каждое из слагаемых.

$$\text{Для излучения } \sigma_{\kappa c}^L = \alpha_L S_{\kappa} = \varepsilon \varphi f(t_{\kappa}, t_c) S_{\kappa}, \quad (6.10)$$

$$S_{\kappa} = 2 [L_1 L_2 + L_3 (L_1 + L_2)].$$

Для конвекции: при определении $\sigma_{\kappa c}^{\kappa}$ требуется учесть форму и ориентацию поверхности корпуса. Он состоит из трех пар плоских элементов, ориентированных как горизонтально, так и вертикально: верх (крышка), дно и боковая поверхность, то есть

$$\sigma_{\kappa c}^{\kappa} = \sigma_{\kappa c}^{\text{верх}} + \sigma_{\kappa c}^{\text{бок.}} + \sigma_{\kappa c}^{\text{дно}} = \alpha_{\kappa}^{\varepsilon} S_{\varepsilon} + \alpha_{\kappa}^{\bar{\sigma}} S_{\bar{\sigma}} + \alpha_{\kappa}^{\partial} S_{\partial}. \quad (6.11)$$

Для нахождения коэффициента теплоотдачи конвекцией в неограниченной среде воспользуемся правилом (19) и таблицей 2:

$$(T - T_c) \leq \left(\frac{0,84}{L} \right)^3,$$

в зависимости от выполнения или невыполнения которого есть два варианта решения – закон 1/4 или закон 1/3. Откуда

- для горизонтально ориентированной поверхности с нагретой верхней стороной может быть

$$\alpha_{\kappa}^{\varepsilon} = 1,30 \cdot A_3 \left(\frac{t_{\kappa} - t_c}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ либо } \alpha_{\kappa}^{\varepsilon} = 1,34 \cdot A_3 (t_{\kappa} - t_c)^{\frac{1}{3}},$$

где L – определяющий параметр – наименьшая сторона,

для горизонтально ориентированной поверхности с нагретым дном

$$\alpha_{\kappa}^{\partial} = 0,70 \cdot A_2 \left(\frac{t_{\kappa} - t_c}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ либо } \alpha_{\kappa}^{\partial} = 0,70 \cdot A,$$

- для вертикально ориентированных плоских сторон нагретой боковой поверхности можно записать

$$\alpha_{\kappa}^{\bar{\sigma}} = A_2 \left(\frac{t_{\kappa} - t_c}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ либо } \alpha_{\kappa}^{\bar{\sigma}} = A (t_{\kappa} - t_c)^{\frac{1}{3}},$$

$$S_{\varepsilon} = L_1 L_2; \quad S_{\partial} = L_1 L_2; \quad S_{\bar{\sigma}} = 2 L_3 (L_2 + L_1).$$

Вследствие того, что α_{κ} зависит от искомой температуры t_{κ} , задача нелинейна и ее решение можно получить либо методом тепловых характеристик, либо методом последовательных приближений.

Для типичных типоразмеров и температурных условий:

частный случай: если $T = 20 \dots 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $(t_{\kappa} - t_c) = \vartheta \leq 10^{\circ}$; $L_3 = (0,1 \dots 0,5) \text{ м}$; то $\bar{\alpha}_{\kappa} = 5,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$, $\alpha_{\bar{\sigma}} = (2,4 \dots 4,4) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$, следовательно, $\bar{\alpha} = 9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$ и тогда

$$\sigma_{\kappa c} = 9 S_{\kappa}, \quad t_{\kappa} = t_c + \frac{P}{9 S_{\kappa}}. \quad (6.12)$$

6.3. Тепловой режим РЭС в перфорированном корпусе при естественной вентиляции РЭА

Для снижения теплового режима РЭС широко применяется метод перфорирования корпуса и шасси. Тепловая модель блока в перфорированном корпусе имеет вид в соответствии с рисунком 6.7.

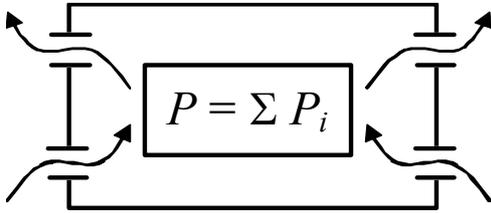


Рисунок 6.7

Внутри блока поступает воздух, движение которого вызвано разностью температур и давлений внутри и снаружи корпуса. Возникает его самотяга.

Теплообмен в таком блоке подразделяется на внутренний и внешний.

Теплообмен внутри блока. Тепловая энергия P , выделяемая нагретой зоной, передается излучением и конвекцией: излучением – внутренним стенкам корпуса, а также через отверстия в корпусе внешней среде, чем в дальнейшем будем пренебрегать; конвекцией – воздуху, протекающему внутри корпуса, от нагретой зоны и внутренних поверхностей корпуса. Тепловая энергия Q (или ее эквивалент W), полученная конвективно воздухом, через перфорированные отверстия выносится в окружающую среду.

Внешний теплообмен. От корпуса тепловая энергия, величина которой $P_K = P - Q$, излучением и конвекцией передается в окружающую среду.

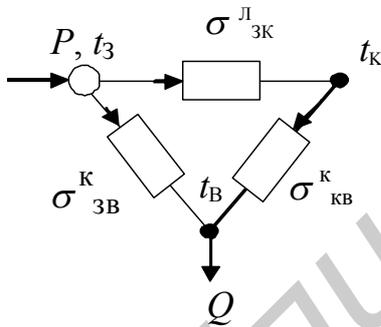


Рисунок 6.8

Процессы теплообмена в соответствии с рисунком 6.8 можно представить в виде тепловой схемы и описать системой уравнений теплового баланса:

$$\begin{cases} P_K = P - Q, \\ P = \sigma_{3b}^K (\vartheta_3 - \vartheta_b) + \sigma_{zk}^L (\vartheta_3 - \vartheta_k), \\ \sigma_{zk}^L (\vartheta_3 - \vartheta_k) = \sigma_{kb}^K (\vartheta_k - \vartheta_b) + \sigma_{kc} (\vartheta_k - \vartheta_c). \end{cases} \quad (6.13)$$

Эта система полностью описывает процесс теплообмена в блоке, иногда ее дополняют аэродинамическими уравнениями. Преобразовав (6.13), получим:

$$\begin{cases} P = (\sigma_{zk} + \sigma_{kb}) \vartheta_3 - \sigma_{zk} \vartheta_b - \sigma_{zk} \vartheta_k; \\ 0 = -\sigma_{zk} \vartheta_3 - (\sigma_{zk} - \sigma_{kb} - \sigma_{kc}) \vartheta_k - \sigma_{kb} \vartheta_b; \\ 0 = \sigma_{3b} \vartheta_3 + (\sigma_{3b} + \sigma_{kb}) \vartheta_b - (\sigma_{kb} + \sigma_{kc}) \vartheta_k. \end{cases} \quad (6.14)$$

Из решения системы (6.14) получают уравнения для основных характеристик теплового режима перфорированного блока:

$$\begin{cases} \mathcal{G}_3 = A_{3C} \mathcal{G}_{6x} + F_{3C} P; \\ \mathcal{G}_K = A_{KC} \mathcal{G}_{6x} + F_{KC} P; \\ \mathcal{G}_6 = \mathcal{G}_{6x} + \frac{P - \sigma_{KC} \mathcal{G}_K}{2Q}, \end{cases} \quad (6.15)$$

где A_{3C} , F_{3C} , A_{KC} , F_{KC} – тепловые коэффициенты:

$$\begin{aligned} A_{3C} &= D \left[\sigma_{3K} + \sigma_{KC} + \sigma_{KB} \left(1 + \frac{\sigma_{3K}}{\sigma_{36}} \right) \right]; \\ F_{3C} &= \frac{D}{\sigma_{36}} \left\{ \sigma_{3K} + \sigma_{KB} + \sigma_{KC} + \frac{\sigma_{36}}{2Q} \left[\sigma_{3K} + \sigma_{KC} \left(1 + \frac{\sigma_{KB}}{\sigma_{36}} \right) + \sigma_{KB} \left(1 + \frac{\sigma_{3K}}{\sigma_{36}} \right) \right] \right\}; \\ A_{KC} &= D \left[\sigma_{3K} + \sigma_{KB} \left(1 + \frac{\sigma_{3K}}{\sigma_{36}} \right) \right]; \\ F_{KC} &= D \left\{ \frac{\sigma_{3K}}{\sigma_{36}} \left(1 + \frac{\sigma_{36}}{2Q} \right) + \frac{\sigma_{KB}}{2Q} \left(1 + \frac{\sigma_{3K}}{\sigma_{36}} \right) \right\}; \\ D^{-1} &= \sigma_{KB} \left(1 + \frac{\sigma_{KB}}{2Q} \right) + \left(1 + \frac{\sigma_{3K}}{\sigma_{36}} \right) \left[\sigma_{KC} + \sigma_{KB} \left(1 + \frac{\sigma_{3K}}{2Q} \right) \right]. \end{aligned}$$

Следовательно, для расчета теплового режима перфорированного блока надо определить тепловые проводимости σ_{3K}^L , σ_{36}^K , σ_{KB}^K , σ_{KC} .

Рассмотрим их описание:

1) $\sigma_{3K}^L = \alpha_L S_3$, (пренебрегаем уходом тепла через перфорированные отверстия) и описано формулой (6.07);

2) $\sigma_{36}^K = \alpha_K' S_3$;

3) $\sigma_{KB}^K = \alpha_K'' S_K'$; $S_K' = S_K - S_i$,

где S_i – суммарная площадь перфорационных отверстий.

Вместо S_K' берут S_K , излишек S будет компенсировать неучтенную потерю лучистой энергии через перфорационные отверстия;

α_K' и α_K'' – конвективные коэффициенты теплообмена соответственно с поверхностями нагретой зоны и внутренней поверхности корпуса.

Так как конвективная теплоотдача идет в одних и тех же каналах, то можно считать, что $\alpha_K'' = \alpha_K' = \alpha_K$, где α_K определяется через критериальные уравнения, соответствующие принудительной конвекции, так как теплоотдача происходит в условиях движущейся среды.

Для выбора критериального уравнения надо использовать критерий Рейнольдса:

$$Re = v \frac{d_{эKB}}{\nu_m},$$

где

$$d_{\text{экв}} = \frac{4S_{\text{попереч}}}{l_{\text{перим}}}.$$

Здесь $S_{\text{попереч}}$ – площадь сечения верхнего отсека;

$l_{\text{перим}}$ – периметр верхнего отсека.

Рассмотрим варианты решения этого уравнения:

а) $Re < 2,3 \cdot 10^3$ – ламинарный закон; б) $Re > 4,0 \cdot 10^4$ – турбулентный закон.

$$\begin{cases} Nu_{\text{л}} = 0,13 Re_f^{\frac{1}{3}} Gr_f^{0,1} \varepsilon_L, \\ Nu = \alpha_{\text{к}} \frac{\lambda_m}{d_{\text{экв}}}. \end{cases} \quad \begin{cases} Nu_T = 0,018 Re_f^{0,8}, \\ Nu = \alpha_{\text{к}} \frac{\lambda_m}{d_{\text{экв}}}. \end{cases}$$

$$4) \sigma_{\text{кс}} = \sigma_{\text{кс}}^{\text{к}} + \sigma_{\text{кс}}^{\text{л}} = (\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}) S_{\text{к}}.$$

6.4. Общая принудительная вентиляция

Тепловая модель РЭА с принудительной вентиляцией сходна с моделью перфорированного блока в соответствии с рисунком 6.9.

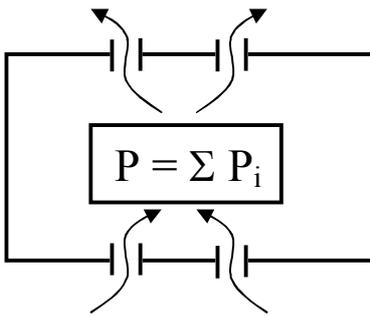


Рисунок 6.9

РЭА такого типа может быть с вертикально и горизонтально расположенным шасси. Особенностью теплообмена при принудительной вентиляции является то, что интенсивность теплообмена излучением между нагретой зоной и корпусом блока, окружающей средой в данных условиях продува ничтожно мала. Расчет основных характеристик теплового режима \mathcal{Q}_z , \mathcal{Q}_k , $\mathcal{Q}_в$ проводится по тем же формулам, что и в п. 6.3 (6.15), но с учетом специфики процесса теплообмена и уточнением тепловых коэффициентов:

$$\begin{cases} \mathcal{Q}_z = A_{zс} \mathcal{Q}_{вх} + F_{zс} P, \\ \mathcal{Q}_k = A_{кс} \mathcal{Q}_{вх} + F_{кз} P, \\ \mathcal{Q}_в = \mathcal{Q}_{вх} + \frac{P - \sigma_{кс} \mathcal{Q}_k}{2 Q}. \end{cases}$$

Исходными данными являются: суммарная мощность нагретой зоны, температура среды, подводимой для охлаждения, геометрические и физические параметры аппаратуры, а также расход среды, поступающей для охлаждения (G_V – объемный расход; G_m – массовый расход).

$$G_V = V S, \frac{\text{л}}{\text{с}}; \quad G_m = V \rho S, \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \quad \frac{G_V}{G_m} = \frac{1}{\rho}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

$$t_в = 0,5(t_{вх} + t_{вых}).$$

Для упрощения расчета сделаем следующие допущения:

1) если расход воздуха через аппарат достаточно велик, то можно заключить, что $\sigma_{3к}^л \ll \sigma_{3в}^к; \sigma_{кв}^к; \sigma_{кс}^к; \sigma_{кс}^л \ll \sigma_{кс}^к$;

2) поскольку лучистый теплообмен между нагретой зоной и корпусом, а также между корпусом и средой слабо влияет на тепловой режим аппарата, то соответствующие $\sigma_{3к}^л$ и $\sigma_{кс}^л$ можно определить приближенно:

$$\sigma_{3к}^л = 6S_3; \quad \sigma_{кс}^л = 9S_к;$$

$$3) \sigma_{3в}^к = \alpha'_к S_3; \quad \gamma_{кв}^к = \beta''_к S_к.$$

$\alpha''_к$ и $\alpha'_к$, будучи одинаковыми для конвективного теплообмена, в одном отсеке определяются из критериального уравнения для принудительной вентиляции:

$$Nu = 0,8 \sqrt{Re};$$

$$Re = \nu \frac{l'}{v_m}; \quad \nu = \frac{G_V}{S_{ср}}; \quad S_{ср} = S_{аппарата} (1 - K_{запол});$$

где l' – длина обдува, равная высоте деталей плюс шасси;

$S_{аппарата}$ – площадь поперечного сечения блока в направлении, перпендикулярном потоку;

4) в диапазоне температур 20 ... 60 °С теплоемкость (C_p), через которую определяется Q , слабо зависит от температуры и, следовательно, является величиной как бы постоянной: $C_p = 10^3, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, тогда $Q = C_p G_m \approx 10^3 \cdot G_m, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$;

5) конвективный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{3в}^к$ является величиной больше или равной $10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$ и позволяет найти коэффициент $F_{3с}$.

6.5 Инженерные методики расчета теплового режима блоков РЭС

6.5.1 Методика расчета теплового режима блоков РЭС в герметичном корпусе

Тепловой режим РЭС в герметичном корпусе рассчитывается в следующем порядке:

1) площадь поверхности корпуса блока:

$$S_к = 2 \left[L_1 L_2 + (L_1 + L_2) L_3 \right];$$

2) площадь условной поверхности нагретой зоны:

$$S_3 = 2 \left[L_1 L_2 + (L_1 + L_2) K_{зап} L_3 \right];$$

3) удельная мощность корпуса блока (где P – мощность, рассеиваемая в блоке):

$$q_k = \frac{P}{S_k};$$

4) удельная мощность нагретой зоны блока (где P – мощность, рассеиваемая в блоке):

$$q_{\text{зоны}} = \frac{P}{S_3};$$

5) коэффициент θ_1 в зависимости от удельной мощности корпуса:

$$\theta_1 = 0,1472 q_k - 0,29692 \cdot 10^{-3} q_k^2 + 0,13127 \cdot 10^{-6} q_k^3;$$

6) коэффициент θ_2 в зависимости от удельной мощности зоны:

$$\theta_2 = 0,1390 q_3 - 0,1223 \cdot 10^{-3} q_3^2 + 0,0698 \cdot 10^{-6} q_3^3;$$

7) коэффициент k_1 в зависимости от давления вне корпуса (H_1 , Па):

$$k_{H1} = \frac{1}{0,92 + 0,46 \cdot 10^{-5} \cdot H_1} + 0,8;$$

8) коэффициент k_2 в зависимости от давления в корпусе (H_2 , Па):

$$k_{H2} = \frac{1}{1,25 + 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot H_2} + 0,8;$$

9) перегрев корпуса блока:

$$\theta_K = \theta_{k_{H1}};$$

10) перегрев нагретой зоны:

$$\theta_3 = \theta_K + (\theta_2 - \theta_1) k_{H2};$$

11) средний перегрев воздуха в блоке:

$$\theta_B = 0,5(\theta_K - \theta_3);$$

12) удельная мощность элемента:

$$q_{\text{эл}} = \frac{P_{\text{эл}}}{S_{\text{эл}}};$$

13) перегрев поверхности элемента:

$$\theta_{эл} = \theta_3 \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{эл}}{q_3} \right);$$

14) перегрев среды около элемента:

$$\theta_{эс} = \theta_B \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{эл}}{q_3} \right);$$

15) температура корпуса:

$$T_K = \theta_B + T_C;$$

16) температура нагретой зоны:

$$T_3 = \theta_3 + T_C;$$

17) температура воздуха в корпусе:

$$T_B = \theta_B + T_C;$$

18) температура поверхности элемента:

$$T_{эл} = \theta_{эл} + T_C;$$

19) температура среды, окружающей элемент:

$$T_{эс} = \theta_{эс} + T_C.$$

6.5.2 Методика расчета теплового режима блоков РЭС в перфорированном корпусе

Рассчитываются:

1) площадь поверхности корпуса блока, площадь условной поверхности нагретой зоны, удельная мощность нагретой зоны, коэффициенты $\theta_1, \theta_2, K_{H1}, K_{H2}$ определяются по пп. 1 – 8 методики 6.5.1;

2) суммарная площадь перфорированных отверстий:

$$S_{\Pi} = \sum_{i=1}^n S_i;$$

3) коэффициент перфорации:

$$\Pi = \frac{S_{\Pi}}{2 \cdot L_1 L_2};$$

4) функция коэффициента перфорации:

$$K_{II} = 0,29 + \frac{1}{1,41 + 4,95 \Pi};$$

5) перегрев корпуса:

$$\theta_K = 0,93 \theta_1 K_{H1} K_{II};$$

6) перегрев нагретой зоны:

$$\theta_3 = 0,93 K_{II} \left[\theta_1 K_{H1} + K_{H2} \left(\frac{\theta_2}{0,93} - \theta_1 \right) \right];$$

7) средний перегрев воздуха в корпусе:

$$\theta_B = 0,6 \theta_3;$$

8) удельная мощность элемента:

$$q_{эл} = \frac{P_{эл}}{S_{эл}};$$

9) перегрев поверхности элемента:

$$\theta_{эл} = \theta_3 \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{эл}}{q_3} \right);$$

10) перегрев среды, окружающей элемент:

$$\theta_{эл} = \theta_B \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{эл}}{q_3} \right);$$

11) температура корпуса:

$$T_K = \theta_B + T_C;$$

12) температура нагретой зоны:

$$T_3 = \theta_3 + T_C;$$

13) температура воздуха в блоке:

$$T_B = \theta_B + T_C;$$

14) температура поверхности элемента:

$$T_{эл} = \theta_{эл} + T_C;$$

15) температура среды, окружающей элемент:

$$T_{эс} = \theta_{эс} + T_C.$$

6.5.3 Методика расчета теплового режима блока

с принудительной вентиляцией

Исходные данные: мощность, рассеиваемая в блоке (P), габаритные размеры корпуса L_1, L_2, L_3 , мощность нагруженных теплоэлементов (P_i), площади поверхностей (S_i), $K_{зАП}$, массовый расход G_m , расстояние в направлении движения воздуха от входного сечения l , T_B – температура воздуха на входе.

Порядок расчета:

1) средний перегрев воздуха в блоке:

$$\theta_B = 5 \cdot 10^{-4} \frac{P}{G_m};$$

2) площадь поперечного сечения корпуса:

$$S = L_1 L_2;$$

3) коэффициент в зависимости от массового расхода среды:

$$m_1 = 0,001 \cdot \sigma^{-0,5};$$

4) $m_2 = (L_1 L_2)^{-0,406}$ – от поперечного сечения к направлению продувания.

5) $m_3 = (L_3)^{-1,059}$ – от высоты блока в направлении продува;

6) $m_4 = K_{зАП}^{-0,42} \left(1 - K_{зАП}^{\frac{2}{3}} \right)^{0,5}$ – от коэффициента заполнения;

7) перегрев нагретой зоны с принудительным охлаждением:

$$\theta_3 = \theta_B + P m_1 m_2 m_3 m_4;$$

8) условная поверхность нагретой зоны:

$$S_3 = 2 \left[L_1 L_2 + K_{зАП} L_3 (L_1 + L_2) \right];$$

9) удельная мощность нагретой зоны:

$$q_3 = \frac{P}{S_3};$$

10) удельная мощность элемента:

$$q_{эл_i} = \frac{P_{эл_i}}{S_{эл_i}};$$

11) Перегрев поверхности i -го элемента:

$$\theta_{эл_i} = \theta_3 \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{эл_i}}{q_3} \right) \left(\frac{L_i}{L} + 0,5 \right),$$

где L_i – высота элемента;

12) перегрев среды, окружающей 1-й элемент:

$$\theta_{эс_i} = \theta_B \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{эл_i}}{q_3} \right) \left(\frac{L_i}{L_3} + 0,5 \right);$$

13) перегрев корпуса:

$$\theta_K = 0,93 \theta_1 K_{H1} K_{II};$$

14) перегрев нагретой зоны:

$$\theta_3 = 0,93 K_{II} \left[\theta_1 K_{H1} + K_{H2} \left(\frac{\theta_2}{0,93} - \theta_1 \right) \right];$$

15) средний перегрев воздуха в корпусе:

$$\theta_B = 0,6 \theta_3;$$

16) температура корпуса:

$$T_K = \theta_K + T_C.$$

6.5.4 Выбор способа охлаждения на ранней стадии конструирования

На ранней стадии конструирования в распоряжении конструктора имеется ТЗ, причем, как правило, необходимые сведения о требуемом тепловом режиме РЭА заключены в картах тепловых характеристик блоков. Для выбора способа охлаждения прежде всего требуются следующие данные:

- суммарная мощность P , рассеиваемая в блоке;
- диапазон возможного изменения температуры окружающей среды

$T_{C \max}, T_{C \min}$;

- пределы изменения давления окружающей среды p_{\max}, p_{\min} ;
- время непрерывной работы τ ;
- допустимые температуры элементов T_i .

Кроме того, необходимо задать коэффициент заполнения аппарата:

$$K_3 = \sum_{i=1}^n v_i / V,$$

где v_i – объем i -го элемента РЭА;

n – число элементов в РЭА;

V – объем, занимаемый РЭА; а также горизонтальные и вертикальные размеры корпуса РЭА соответственно L_1, L_2 и L_3 либо для «больших» элементов – величину охлаждаемой поверхности S_{II} . Коэффициент заполнения аппарата характеризует степень полезного использования объема и является одним из главных показателей качества конструкции. Коэффициент заполнения должен быть указан в ТЗ или может выбираться на основании опыта конструирования подобных РЭА. Основные размеры корпуса РЭА можно определить прикидочными расчетами компоновки РЭА.

Эти исходные данные недостаточны для детального расчета теплового режима, но их можно использовать для предварительной оценки. Выбор способа охлаждения на ранней стадии конструирования часто имеет вероятностный характер, то есть дает возможность оценить вероятность обеспечения заданного по ТЗ теплового режима РЭА при выбранном способе охлаждения, а также те усилия, которые нужно затратить при разработке будущей конструкции РЭА с учетом обеспечения теплового режима.

Выбор способа охлаждения РЭА можно сделать с помощью графиков в соответствии с рисунком 6.10, характеризующих области целесообразного применения различных способов охлаждения. Эти области строятся по результатам обработки статистических данных для реальных конструкций, тепловых расчетов и данных испытания макетов. Для удобства пользования графиками необходимо из перечисленных выше исходных данных получить ряд комплексных показателей.

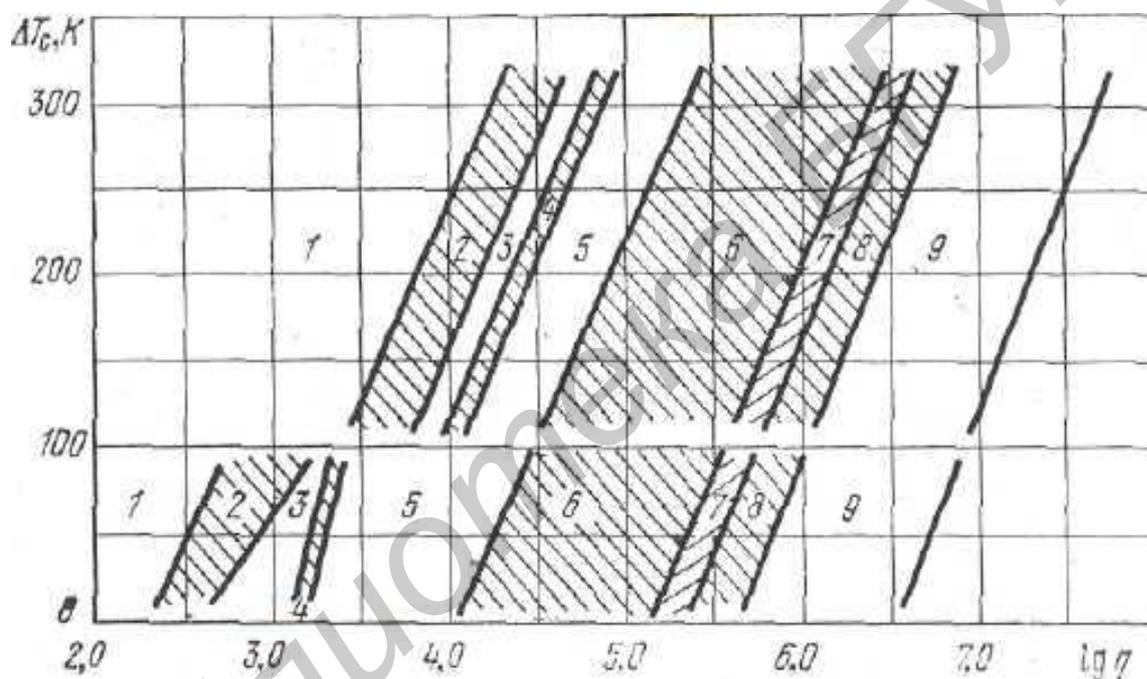


Рисунок 6.10

Размеры корпуса аппарата и коэффициент заполнения используются для определения условной величины поверхности теплообмена:

$$S_{\Pi} = 2 \left[L_1 L_2 + (L_1 + L_2) L_3 K_3 \right].$$

Если способ охлаждения выбирается для большого элемента, то величина поверхности теплообмена определяется из соответствующих чертежей по геометрическим размерам поверхности, находящейся в непосредственном контакте с теплоносителем.

За основной показатель, определяющий области целесообразного применения способа охлаждения, принимается величина плотности теплового потока, проходящего через поверхность теплообмена:

$$q = PK_P/S_{\Pi},$$

где P – суммарная мощность, рассеиваемая РЭА с поверхности теплообмена;
 K_P – коэффициент, учитывающий давление воздуха (при атмосферном давлении $K_P = 1$).

Вторым показателем может служить минимально допустимый перегрев элементов РЭА:

$$\Delta T_c = T_{i \min} - T_c,$$

где $T_{i \min}$ – допустимая температура корпуса наименее теплостойкого элемента по ТЗ, т.е. элемента, для которого допустимая температура имеет минимальное значение; для больших элементов это допустимая температура охлаждаемой поверхности;

T_c – температура окружающей среды;
 для естественного охлаждения

$$T_c = T_{c \max},$$

т.е. соответствует максимальной температуре окружающей среды, заданной в ТЗ;
 для принудительного охлаждения

$$T_c = T_{вх},$$

т.е. соответствует температуре воздуха (жидкости) на входе в РЭА.

На рисунке 6.10 области целесообразного применения различных способов охлаждения приведены в координатах $\Delta T_c, \lg q$. Имеется два типа областей. Области, в которых можно рекомендовать применение определенного способа охлаждения, и области, в которых с примерно одинаковым успехом можно применять два или три способа охлаждения. Области первого типа не заштрихованы и относятся к следующим способам охлаждения: 1 – естественное воздушное, 3 – принудительное воздушное, 5 – принудительное жидкостное, 9 – принудительное испарительное. Области второго типа заштрихованы: 2 – возможно применение естественного и принудительного воздушного, 4 – возможно применение принудительного воздушного и жидкостного, 6 – возможно применение принудительного жидкостного и естественного испарительного, 7 – возможно применение принудительного жидкостного, принудительного и естественного испарительного, 8 – возможно применение естественного и принудительного испарительного.

Следует заметить, что верхние кривые на рисунке 6.10, соответствующие $\Delta T_c > 373 \text{ К}$ (100 °С), обычно применяются для выбора способа охлаждения больших элементов, так как допустимые температуры их охлаждаемых поверхностей часто выше 373 К . Нижние кривые на рисунке 6.10 применяются для выбора способа охлаждения блоков, стоек и т.п., выполненных на дискретных и микроминиатюрных элементах, так как для них обычно $\Delta T_c < 373 \text{ К}$. Поэтому области целесообразного применения различных способов воздушного охлаждения в верхней части графика не являются продолжением соответствующих кривых в нижней части. Последнее

вызвано также и тем, что при охлаждении разветвленных поверхностей больших элементов можно получить более высокие эффективные коэффициенты теплоотдачи.

6.5.5 Радиаторы охлаждения полупроводниковых приборов

В радиотехнических устройствах тепловая энергия выделяется в отдельных узлах и приборах, которые размещены неравномерно по объему аппарата, в отдельных его точках получается концентрация тепловой энергии, сопровождаемая резким повышением температуры. При конструировании РЭА конструктор обязан предусмотреть меры по отводу тепла от конкретных участков. Одним из способов отвода тепла от отдельных сильно нагреваемых устройств является использование радиаторов.

Теплоотводящие радиаторы различаются между собой формой ребер, способом осуществления теплового контакта и мощностью теплового рассеяния. Наибольшее распространение в РЭА получили радиаторы с ребрами пластинчатой, ребристой, штырьковой и игольчатой форм. Типовые конструкции радиаторов с установленными на них источниками тепла показаны на рисунке 6.11.

Пластинчатые радиаторы изготовляют из листовой стали или листового проката алюминиевых сплавов толщиной от 2 до 6 мм. Из-за сравнительно малой эффективности такие радиаторы используются для отвода тепла небольших мощностей.

Ребристые радиаторы при одинаковых размерах с пластинчатыми более эффективны. Их изготовляют из алюминиевых или магниевых сплавов способом литья с последующей обработкой контактных площадок до 6...7 классов чистоты поверхности.

Штырьковые радиаторы имеют более высокий коэффициент теплообмена, чем ребристые, и изготавливаются преимущественно литьем под давлением.

Игольчатые радиаторы в несколько раз эффективнее штырьковых, однако сложность изготовления и сравнительно большая стоимость несколько сдерживают их применение.

Эффективность теплообмена радиаторов находится в прямой зависимости от количества и размеров ребер, а также от взаимного расположения их. Наименьшая толщина ребра определяется технологическими возможностями литья, а минимальный размер между соседними плоскостями ребер рекомендуется делать не менее 4...6 мм из-за необходимости образования на стенках ребер пограничного слоя охлаждающего воздуха наименьшей толщины.

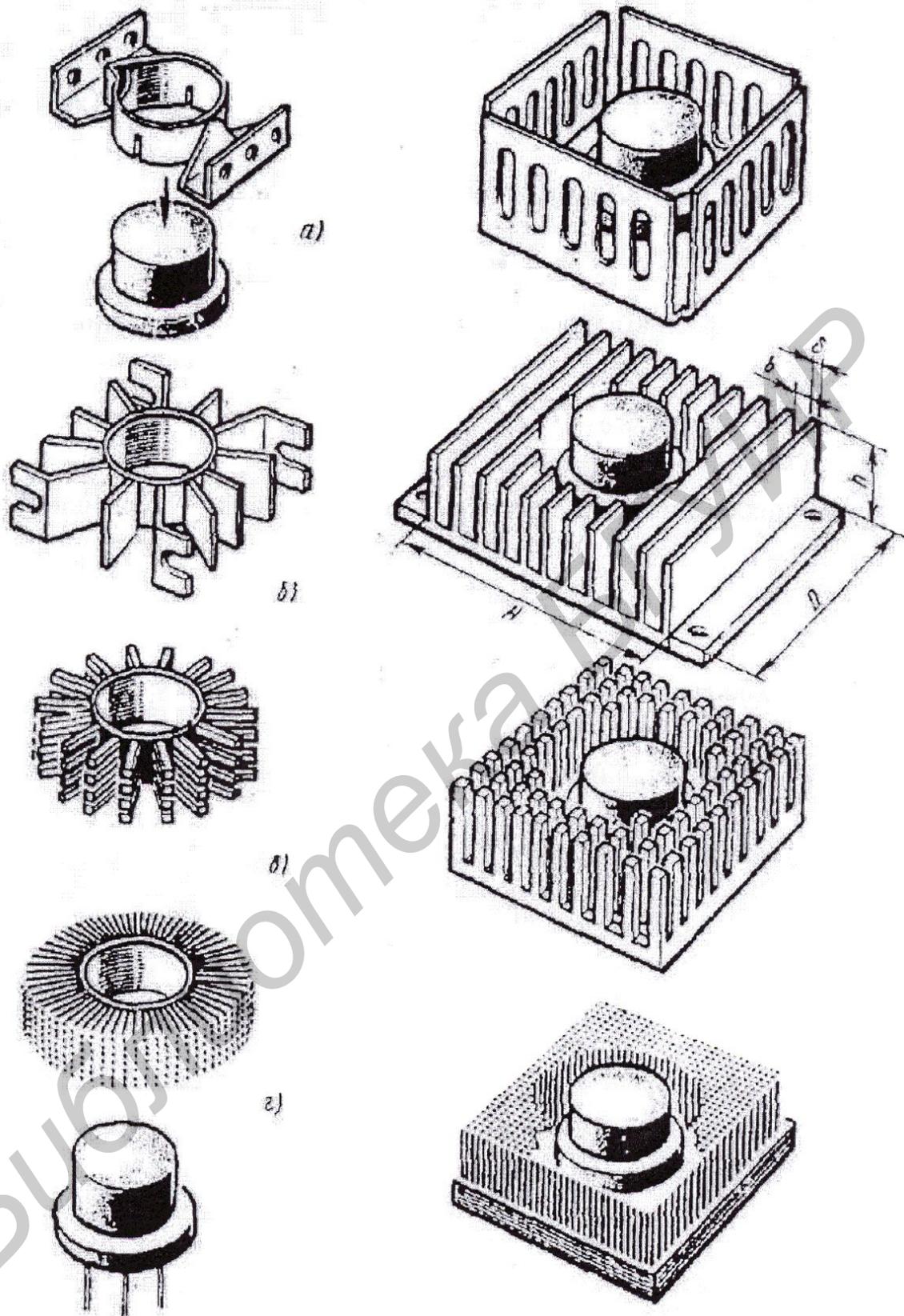


Рисунок 6.11

Для обеспечения теплового контакта с наименьшим термическим сопротивлением между источником тепла и радиатором устанавливаются мягкие прокладки с высокой теплопроводностью (алюминий, свинец, олово). Если необхо-

димо электроизолировать источник тепла от радиатора, то оксидируют контактную плоскость или используют прокладки из оксидированного алюминия.

В целях ликвидации между ребрами застоя пограничного слоя охлаждающего воздуха и обеспечения его турбулентности поверхность ребер оксидируют или на нее наносится глянцевое лакокрасочное покрытие.

Расчет радиаторов заключается в определении его геометрических размеров при заданной мощности теплового рассеяния, температуре окружающей среды и максимально допустимом нагреве корпуса охлаждаемого элемента. Однако может быть поставлена и другая задача: определить допустимый тепловой режим активного элемента, установленного на готовом радиаторе.

Суммарную поверхность охлаждения радиатора можно определить по формуле

$$S = \frac{0,86 Q}{\alpha (T - T_c)}, \quad (6.16)$$

где T – температура поверхности радиатора, К;

T_c – температура окружающей среды, К;

Q – мощность рассеяния тепла источником, Вт;

α – коэффициент теплообмена, состоящий из суммы коэффициентов теплообмена боковых α_{K1} и торцевых α_{K2} плоскостей ребер и теплообмена излучением $\alpha_{ЛЗ}$, $\alpha = \alpha_{K1} + \alpha_{K2} + \alpha_{ЛЗ}$.

Приведем порядок расчета теплообмена для нормального атмосферного давления.

Для боковых плоскостей ребер длиной D , установленных вертикально:

$$\alpha_{K1} = 6,36 \left(\frac{T - T_c}{D} \right)^{0,25}.$$

Для ребер, расположенных горизонтально и вершиной вверх:

$$\alpha'_{K1} = 8,61 \left(\frac{T - T_c}{H} \right)^{0,25}.$$

Для ребер, расположенных горизонтально и вершиной вниз:

$$\alpha''_{K1} = 4,70 \left(\frac{T - T_c}{H} \right)^{0,25}.$$

Для торцевых плоскостей ребер радиатора:

$$\alpha_{K2} = 0,6 \left(\frac{T - T_c}{\delta^5} \right)^{0,125}.$$

Коэффициент теплообмена при излучении:

$$\alpha_{ЛЗ} = 5,6 \cdot \varepsilon \cdot \frac{\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4}{T - T_c} \cdot \frac{b}{b + 2h},$$

где ε – степень черноты (см. таблицу 3.14);
 T – температура радиатора, К;
 T_c – температура окружающей среды, К;
 b – расстояние между стенками ребер, м;
 H – высота ребер, м.

Коэффициент теплообмена при внешнем давлении, отличающемся от нормального, будет иметь вид

$$\alpha_K^o = \alpha_K \sqrt{\frac{P}{P_0}}.$$

Приведенные формулы позволяют определить параметры радиатора или тепловой режим установленного на нем активного элемента с практически допустимой погрешностью 10...15 %.

Для естественного охлаждения размеры основания радиатора более 0,150 x 0,150 и высота ребер более 0,04 м становятся малоэффективными, и делать их большими нецелесообразно. Обребрение поверхности охлаждения становится необходимым лишь тогда, когда соблюдается условие

$$\frac{2\lambda}{\alpha\delta} > 5.$$

Пример 1

Требуется определить размеры радиатора ребристого типа, предназначенного для охлаждения транзистора мощностью 20 Вт. Максимальная допустимая температура нагрева его корпуса $T_K = 333$ К, максимальная температура окружающей среды $T_C = 313$ К. Покрытие поверхности радиатора глянцевое, лакокрасочное. Транзистор устанавливается на основании радиатора со стороны необребренной поверхности. Термическое сопротивление контактной плоскости установки транзистора принимаем равным 0,25 К/Вт.

Решение

1. Зададим геометрические размеры ребра $\delta \leq 0,003$ м, $b = 0,004$ м, $h = 0,02$ м, $D = 0,08$ м (см. рисунок 6.9).

2. Определим составляющие общего коэффициента теплообмена:

$$T = T_K - 0,25 \cdot 20 = 328 \text{ К},$$

$$\alpha_{K1} = 6,36 \left(\frac{15}{0,08} \right)^{0,25} = 23,5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$\alpha_{K2} = 0,6 \left(\frac{15}{0,003^5} \right)^{0,125} = 0,75 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$\alpha_{ЛЗ} = \frac{5,67 \cdot 0,9 \cdot \left[\left(\frac{328}{100} \right)^4 - \left(\frac{313}{100} \right)^4 \right]}{328 - 313} \cdot \frac{0,004}{0,004 + 2 \cdot 0,02} = 0,61 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Тогда общий коэффициент теплообмена

$$\alpha = 23,5 + 0,75 + 0,61 = 24,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

3. Площадь поверхности охлаждения радиатора определим из формулы (6.16):

$$S = \frac{0,86 \cdot 20}{24,9 \cdot 15} = 0,0461 \text{ м}^2.$$

4. Длина всех ребер радиатора:

$$H_S = \frac{S}{D} = \frac{0,0461}{0,08} = 0,576 \text{ м}.$$

Отсюда определим количество ребер:

$$n = \frac{H_S}{2 h + \delta + b} = \frac{0,576}{2 \cdot 0,02 + 0,003 + 0,004} = 12.$$

5. Ширина основания радиатора:

$$H = [n (\delta + b)] - b = [12 - (0,003 + 0,004)] - 0,004 = 0,08 \text{ м}.$$

Пример 2

Расчет пластинчатого радиатора.

Исходные данные:

- мощность, рассеиваемая транзистором в рабочем режиме P , Вт.....	1,42;
- температура окружающей среды T_{OC} , °C.....	+35;
- максимальная температура перехода $T_{П}$, °C.....	+125;
- тепловое сопротивление переход-корпус $R_{П-К}$, °C /Вт.....	3,3;
- контактное сопротивление корпус-теплопровод $R_{К-Т}$, °C /Вт.....	0,5;
- толщина пластины, м.....	$5 \cdot 10^{-3}$;
- высота пластины k , м.....	$25 \cdot 10^{-3}$.

Решение

1. Рассчитаем среднюю поверхностную температуру теплоотвода:

$$T_{CP} = 0,96 [T_{П} - P(R_{П-К} + R_{К-Т})] = 0,96 [125 - 1,42(3,3 + 0,5)] = 114,84^{\circ}\text{C}.$$

2. Определим перепад температур между средней поверхностной температурой теплоотвода и окружающей средой:

$$\Delta T = T_{CP} - T_{OC} = 114,84 - 35 = 79,84 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Рассчитываем вспомогательные коэффициенты:

$$t_M = 0,5 \cdot \Delta T = 0,5 \cdot 79,84 = 39,9 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$A_1 = 1,423 - 2,51 \cdot 10^{-3} \cdot t_M + 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot t_M^2 - 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot t_M^3 = \\ = 1,423 - 2,51 \cdot 10^{-3} \cdot 39,9 + 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 39,9^2 - 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot 39,9^3 = 1,253.$$

3. Определим коэффициент теплоотдачи конвекции для вертикально ориентированной пластины:

$$\alpha_K = A_1 \left(\frac{\Delta T}{h} \right)^{0,25} = 1,263 \left(\frac{19,84}{25 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,25} = 0,493 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{град)}.$$

4. Рассчитаем коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha_L = \varepsilon \cdot \varphi \cdot f (T_{CP}, T_{OC}),$$

где $\varepsilon = 0,05$ – степень черноты для алюминиевой пластины;

φ – значение коэффициента облученности для гладкой пластины ($\varphi = 1$);

$f(T_{CP}, T_{OC})$ – численное значение функции, зависящей от среднеповерхностной температуры теплоотвода и температуры окружающей среды, определяемое по формуле

$$f(T_{CP}, T_{OC}) = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(T + 273)^4 - (T_{OC} + 273)^4}{\Delta T}.$$

7 ЗАЩИТА ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

К основным динамическим характеристикам аппаратуры и ее элементов относят значения собственных (резонансных) частот, собственные формы колебаний, значения коэффициентов динамичности и коэффициентов демпфирования.

Значения собственных частот конструктивных элементов аппаратуры (элементов рамных конструкций, пластин и т.д.) определяются по формулам, известным из курса классической механики.

Значения частот собственных колебаний электрорадиоэлементов (ЭРЭ), приводимых к балочным моделям, можно определить аналитически или по

номограммам. Например, для резистора, модель которого представлена на рисунке 2.1, а, резонансная частота определяется выражением

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{192EJ}{ml^3}}, \quad (7.1)$$

где E – модуль упругости материала выводов;

$J = \frac{\pi d^4}{64}$ – момент инерции сечения вывода резистора (d – диаметр вывода резистора);

m – масса резистора;

l – длина вывода резистора.

Подобные расчеты удобнее производить по номограммам, разработанным для наиболее употребительных ЭРЭ (резисторов и конденсаторов).

Вид одной из таких номограмм представлен на рисунке 7.1. Зная тип резистора и длину его выводов, определяют значение собственной частоты.

Значение первой собственной частоты печатной платы, закрепленной по углам в четырех точках, можно определить, воспользовавшись выражением

$$f_0 = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{m''}}, \quad (7.2)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\gamma^2)}$ – цилиндрическая жесткость платы;

$m'' = \frac{m}{a \cdot b}$ – распределенная по площади масса платы и элементов,

размещенных на плате;

E – модуль упругости материала платы;

H – толщина платы;

m – масса платы с элементами (МС, ЭРЭ и т.д.);

a – длина платы;

b – ширина платы;

γ – коэффициент Пуассона для материала платы.

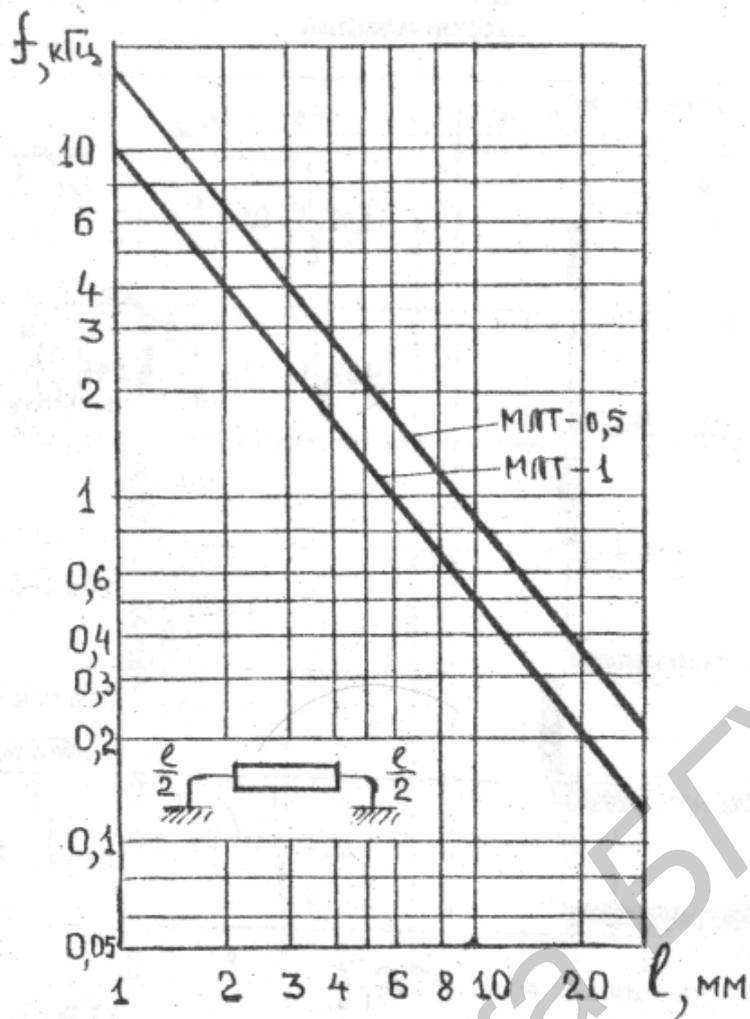


Рисунок 7.1

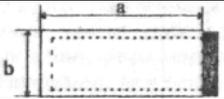
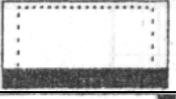
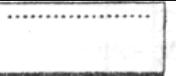
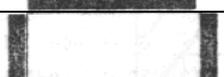
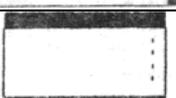
Более общее выражение для расчета значения собственных частот пластин имеет вид

$$f_0 = \frac{K_a}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{m''}}, \quad (7.3)$$

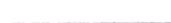
где K_a – коэффициент, зависящий от способа закрепления пластины (таблица 7.1).

Таблица 7.1 – Значения коэффициента K_a для различных способов закрепления сторон пластин

Вариант закрепления сторон пластины	K_a
-------------------------------------	-------

	$15,42\sqrt{1+0,95\left(\frac{a}{b}\right)^2+0,41\left(\frac{a}{b}\right)^4}$
	$9,87\sqrt{1+2,33\left(\frac{a}{b}\right)^2+2,44\left(\frac{a}{b}\right)^4}$
	15,42
	$15,42\left(\frac{a}{b}\right)^2$
	22,37
	$22,37\sqrt{0,1\left(\frac{a}{b}\right)^2+0,41\left(\frac{a}{b}\right)^4}$

Примечание. Обозначения штриховок:

-  – жесткое закрепление стороны пластины;
-  – сторона лежит на опоре;
-  – сторона пластины свободна.

В практике проектирования печатных плат РЭС иногда пользуются формулой несколько иного вида:

$$f_0 = k_m k_b B h \frac{10^4}{a^2}, \quad (7.4)$$

где k_m – коэффициент, зависящий от материала платы (для гетинакса – 0,5, для стеклотекстолита – 0,52);

$$k_b = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_{\text{э}}}{m_n}}} \text{ – коэффициент, зависящий от массы элементов } m_{\text{э}}, \text{ размещенных}$$

на поверхности платы, масса которой m_n ;

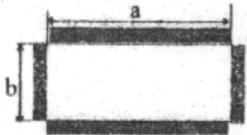
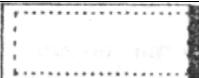
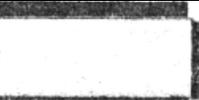
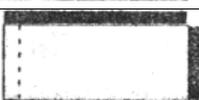
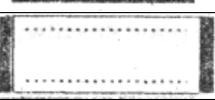
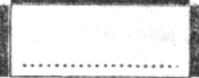
B – коэффициент, зависящий от соотношения длины сторон и способа закрепления платы, таблица 7.2;

h – толщина платы, см;

a – длина платы, см.

Таблица 7.2 – Значения коэффициента B

Варианты	a/b
----------	-------

закрепления сторон платы	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
	-	-	86	145	234	352	497	868
	40	41	56	84	124	176	240	864
	10	19	58	124	217	336	479	855
	33	44	76	139	230	349	494	866
	54	56	69	93	131	181	244	406
	54	58	76	115	175	254	353	607

Для блока, установленного на виброизоляторах, значение f_0 определяется из выражения

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}}, \quad (7.5)$$

где K_{Σ} – суммарная жесткость используемых виброизоляторов;

m – масса блока.

Пример 1

Блок РЭС массой 10 кг установлен на четырех равнонагруженных виброизоляторах, жесткость каждого из которых при осевом нагружении составляет 4 Н/мм. Определить значение частоты собственных колебаний блока в вертикальном направлении.

Решение

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}} = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{4 \cdot 4 \cdot 10^3}{10}} \approx 6,4 \text{ Гц.}$$

Собственные формы колебаний в соответствии с рисунком 7.2 представляют собой виброрельефы колебаний конструктивных элементов типа балок и плат на соответствующих резонансных частотах.

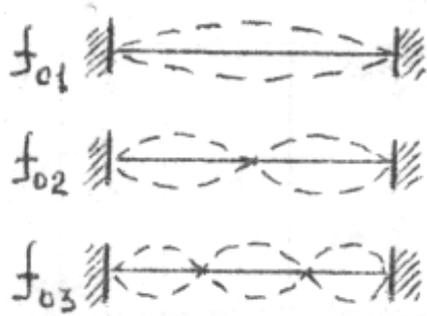


Рисунок 7.2 – Конструктивный элемент в виде балки и его три первые собственные формы колебаний

Важной динамической характеристикой плат и других конструктивных элементов аппаратуры является коэффициент динамичности, который представляет собой отношение амплитуды колебаний блока или центра печатной платы к амплитуде колебаний основания или точек закрепления платы:

$$\mu = \frac{A}{A_0}. \quad (7.6)$$

Вид зависимости значения μ конструктивного элемента от частоты воздействующей вибрации f представлен на рисунке 7.3.

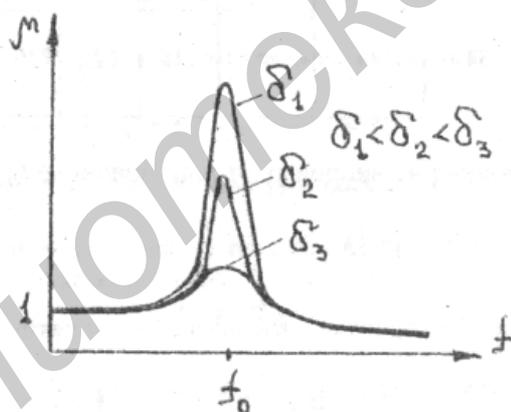


Рисунок 7.3 – Зависимость значения μ от частоты вибрации

Из приведенных кривых видно, что μ может принимать значение как больше, так и меньше единицы, т.е. конструктивный элемент или блок аппаратуры в зависимости от частоты возмущающей силы может как усиливать, так и ослаблять вибрацию.

График изменения μ в зависимости от частоты называют амплитудно-частотной характеристикой конструктивного элемента. Эта кривая в дальнейшем будет использована для обоснования и оценки эффективности различных способов виброзащиты.

Коэффициент динамичности для любого значения текущей частоты f может быть определен по формуле

$$\mu = \frac{A}{A_0} = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \alpha^2}{(1 - \alpha^2)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \alpha^2}}, \quad (7.7)$$

где δ – логарифмический декремент затухания колебаний;

$\alpha = \frac{f}{f_0}$ – коэффициент расстройки по частоте.

Здесь f_0 – значение собственной частоты.

Пример 2

Определить амплитуду колебаний центра печатной платы на частоте $f = 100$ Гц, если амплитуда точек закрепления платы $A_0 = 1$ мм, значение ее собственной частоты $f_0 = 200$ Гц, а значение логарифмического декремента затухания колебаний платы $\delta = 0,1$.

Решение

1. Определим значение коэффициента расстройки по частоте:

$$\alpha = \frac{f}{f_0} = \frac{100}{200} = 0,5.$$

$$2. A = A_0 \cdot \mu = A_0 \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \alpha^2}{(1 - \alpha^2)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \alpha^2}} \approx 1 \text{ мм.}$$

Из полученного результата следует, что при таком соотношении частот ($f = 100$ Гц и $f_0 = 200$ Гц) плата практически не усиливает воздействующую вибрацию ($\mu \approx 1$).

Эффективность экрана S , оцениваемая в децибелах как относительное ослабление поля действием экрана, может быть рассчитана по формуле

$$S = S_0 + S_{\text{п}},$$

где S_0 – потери на отражение, дБ;

$S_{\text{п}}$ – потери на поглощение, дБ.

Величиной вторичного отражения поля от внутренней границы «экран – среда за экраном» пренебрегают вследствие ее малости.

В зависимости от того, что действует на экран: электрическое поле (E), магнитное (H) или плоская волна (P), различают три вида потерь на отражение: $S_{\text{оэ}}$, $S_{\text{ом}}$, $S_{\text{оп}}$.

Отражение от экрана обусловлено различием тепловых сопротивлений среды, где распространяется поле, и экрана, подобно тому, как это происходит в линии, нагрузка которой не равна ее волновому сопротивлению. Когда это различие велико, потери на отражение значительны.

На низких частотах возможно хорошее экранирование электрического поля благодаря большим потерям на отражение $S_{\text{оэ}}$, тогда как потери на поглощение пренебрежимо малы. На высоких частотах для электрического поля характерна обратная картина: малые потери на отражение, но большие потери на поглощение. В экране недопустимы щели и отверстия, иначе проникающая внутрь энергия вызовет возбуждение токов утечки на внутренней стороне экрана.

При одинаковой толщине магнитные материалы (сталь и др.) на низкой частоте имеют потери на поглощение большие, чем магнитные (медь). Для этого случая экран должен быть изготовлен из относительно толстого материала с высокой магнитной проницаемостью.

С повышением частоты эффективность экранирования от внешнего источника возрастает.

Для электромагнитного экранирования используются тонколистовые и фольгированные материалы (таблица 8.1).

При оценке экранирования функциональных узлов в проектируемом устройстве выделяются узлы, наиболее ответственные с точки зрения электромагнитной совместимости, и определяется подавление помех, при котором будет обеспечено функционирование устройства. Выделяются также основные источники помех.

В качестве примера рассмотрим расчет электромагнитной защиты генератора радиочастоты (РЧ). Источником внутренних электромагнитных помех является сетевой трансформатор. Плата генератора РЧ заключена в алюминиевый экран.

Исходные данные для расчета:

- рабочая частота генератора f , Гц..... ~ $49 \cdot 10^6$;

- частота помехи $f_{п}$, Гц.....50.

Таблица 8.1 – Параметры радиоматериалов

Материал	Удельная проводимость σ , См/м 10^{-7}	Относительная магнитная проницаемость μ_r
Алюминий	3,54	1
Латунь	1,25	1
Медь	5,8	1
Серебро	6,2	1
Железо	1,0	1 100...22 000
Никель	1,38	12...80
Сталь	0,66	150
Пермаллой	0,42	80...8 000

Для нормальной работы генератора РЧ подавление помехи должно составлять не менее 100 дБ. Эффективность экрана можно представить суммой двух слагаемых:

$$S_{\text{э}} = S_0 + S_n,$$

где S_0 – потери электромагнитной волны на отражение, дБ;

S_n – потери электромагнитной волны на поглощение, дБ.

Величиной вторичного отражения поля от внутренней границы «экран–среда за экраном» пренебрегают вследствие ее малости. Выбор материала и толщины экрана производится по известной величине необходимого ослабления электромагнитного поля при заданной его частоте. Как известно, для эффективности экранирования электромагнитных полей в области низких частот применяют магнитные материалы с высокой магнитной проницаемостью: железо, пермаллой. Однако ввиду того, что удельный вес этих материалов достаточно большой по сравнению с такими металлами, как алюминий, медь, латунь, применение их в малогабаритной переносимой РЭА нежелательно. Учитывая сказанное, в данной конструкции в качестве экранирующих материалов применен алюминий, что благоприятно сказалось на массогабаритной характеристике изделия. Проведем расчет эффективности экранов для указанных выше частот.

Ослабление $S_{0\text{э}}$ электрического поля отражением определяется из уравнения

$$S_{0\text{э}} = 350 + 10 \lg \frac{640 G_{\text{э}}}{f_n^3 \cdot \mu \cdot r^2} \text{ дБ}, \quad (8.1)$$

где $G_{\text{э}}$ – относительная электропроводимость материала экрана;

f_n – частота поля помехи, Гц;

r – расстояние между источником наводки и экраном, мм.

Определим эффективность ослабления магнитного поля:

$$S_{ом} = 201 g \left[\frac{12}{r} \left(\frac{\mu}{f_n G_э} \right)^{0,5} + 0,5 \cdot 10^{-2} r \left(\frac{\mu}{f_n G_э} \right)^{-0,5} + 0,35 \right]. \quad (8.2)$$

Потери на поглощение энергии поля помехи в материале экрана определяются по формуле

$$S_n = 0,13 d \sqrt{\mu \cdot f_n \cdot G_э}, \text{ дБ}, \quad (8.3)$$

где d – толщина материала, равная 1 мм.

9 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТНЫХ ПРОВОДНИКОВ

В радиоэлектронных изделиях печатные проводники, электрически соединяющие элементы схемы, проходят на близком расстоянии друг от друга и имеют относительно малые размеры сечения. При большом времени переключения и малых тактовых частотах параметры проводников не оказывают существенного значения на быстродействие схемы и помехоустойчивость элементов. С увеличением быстродействия схем, что особенно актуально для современной РЭА в связи с широким использованием интегральных схем, все большее значение приобретают вопросы высокочастотных связей между элементами. В этом случае становится обязательным определение той или иной линии связи (сопротивления, емкости, индуктивности), а также степени влияния друг на друга.

Электрические параметры элементов печатной схемы зависят от разных факторов: режима работы схемы, применяемых материалов, технологии изготовления и т.д. Комплексный учет всех этих факторов сложен, поэтому расчет параметров платы носит ориентировочный характер и может быть разной степени сложности.

9.1 Постоянный ток в печатных проводниках

Постоянный ток в печатном проводнике распределяется равномерно по его сечению при условии, что материал проводника однороден и не имеет локальных посторонних включений иных веществ. Сопротивление проводника шириной b (мм) и толщиной t_n (мкм):

$$R = \frac{\rho \cdot l_n}{b \cdot t_n}, \quad (9.1)$$

где ρ – удельное объемное сопротивление проводника, мкОм/м;

l_n – длина проводника, мкОм/м.

Величина ρ для проводников, изготовленных различными методами, неодинакова. Так, для медных проводников, полученных электрохимическим методом, $\rho = 0,02 \dots 0,03$ мкОм/м, а для медных проводников, полученных методом химического травления, $\rho = 0,075$ мкОм/м. Исходя из требований допустимого перегрева печатных проводников (80 °С), экспериментально для них установлена плотность тока – $\gamma_{\text{дон}}$. Она составляет 20 А/мм² – для проводников, полученных электрохимическим методом, и около 30 А/мм² – для проводников, полученных методом химического травления.

Исходя из этого допустимый ток в печатных проводниках

$$I_{\text{max}} = 10^{-3} \gamma_{\text{дон}} b t_n.$$

Для стабильной работы печатных проводников необходимо, чтобы

$$b \geq \frac{10^3 I}{\gamma_{\text{дон}} \cdot t_n}, \quad (9.2)$$

где I – ток, протекающий в проводнике.

Расчет на допустимую плотность тока следует проводить для узких проводников ($b < 1$ мм), в которых ток превышает 2 А. Для цепей, в которых токи не превышают 2 А, расчет на допустимую плотность тока при ширине проводников $b \geq 1$ мм и толщине $t_n \geq 50$ мкм можно не проводить.

Падение напряжения на печатных проводниках:

$$\Delta U = \rho \left[\frac{l_n}{b \cdot t_n} \right] = 10^{-3} \rho \cdot \nu \cdot l_n. \quad (9.3)$$

Для приближенных расчетов можно принять, что на каждом сантиметре длины медных проводников, полученных электрохимическим методом, при их ширине 1 мм и толщине 50 мкм теряется до 6 мВ, для тех же проводников, полученных методом химического травления, это значение доходит до 4 мВ (при условии, что $\nu = 20$ А/мм²).

9.2 Переменный ток в печатных проводниках

В противоположность постоянному току распределение переменного тока в печатных проводниках происходит неравномерно. Это обусловлено наличием поверхностного эффекта, возникающего при протекании по проводнику высокочастотного переменного тока. При этом внутри проводника образуется магнитное поле, приводящее к возникновению индукционного тока, взаимодействующего с основным. Вследствие этого происходит перераспределение тока по сечению проводника, и в результате его пайность в периферийных областях сечения проводника растет, ближе к центру уменьшается. На очень больших

частотах ток во внутренних слоях проводника практически равен нулю в соответствии с рисунком 9.1.

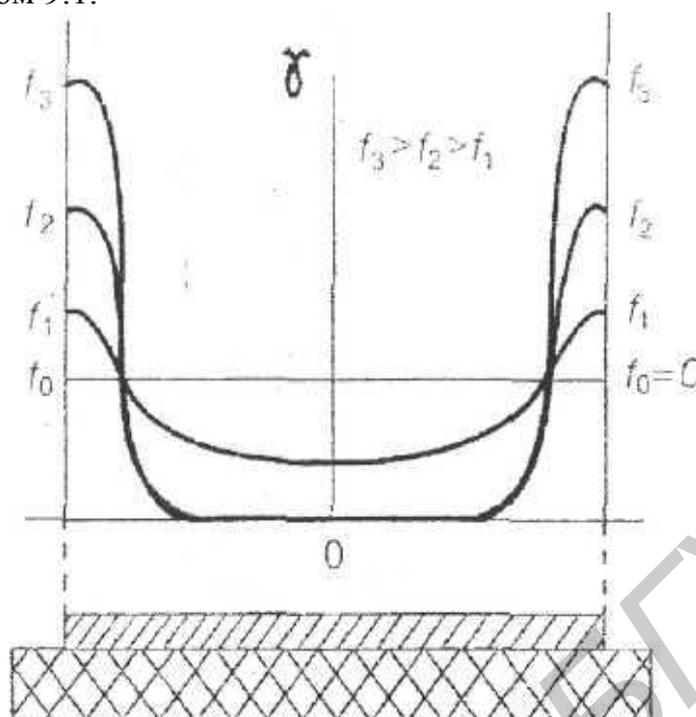


Рисунок 9.1

Явление поверхностного эффекта может быть количественно охарактеризовано эффективной глубиной проникновения тока, которая для немагнитных проводников определяется по формуле

$$d_{\text{эф}} = 0,5 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = \frac{\psi}{\sqrt{f}}, \quad (9.4)$$

где f – частота, МГц;

$\psi = 0,5 \sqrt{\rho}$ – коэффициент, зависящий от свойств токопроводящего материала и покрытия (значения коэффициента ψ для различных материалов приведены в таблице 9.1).

Таблица 9.1 – Значения коэффициента ψ для различных материалов

Материал	ψ	$\Theta \cdot 10^{-3}$
----------	--------	------------------------

Серебро	0,064	2,54
Медь	0,066	2,65
Золото	0,077	3,08
Алюминий	0,084	3,34

При определении сопротивления печатного проводника переменному току часто пользуются понятием удельного поверхностного сопротивления (сопротивление квадратной площадки проводника со стороной 1 см). Удельное поверхностное сопротивление:

$$\rho_S = \Theta \sqrt{t},$$

где $\Theta = 20 \sqrt{\rho}$ – коэффициент, значения которого представлены в таблице 9.1.

На основании вышеизложенного сопротивление печатного проводника на высоких частотах

$$R_f = \frac{10^3 \rho_{Sn} l}{b \cdot t_n}. \quad (9.5)$$

Сопротивление наиболее распространенных в печатных платах плоских медных проводников на высоких частотах:

$$R_{fb} = \frac{0,013 \xi \sqrt{f} \cdot l_n}{b \cdot t_n}, \quad (9.6)$$

где ξ – коэффициент концентрации тока на углах сечения проводника (зависимость ξ от отношения ширины плоского проводника к толщине $\frac{b}{t_n}$ показана на рисунке 9.2).

Если медный проводник покрыт слоем какого-либо другого металла, то в числитель формулы (9.6) следует ввести поправочный коэффициент

$$\beta = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_M}},$$

где ρ – удельное (объемное) сопротивление материала покрытия;
 ρ_M – удельное сопротивление меди.

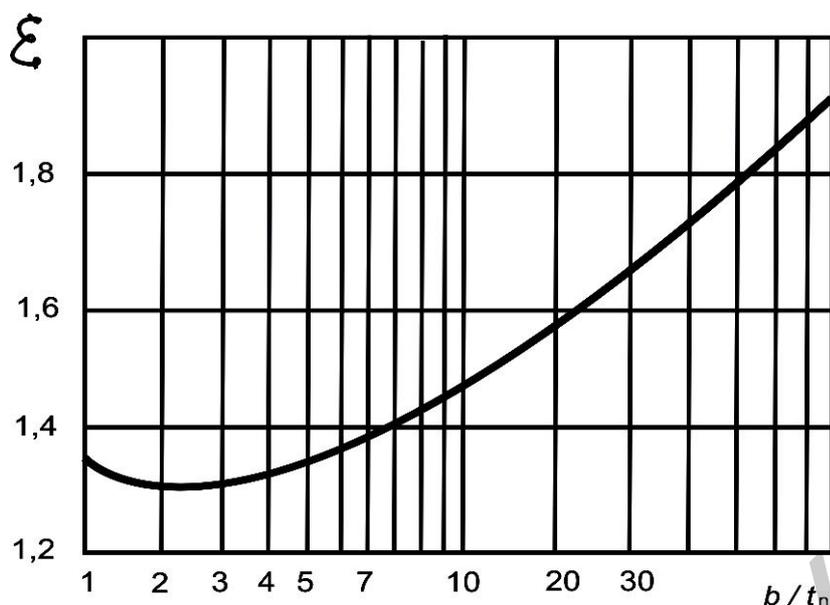


Рисунок 9.2

9.3 Емкость и индуктивность между печатными проводниками

Емкость между печатными проводниками служит источником помех, оказывающих существенное влияние на работу аппаратуры. В данной методике указаны формулы для расчета собственной емкости и индуктивности между двумя близко расположенными печатными проводниками. На рисунке 9.3 представлены некоторые часто встречающиеся конфигурации печатных проводников, связи и различные варианты их взаимного расположения.

Емкость (пФ) между двумя параллельными печатными проводниками одинаковой ширины b (мм), расположенными на одной стороне платы (рисунок 9.3, а):

$$C = \frac{0,12 \varepsilon_r l_n}{\lg \left[\frac{2a}{b + t_n} \right]}, \quad (9.7)$$

где l_n – длина участка, на котором проводники параллельны друг другу, мм;

ε_r – диэлектрическая проницаемость среды.

Емкость (пФ) между двумя параллельными проводниками шириной b (мм), расположенными по обе стороны печатной платы с толщиной диэлектрика a (мм) (рисунок 9.3, б),

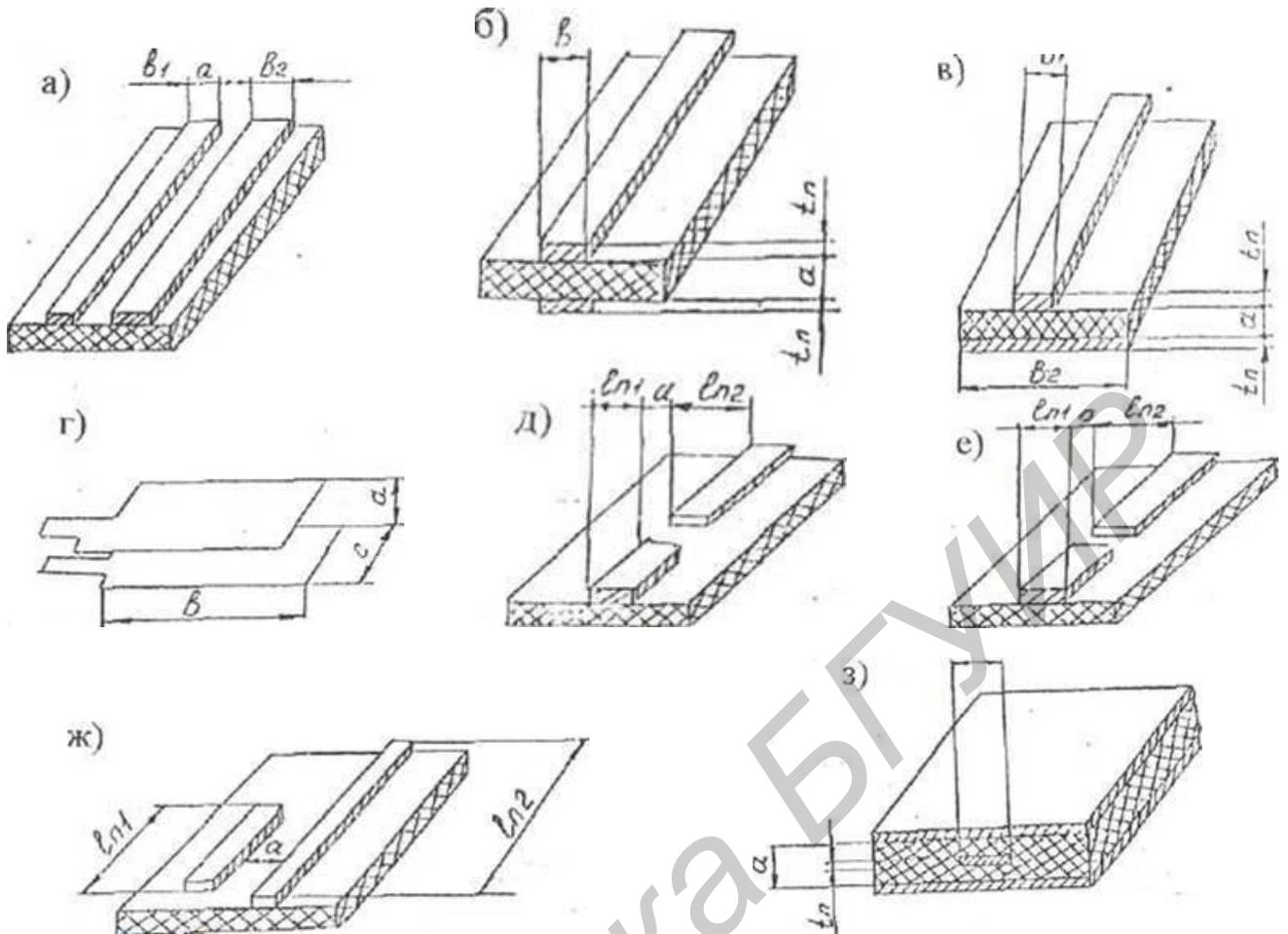


Рисунок 9.3

$$C = 0,008842 \varepsilon_r l_n \frac{b}{a} \left[1 + \frac{a}{\pi b} \left(1 + \lg \frac{2\pi b}{a} \right) \right]. \quad (9.8)$$

Емкость (пФ) проводника печатной платы, у которой на обратной стороне имеется заземленная пластина (рис. 9.3, в):

$$C = 0,008842 \varepsilon_r l_n \frac{b}{a} \left[1 + \frac{2a}{\pi b} \left(1 + \lg \frac{\pi b}{a} \right) \right]. \quad (9.9)$$

Выражения (9.7) – (9.9) позволяют произвести оценку емкости (пФ) печатных проводников с точностью $\pm (20 \dots 30) \%$. Для более точных расчетов следует пользоваться общей формулой:

$$C = \varepsilon l_n k,$$

где ε – действующая диэлектрическая проницаемость, равная $0,5 (1 + \varepsilon_r)$ для случая на рисунке 9.3, а и равная ε_r для случаев на рисунке 9.3, б, в;

k – поправочный коэффициент, значение которого определяется по графикам, изображенным на рисунке 9.4.

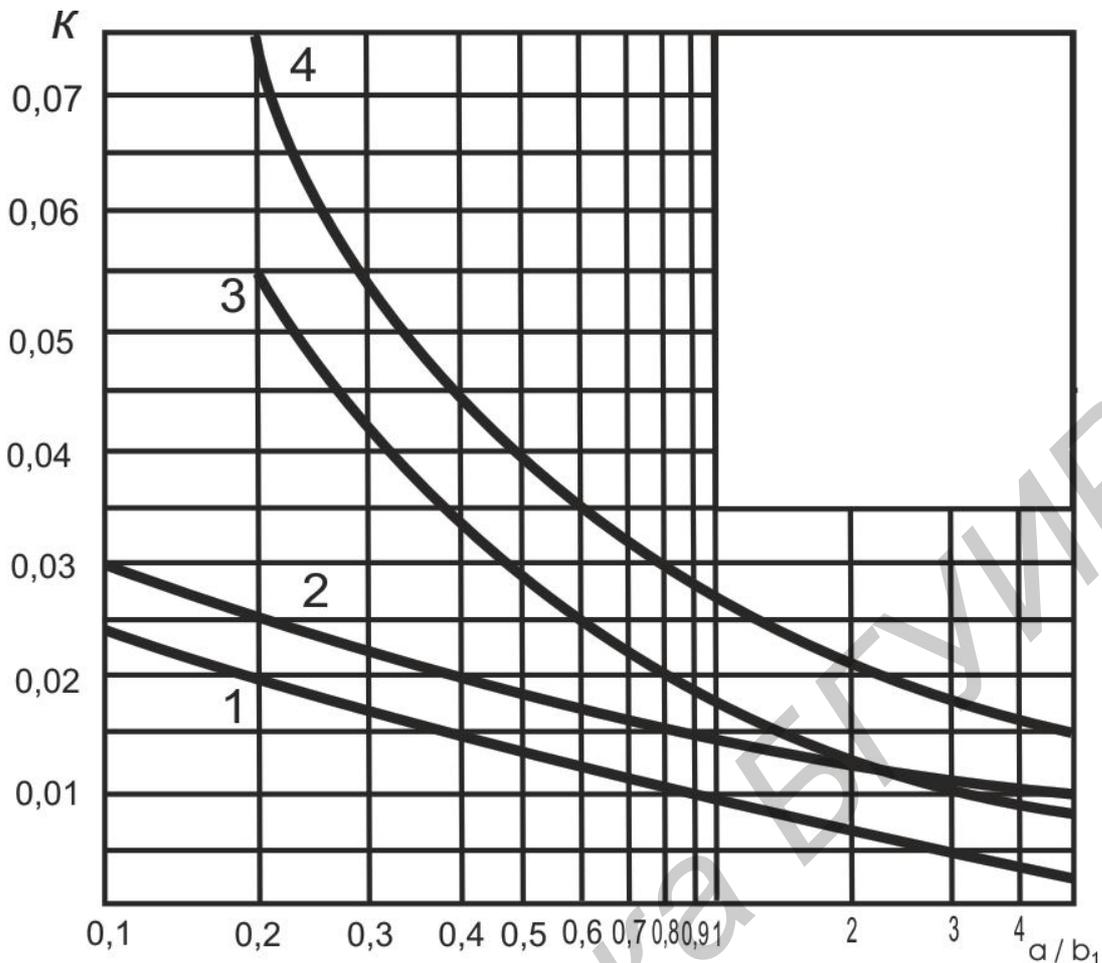


Рисунок 9.4

В соответствии с рисунком 9.3, ϵ емкость (пФ) печатного конденсатора, электроды которого расположены по обе стороны печатной платы, при условии, что толщина платы много меньше линейных размеров обкладок конденсатора:

$$C = \frac{8,5 \cdot 10^{-3} b c \epsilon_r}{a},$$

где b , c , a , см. рисунок 9.3, ϵ .

С учетом клеевого слоя емкость:

$$C = \frac{8,5 \cdot 10^{-3} b c \epsilon_r}{a / \epsilon_r + a_k / \epsilon_k},$$

где a_k и ϵ_k – соответственно толщина и диэлектрическая проницаемость клеевого слоя.

Иногда по заданной емкости, толщине и диэлектрической проницаемости печатной платы требуется определить площадь обкладок конденсатора.

Собственная индуктивность (мкГн) печатного проводника шириной b (мм), толщиной t_n (мм) и длиной l_n (мм)

$$L = 0,0002 l_n \left(\lg \frac{2 l_n}{t_n + b} + 0,2235 \frac{t_n + b}{l_n} + 0,5 \right). \quad (9.10)$$

Индуктивность двух параллельных печатных проводников шириной b (мм), расположенных с одной стороны печатной платы с зазором a (мм) (см. рисунок 9.3, *a*), с противоположным направлением тока в них:

$$L = 0,004 l_n \left(\ln \frac{a+b}{t_n+b} - \frac{a-b}{l_n} + 0,2235 \frac{t_n+b}{l_n} + 1,5 \right).$$

Если размеры сечений проводников различны, то индуктивность такой пары

$$L = L_1 + L_2 - 2M,$$

где L_1, L_2 – собственная индуктивность (мкГн) соответственно первого и второго печатных проводников шириной b_1 и b_2 , определяемая по формуле (9.10);

M – взаимная индуктивность (мкГн) проводников, определяемая при условии $l_n \gg 10 (b_1 + b_2 + b_3)$:

$$M = 0,002 l_n \left(\ln \frac{2l_n}{a + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2}} + \frac{a + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2}}{l_n} \right).$$

Взаимная индуктивность двух печатных проводников, расположенных по прямой на одной стороне печатной платы с малым зазором между их совпадающими концами (рисунок 9.3, *д*):

$$M = 0,023 \left(l_{n1} \lg \frac{l_n + l_{n2}}{l_{n1}} + \frac{l_{n1} + l_{n2}}{l_{n2}} \right) \cdot 10^{-3}.$$

Если же концы проводников разнесены на значительное расстояние, то взаимная индуктивность (мкГн) в соответствии с рисунком 9.3, *e*:

$$M = 0,023 [(l_{n1} + l_{n2} + a) \lg(l_{n1} + l_{n2} + a) + a \lg a - (l_{n1} + a) \lg(l_{n1} + a) - (l_{n2} + a) \lg(l_{n2} + a)] \cdot 10^{-3}.$$

Проводники различной длины, расположенные параллельно по одну сторону печатной платы (см. рисунок 9.3, *ж*), обладают взаимной индуктивностью, определяемой по формуле

$$M = 0,002 [4,6 l_{n1} \lg \left(\frac{l_{n1} + l_{n2} + \sqrt{(l_{n1} + l_{n2})^2 + a^2}}{a} \right) +$$

$$+2,3(l_{n1} + l_{n2}) \lg \left(\frac{l_{n1} + l_{n2} + \sqrt{(l_{n1} + l_{n2})^2 + a^2}}{l_{n2} + l_{n1} + \sqrt{(l_{n2} + l_{n1})^2 + a^2}} \right) +$$

$$+ \sqrt{(l_{n1} - l_{n2})^2 + a^2} - \sqrt{(l_{n1} + l_{n2})^2 + a^2}].$$

Печатные проводники характеризуются волновым сопротивлением. Короткие связи (до 80 мм) выполняются чаще всего в виде одиночных печатных проводников (см. рисунок 9.3, а), более длинные связи – в виде несимметричных и симметричных полосковых линий (см. рисунок 9.3, в, з).

Расчет волновых сопротивлений (Ом) печатных линий для симметричной и несимметричной полосковых линий можно производить соответственно по следующим приближенным формулам:

$$z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{2,55a}{l},$$

$$z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{1,75a}{b}.$$

Эти выражения с достаточной степенью точности позволяют определять значение волнового сопротивления при $t_n \ll b$, $t_n \ll a$, $b > a$. Во всех других случаях для определения волновых сопротивлений печатных проводников связи следует пользоваться номограммами и графиками, приведенными в справочной литературе по волновой технике.

Часто при конструировании печатной платы необходимо решить обратную задачу: по заданному волновому сопротивлению печатной линии связи требуется найти ее геометрию. Для симметричной полосковой линии это задача может быть решена с помощью графика, приведенного на рисунке 9.5,

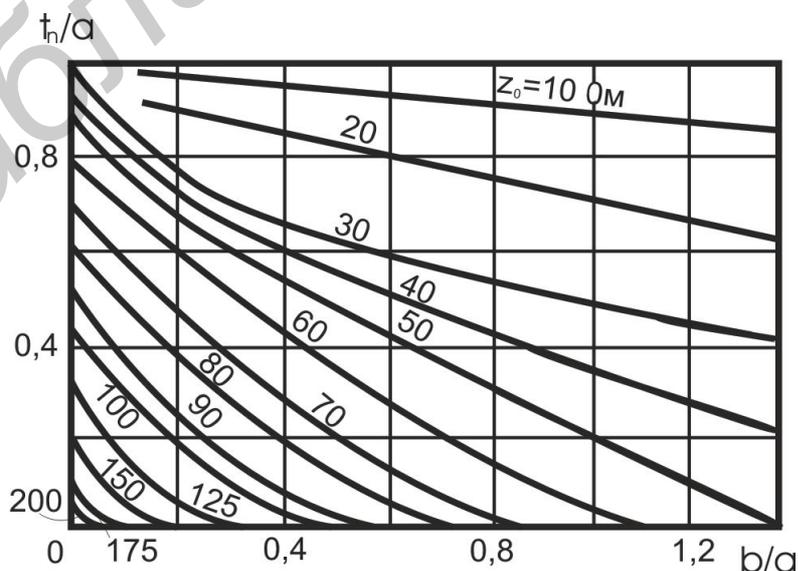


Рисунок 9.5

где H_m – толщина материала основания печатной платы;

h_{ϕ} – толщина фольги; h_n – толщина химико-гальванического покрытия;

H_n – толщина печатной платы; H_{nc} – суммарная толщина печатной платы;

b – гарантийный пояс; D – диаметр контактной площадки;

d – диаметр отверстия; t – ширина печатного проводника;

Q – расстояние от края печатной платы до элемента рисунка;

l – расстояние между центрами (осями) элементов конструкции платы;

S – расстояние между соседними элементами рисунка

9.4 Конструкторско-технологический расчет печатных плат

При расчете элементов печатного монтажа следует учитывать технологические особенности производства, допуски на всевозможные отклонения значений параметров элементов печатного монтажа, установочные характеристики корпусов элементов и ИС, требования по организации связей, вытекающих из схемы функционального узла, а также перспективности выбранной технологической базы.

Исходные данные для расчета элементов печатных плат следующие:

- шаг основной координатной сетки, устанавливаемый ГОСТ 10317–79, равный 2,5 мм;
- допуски отклонения размеров и координат элементов печатной платы от номинальных значений, зависящие от уровня технологии, материалов и оборудования;
- установочные характеристики навесных ЭРЭ.

Буквенные обозначения размеров конструкции платы даны на рисунке 9.6

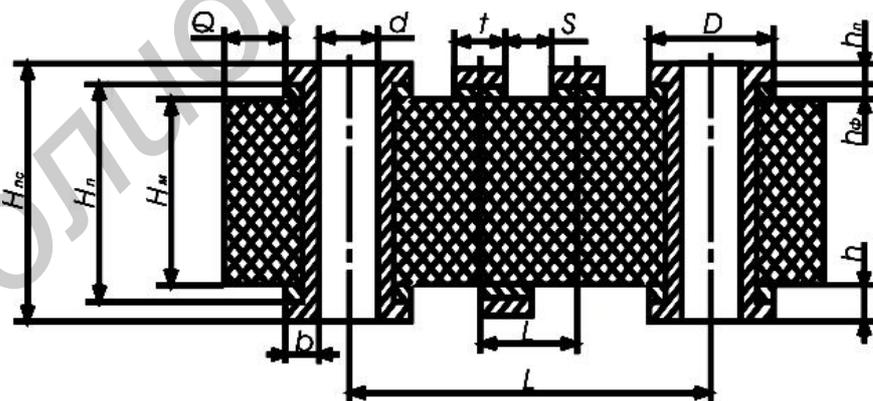


Рисунок 9.6

Расчет элементов печатной платы проводится в следующей последовательности:

- 1) определяется номинальное значение диаметров монтажных отверстий d :

$$d = d_{\text{бвл}} + (0,1 \dots 0,4) \text{ мм}$$

и приводится к предпочтительному ряду: 0,7; 1,1; 1,3; 1,5 мм;

2) наименьший номинальный диаметр контактной площадки рассчитывается по формуле

$$D = (d + \Delta d_{\text{в.о}} + 2b + \Delta t_{\text{в.о}} + 2\Delta d_{\text{мп}} + (T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{н.о}}^2)^{\frac{1}{2}},$$

где $\Delta d_{\text{в.о}}$ – верхнее предельное отклонение диаметра отверстия – 0,05 мм;

$\Delta t_{\text{в.о}}$ – верхнее предельное отклонение диаметра контактной площадки – 0,15 мм;

$\Delta d_{\text{мп}}$ – значение подтравливания диэлектрика в отверстии равно 0,03 мм для МПП, для ОПП, ДПП и ГПК – нулю;

T_d – значение позиционного допуска расположения центра отверстия относительно узла координатной сетки – 0,15 мм;

T_D – значение позиционного допуска расположения контактной площадки относительно номинального положения – 0,25 мм;

$\Delta t_{\text{н.о}}$ – нижнее предельное отклонение диаметра контактной площадки – 0,1 мм;

3) наименьшее номинальное расстояние l для прокладки n -го количества проводников рассчитывается по формуле

$$l = \frac{D_1 + D_2}{2} + tn + S(n+1) + T_1,$$

где D_1, D_2 – диаметры контактных площадок;

n – количество проводников (рисунок 9.7);

T_1 – значение допуска печатного проводника (таблица 9.1);

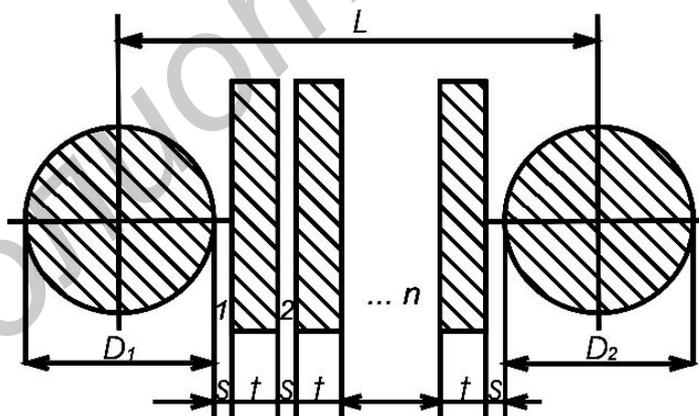


Рисунок 9.7

Таблица 9.2 – Допуски расположения печатных проводников

Вид изделия	Значение допуска расположения печатного проводника для класса точности T_1 , мм				
	1	2	3	4	5
ОП, ДПП, МПП	0,20	0,10	0,005	0,03	0,02

4) толщина МПП рассчитывается по формуле

$$H_n = \Sigma H_c + (0,6 \dots 0,9) \Sigma H_{np},$$

где H_c – толщина слоя МПП;

H_{np} – толщина прокладки (по стеклоткани).

10 ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ

10.1 Структура и объем пояснительной записки

Курсовой проект состоит из двух частей: пояснительной записки (ПЗ), конструкторских документов (чертежи и иллюстративный материал в виде графиков, схем, таблиц). Курсовая работа оформляется, как правило, в виде пояснительной записки с расчетной частью и должна сопровождаться графическим материалом.

Общими требованиями к пояснительной записке проекта являются: четкость и логическая последовательность изложения материала, убедительность аргументации, краткость и ясность формулировок, исключающих неоднозначность толкования, конкретность изложения результатов, доказательств и выводов. Пояснительная записка к курсовому проекту должна в краткой и четкой форме раскрывать творческий замысел проекта, содержать методы исследования, принятые методы расчета и сами расчеты и сопровождаться иллюстрациями: графиками, эскизами, диаграммами, схемами и т.п. В тех случаях, когда в проектах содержатся сложные математические расчеты, для их проведения, как правило, применяется электронно-вычислительная техника.

Пояснительная записка к курсовому проекту должна включать:

- титульный лист;
- задание;
- содержание;
- перечень условных обозначений, символов и терминов (если в этом есть необходимость);
- введение;
- разделы, представляющие собой обзор литературных источников по теме, используемые методы и (или) методики, собственные теоретические и экспериментальные исследования, результаты расчетов и другие материалы, определенные заданием;

Объем пояснительной записки не должен превышать 60...80 страниц рукописного текста.

10.2 Требования к оформлению пояснительной записки

Пояснительная записка должна быть выполнена на одной стороне листа белой бумаги формата А4 одним из следующих способов:

- рукописным – четким почерком, чернилами (пастой) одного цвета с высотой букв и цифр не менее 2,5 мм;

- машинописным, при соблюдении ГОСТ 13.1.002–80. Шрифт пишущей машинки должен быть четким, высотой не менее 2,5 мм, лента только черного цвета (полужирная), отдельные слова и формулы вписываются в текст черными чернилами (пастой, тушью) буквами греческого или латинского алфавита с соблюдением правил грамматики и орфографии;

- с применением печатающих и графических устройств вывода ЭВМ (ГОСТ 2.004–88 ЕСКД). Высота букв и цифр должна быть не менее 1,8 мм.

Текст ПЗ следует размещать на листе, соблюдая следующие размеры полей: левое – не менее 30 мм, правое – не менее 10 мм, верхнее – не менее 15 мм, нижнее – не менее 20 мм.

Текст ПЗ можно излагать на русском или белорусском языке. Сокращения русских и белорусских слов и словосочетаний в записке – по СТБ 7.12–94. В тексте ПЗ, за исключением формул, таблиц и рисунков, не допускается:

- применять математический знак «–» перед отрицательными значениями величин (следует писать слово «минус»);

- применять знак « \emptyset » для обозначения диаметра (следует писать слово «диаметр»). Однако при указании размера или предельных отклонений диаметра на чертежах, помещенных в тексте документа, перед размерным числом знак « \emptyset » необходимо использовать;

- применять без числовых значений математические знаки, например, $>$ (больше), $<$ (меньше), $=$ (равно), \geq (больше или равно), \leq (меньше или равно), \neq (не равно), а также знаки № (номер), % (процент).

В ПЗ следует применять стандартные единицы физических величин, их наименования и обозначения в соответствии с ГОСТ 8.417–81. Наряду с единицами СИ при необходимости в скобках указывают единицы ранее используемых систем, разрешенных к применению. Применение в ПЗ разных систем обозначения физических величин не допускается.

В тексте числовые значения величин с обозначением единиц физических величин и единиц счета следует писать цифрами, а числа без обозначения единиц физических величин и единиц счета от единицы до девяти – словами.

Дробные числа необходимо приводить в виде десятичных дробей, за исключением размеров в дюймах, которые следует записывать $1/4''$, $1/2''$ (но не $\frac{1''}{4}$, $\frac{1''}{2}$). При невозможности выразить числовое значение в виде десятичной

дроби допускается записывать его в виде простой дроби в одну строчку через косую черту, например, $5/32$; $(50 A - 4 C)/(40 B + 20)$.

Иллюстрации, таблицы и распечатки ЭВМ, включенные в ПЗ (по тексту или в приложении), должны соответствовать формату А4. Допускается представлять иллюстрации, таблицы и распечатки с ЭВМ на листах формата А3.

Абзацы в тексте начинают отступом, равным пяти ударам пишущей машинки или 15–17 мм.

Текст ПЗ делится на разделы, подразделы и пункты. Пункты при необходимости могут делиться на подпункты.

Разделы должны, а подразделы могут иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют. Заголовки следует писать с абзацного отступа с прописной буквы без точки в конце, не подчеркивая. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой. Перенос слов в заголовках не допускается.

Расстояние между заголовками и текстом при выполнении документа машинописным способом должно быть равно 3 или 4 интервалам, при выполнении рукописным способом – 15 мм. Расстояние между заголовками раздела и подраздела – 2 интервала, при выполнении рукописным способом – 8 мм. Каждый раздел текстового документа рекомендуется начинать с новой страницы.

Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всей записки, обозначенные арабскими цифрами без точки и записанные с абзацного отступа. Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела точка не ставится. Разделы, как и подразделы, могут состоять из одного или нескольких пунктов. Если раздел или подраздел имеют только один пункт или пункт имеет один подпункт, то нумеровать их не следует.

Допускается нумеровать иллюстрации в пределах раздела. В этом случае номер иллюстрации состоит из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой. Например – Рисунок 1.1.

При ссылках на иллюстрации следует писать «... в соответствии с рисунком 2» при сквозной нумерации и «...в соответствии с рисунком 1.2» при нумерации в пределах раздела.

Иллюстрации при необходимости могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст). Слово «Рисунок» и наименование помещают после пояснительных данных и располагают следующим образом: Рисунок – Детали прибора.

Иллюстрация, как правило, выполняется на одной странице. Если рисунок не умещается на одной странице, допускается переносить его на другие страницы. При этом тематическое наименование помещают на первой странице, поясняющие данные – на каждой странице и под рисунком пишут «Рисунок ..., лист ...», если имеется несколько рисунков, и «Рисунок 1, лист ...», если имеется один рисунок.

Если ПЗ не имеет подразделов, то нумерация пунктов в нем должна быть в пределах каждого раздела и номер пункта должен состоять из номеров раздела и пункта, разделенных точкой. В конце номера пункта точка не ставится. Если записка имеет подразделы, то нумерация пунктов должна быть в пределах подраздела и номер пункта должен состоять из номеров раздела, подраздела и пункта, разделенных точками.

Если текст ПЗ подразделяется только на пункты, они нумеруются порядковыми номерами в пределах документа. Пункты, при необходимости, могут быть разбиты на подпункты, которые должны иметь порядковую нумерацию в пределах каждого пункта. Внутри пунктов или подпунктов могут быть приведены перечисления.

Перед каждой позицией перечисления следует ставить дефис или при необходимости ссылки в тексте документа на одно из перечислений – строчную букву, после которой ставится скобка. Для дальнейшей детализации перечислений необходимо использовать арабские цифры, после которых ставится скобка, а запись производится с абзацного отступа, как показано в примере.

Пример

- a) _____
- б) _____
 - 1) _____
 - 2) _____
- в) _____

Страницы нумеруются арабскими цифрами в правом верхнем углу, начиная с титульного листа, с соблюдением сквозной нумерации по всему тексту записки. Номера страниц на титульном листе и задании не ставятся. Иллюстрации и таблицы, расположенные на отдельных листах, и распечатки с ЭВМ включаются в общую нумерацию страниц записки. Иллюстрации, таблицы и распечатки с ЭВМ на листе формата А3 учитываются как одна страница.

Количество иллюстраций должно быть достаточным для пояснения излагаемого текста. Иллюстрации могут быть расположены как по тексту ПЗ (возможно ближе к соответствующим частям текста), так и в конце его. Иллюстрации должны быть выполнены в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД и СПДС. За исключением приложений, иллюстрации следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Если рисунок один, то он обозначается «Рисунок 1».

Иллюстрации каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения. Например – Рисунок А.3.

Фотоснимки размером меньше формата А4 должны быть наклеены на стандартные листы белой бумаги. Иллюстрация располагается так, чтобы ее было удобно рассматривать без поворота записки или с поворотом на 90° по часовой стрелке. На все иллюстрации должны быть ссылки в записке.

Оформление таблиц в ПЗ – по ГОСТ 2.105–95. Таблицы применяют для лучшей наглядности и удобства сравнения показателей. Цифровой материал, как правило, оформляют в виде таблиц в соответствии с рисунком 1.

Название таблицы, при его наличии, должно отражать ее содержание, быть точным, кратким. Его следует помещать над таблицей.

Заменять кавычками повторяющиеся в таблице цифры, математические знаки, знаки процента и номера, обозначения марок материалов и типоразмеров изделий, обозначения нормативных документов не допускается.

В формулах в качестве символов следует применять обозначения, установленные соответствующими стандартами. Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не даны ранее в тексте, должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснения каждого символа следует давать с новой строки в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Первая строка пояснения должна начинаться со слова «где» без двоеточия после него.

Формулы, следующие одна за другой и не разделенные текстом, разделяют запятой или точкой с запятой.

Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке умножения применяют знак «х».

Применение машинописных и рукописных символов в одной формуле не допускается.

Формулы, за исключением формул, помещаемых в приложении, должны нумероваться сквозной нумерацией арабскими цифрами, которые записывают на уровне формулы справа в круглых скобках. Одну формулу обозначают (1).

Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в скобках, например ... в формуле (1).

Формулы, помещаемые в приложениях, должны иметь отдельную нумерацию арабскими цифрами в пределах каждого приложения с добавлением перед каждой цифрой буквенного обозначения приложения, например формула (В1).

Порядок изложения в ПЗ математических уравнений такой же, как и формул.

Материал, дополняющий текст ПЗ, допускается помещать в приложениях. Приложениями могут быть, например, графический материал, таблицы большого формата, расчеты, описания аппаратуры и приборов, описания алгоритмов и программ задач, решаемых на ЭВМ, и т.д.

Информационные приложения могут быть рекомендательного или справочного характера.

Каждое приложение следует начинать с новой страницы с указанием наверху посередине страницы слова «Приложение» и его обозначения, а под ним в скобках для обязательного приложения пишут слово «обязательное», а для информационного – «рекомендуемое» или «справочное».

Приложение должно иметь заголовок, который записывают симметрично относительно текста с прописной буквы отдельной строкой.

Приложения обозначают заглавными буквами русского алфавита, начиная с А, за исключением букв Е, З, Й, О, Ч, Ъ, Ы, Ь. После слова «Приложение» следует буква, обозначающая его последовательность.

Допускается обозначение приложений буквами латинского алфавита, за исключением букв I и O.

В случае полного использования букв русского и латинского алфавитов допускается обозначать приложения арабскими цифрами.

Если в ПЗ одно приложение, оно обозначается «Приложение А».

Приложение, как правило, выполняют на листах формата А4. Допускается оформлять приложения на листах формата А3, А4 х 3, А4 х 4, А2 и А1 по ГОСТ 2.301–68.

Все приложения должны быть перечислены в оглавлении ПЗ с указанием их буквенных обозначений (номеров) и заголовков.

Ссылки на литературные источники указываются порядковым номером (по списку литературы), выделенным двумя квадратными скобками. В скобках при необходимости можно указывать том многотомного источника и страницу или только страницу, а также вписывать одновременно несколько источников, разделяя их запятой, например: [12, т. 2, с. 224], [24, с. 34], [1, 4, 28, 47].

При ссылке на иллюстрации следует писать «... в соответствии с рисунком 2» при сквозной нумерации и «... в соответствии с рисунком 1.2» при нумерации в пределах раздела.

Ссылки на таблицы указываются порядковым номером таблицы. Пример - в таблице 1.2.

Ссылки на формулы указываются порядковым номером формулы в круглых скобках. Пример – в формуле (2.1).

В повторных ссылках на иллюстрации и таблицы дается сокращенно слово «смотри». Пример – см. таблицу 1.3.

Список литературы должен содержать источники, использованные при выполнении курсового проекта. Источники располагаются по алфавиту или в порядке появления ссылок в тексте. Сведения об источниках должны даваться в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1–84 с указанием или без указания объема в страницах.

Статьи

1. Климов, А. А. Лазерный телевизионный микроскоп // Техника кино и телевидения. – 1976. – № 7. – С. 69–71.

2. Островский, В. И., Молчанова, Л. П. Алгоритмы распознавания технологических дефектов микросхем // Электронная техника. Сер.10. Микроэлектронные устройства. – 1980. – Вып. 5. – С. 49–52.

3. Россол, Л. Техническое зрение в промышленности // Техническое зрение роботов /Под ред. А. Пью. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 21–29.

4. Тин, Д., Прасада, Б. Методы цифровой обработки для кодирования графической информации // ТИНЭР. – 1980. – Т.68. – № 7. – С. 6–21.

Авторские свидетельства и патенты

1. А.с. 436350 (СССР). Двоичный сумматор /Ю. Н. Корнеев, С. В. Пискунов, С. И. Сергеев. – Оpubл. в Б.И. – 1974. – № 26.

2. А.с. 477751 СССР, МКИ В 06 В 1/06. Пьезоэлектрический датчик.

или

3. Пьезоэлектрический датчик: А.с. 477751 СССР: МКИ В 06 В 1/06.

4. Пат. 470025 США, МКИ Н 04 N 7/18. Метод и устройство для контроля проводящего рисунка на печатной плате.

ГОСТы

1. ГОСТ 15407–81. Качество продукции. Основные термины и определения. – 1981.

или

2. Качество продукции. Основные термины и определения: ГОСТ 15407-81. – 1981.

В ссылке можно опускать отдельные обязательные элементы при условии, что оставшийся набор элементов обеспечит поиск объекта ссылки в библиотеке или других фондах. Например, в ссылке на книгу допускается не указывать ее объем (количество страниц). В ссылке на составную часть документа (например статью) может быть не указано его основное заглавие, но при этом обязательно указание страниц, на которых он опубликован. Если приведено основное заглавие, то страницы могут не указываться.

В ссылке допускается сокращать названия журналов, издательств, мест (городов) изданий в соответствии с правилами, приведенными в ГОСТ 7.12–93 и ГОСТ 7.11–78.

В ПЗ на первом листе и при необходимости на последующих листах помещают оглавление, включающее номера и наименования разделов и подразделов с указанием номеров страниц.

Слово «Содержание» записывают в виде заголовка (симметрично тексту) прописными буквами. Наименования, включенные в оглавление, записывают строчными буквами, начиная с прописной буквы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированное проектирование узлов и блоков РЭС средствами современных САПР: учеб. пособие для вузов / И. Г. Мироненко и др.; под ред. И. Г. Мироненко. – М.: Высш. шк., 2002.

2. Каленкович, Н. И. Проектирование РЭС с учетом механических воздействий: учеб. пособие по курсу «Конструирование радиоэлектронных средств»

для студ. спец. «Проектирование и производство радиоэлектронных средств». – Минск : БГУИР, 1999.

3. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов / К. И. Билибин, А. И. Власов, Л. В. Журавлева и др.; Под ред. В. А. Шахнова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.

4. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств: учебник для радиотехн. спец. вузов.– М. : Высш. шк., 1990.

5. Основы конструирования изделий радиотехники: учеб. пособие по курсу «Основы конструирования изделий радиотехники» для студ. спец. Э. 03 01 00 «Экономика и управление предприятием» дневн. и заоч. форм обуч. / Ж. С. Воробьева, Н. С. Образцов, И. Н. Цырельчук и др. – Минск : БГУИР, 2001.

6. Пикуль М. И. и др. Конструирование и технология производства ЭВМ: учебник / М. И. Пикуль, И. М. Русак, Н. А. Цырельчук. – Минск : Выш. шк., 1996.

7. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА: справ. пособие / Э. Т. Романычева, А. К. Иванова, А. С. Кумеков. – М. : Радио и связь, 1984.

8. Шимкович, А. А. Конструирование несущих конструкций РЭС и защита их от дестабилизирующих факторов: учеб. пособие по курсу «Конструирование радиоэлектронных устройств» для студ. спец. «Проектирование и производство радиоэлектронных средств» : В 2 ч. Ч. 1. – Минск : БГУИР, 1999.

Св. план 2006, поз. 7

Учебное издание

Образцов Николай Сергеевич
Каленкович Николай Иванович
Ткачук Аркадий Мефодьевич и др.

КОНСТРУИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Учебно-методическое пособие по курсовому проектированию
для студентов специальностей
I-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС»,
I-39 02 02 «Проектирование и производство РЭС»,
I-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности»
дневной и заочной форм обучения

Редактор Н. В. Гриневич
Корректор Е. Н. Батурчик

Подписано в печать 05.01.2007.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 4,3.
Уч.-изд. л. 3,9.	Тираж 300 экз.	Заказ 223.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ № 02330/0056964 от 01.04.2004. ЛИ № 02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6