

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

АРЗАМАССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

Б.Д. Шурыгин

Основы конструирования ЭС

*Рекомендовано Ученым советом Нижегородского
государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева
в качестве лабораторного практикума
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
09.03.02 «Информационные системы и технологии»*

Нижний Новгород 2021

УДК 681.324
ББК 32.973
М 545

Рецензент

зам. руководителя НИОКР ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА»,
кандидат технических наук *А.Ю. Мишин*

Шурыгин, Б.Д.

М 545 Основы конструирования ЭС: Учебное пособие к практическим занятиям / Б.Д. Шурыгин; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. – 83 с.

ISBN

Учебное пособие содержит методические и справочные материалы для выполнения заданий на практических занятиях по курсу «Основы конструирования ЭС», проводимых в первом семестре изучения курса. Может быть полезным при выполнении курсовых проектов и выпускных квалификационных работ.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений всех форм обучения по направлению 11.03.03 – Конструирование и технология электронных средств.

Рис.: 34. Табл.: 13. Библиогр.: 8 назв.

УДК 681.324
ББК 32.973

ISBN 978-5-502-01148-8

**© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2021**

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений.....	
Введение	
Тема 1. Разработка и анализ технического задания.....	
Тема 2. Предварительная оценка массы и объема конструкции.....	
Тема 3. Расчет размеров печатных плат.....	
Тема 4. Комплексная оценка технических решений	
Тема 5. Разработка компоновки блока электронного средства	
Тема 6. Выбор способа охлаждения	
Тема 7. Оценка эффективности электромагнитного экрана	
Тема 8. Расчет собственной частоты печатного узла простой конструкции	
Тема 9. Расчет собственной частоты печатного узла сложной конструкции	
Тема 10. Оценка усталостной долговечности выводов радиоэлемента.....	
Тема 11. Оценка усталостной долговечности печатного узла.....	
Приложение А. Понятия и определения	
Приложение Б. Пример технического задания на модернизацию конструкции	
Приложение В. Пример выполнения анализа ТЗ из приложения Б.....	
Приложение Г. Основные способы и требования к питанию ЭС	
Приложение Д. Значения относительных показателей качества ЭС...	
Приложение Е. Вероятностные кривые для выбора способа охлаждения.....	
Приложение К. Справочные данные для расчета механических характеристик электронных средств	
Приложение Л. Справочные данные для расчета усталостной долговечности элементов и узлов.....	

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БИС – большая интегральная схема
БТА – блок тестирования аккумуляторов
ВКР – выпускная квалификационная работа
ВФУ – вариант формовки и установки
ЕВО – естественное воздушное охлаждение
ИС – интегральная микросхема
КМО – компонент, монтируемый в отверстия
КМП – компонент, монтируемый на поверхность
КП – контактная площадка
КП – курсовой проект (курсовое проектирование)
КПД – коэффициент полезного действия
КС – координатная сетка
КТЕ – конструктивно-технологическая единица
МВ – механическое воздействие
МСБ – микросборка
НИР – научно-исследовательская работа
НТД – нормативно-технические документы
НТР – нормальный тепловой режим
ОКР – опытно-конструкторская работа
ОТЗ – общее техническое задание
ПМ – посадочное место
ПН – показатели надежности
ПУ – печатный узел
РЭ – радиоэлемент
САПР – система автоматизированного проектирования
СБИС – сверхбольшая интегральная схема
СО – способ охлаждения
СЧК – собственная частота колебаний
ТЗ – техническое задание
ФЯ – функциональная ячейка
ЧТЗ – частное техническое задание
ЭМС – электромагнитная совместимость
ЭС – электронное средство

ВВЕДЕНИЕ

В учебном плане для дисциплины "Основы конструирования электронных средств" большое внимание уделяется практическим занятиям, на которых студенты осваивают методики расчетно-проектной деятельности электронных средств, очень важной для конструктора-технолога ЭС. К этому необходимо добавить, что владение этими методиками необходимо каждому обучающемуся по направлению 11.03.03 (Конструирование и технология электронных средств) студенту для работы над курсовым и, в дальнейшем, над выпускным проектом.

В пособие входят 11 тематических разделов, 5 из них рассчитаны на изучение в процессе плановых практических занятий, которые, в зависимости от формы обучения, могут проводиться в аудитории или дистанционно. Материалы остальных разделов предназначены для использования при выполнении студентами курсового проекта по одноименному курсу, а также выпускной квалификационной работы.

Каждый из разделов содержит небольшую теоретическую часть, необходимую для выполнения практической части работы. Во многих разделах приводятся примеры решения типовых задач. В конце каждого раздела имеется список литературы, которую рекомендуется использовать при подготовке теоретической части.

Приложения к данному пособию содержат, в основном, справочную информацию, необходимую для выполнения практической части.

Типовой порядок проведения практических занятий:

- получение студентами от преподавателя заданий на решение задач;
- изложение преподавателем теоретического материала, объяснение им решения примеров по изучаемой теме;
- самостоятельное решение задач студентами;
- сдача отчетов и теории по теме занятия.

По каждой теме студент сдает отчет, оформленный в соответствии с требованиями стандартов. В отчете особое внимание должно уделяться соблюдению логической последовательности в изложении материала, правильному использованию единиц измерения (ГОСТ 8.417-2002) в расчетах, выполнению ссылок на источники информации, а также аккуратному оформлению текста в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-95.

Полученные на практических занятиях навыки решения расчетно-проектных задач могут использоваться студентами при выполнении курсового проекта и выпускной квалификационной работы.

УДК

**Методические указания к выполнению практических занятий
по курсу "Основы конструирования ЭС", часть 1 / Изд-во АПИ.**
Сост.: Б.Д. Шурыгин. Арзамас, 2021.

Учебное пособие содержит методические и справочные материалы для выполнения заданий на практических занятиях по курсу «Основы конструирования ЭС». Может быть также полезным при выполнении курсовых проектов и выпускных квалификационных работ.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений всех форм обучения по направлению 11.03.03 – Конструирование и технология электронных средств.

Тема 1. РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

1.1. Цель и задачи практического занятия

Цель:

–приобретение начальных навыков в разработке технического задания (ТЗ) на конструирование электронного средства и выполнении его анализа.

Задачи:

–ознакомление с основной нормативно-технической документацией (ГОСТ, ОСТ и др.), необходимой для проектирования ЭС;

–разработка учебного ТЗ на проектирование или модернизацию конструкции электронного средства;

–выполнение анализа ТЗ с принятием первоначальных проектных решений по разрабатываемому изделию.

1.2. Общие сведения о техническом задании

Техническое задание является основным документом для разработки и испытания изделия. Оно составляется на основе исходных требований заказчика, результатов выполнения НИР, научного прогнозирования, экономических и патентных исследований, проводимых по **ГОСТ Р 15.011-96**.

Согласно **ГОСТ Р 15.201-2000** в ТЗ рекомендуется предусматривать учет интересов всех возможных потребителей. Конкретное содержание ТЗ определяют заказчик и разработчик, а при инициативной разработке – разработчик.

ТЗ может составляться как на все изделие, так и на его составные части. В последнем случае техническое задание обычно называют частным техническим заданием (ЧТЗ). Такие задания составляются на разработку печатных узлов, микросборок, специальных датчиков и других частей изделия требующих отдельного проектирования.

При необходимости на группу изделий разрабатывается общее техническое задание (ОТЗ). В ОТЗ указывают требования, которые являются общими для всей группы изделий, при этом, в ТЗ на конкретное изделие эти требования не приводят, а дают только ссылку на ОТЗ.

Создание нового изделия не является единственным видом разработки. Под термином "разработка" также понимается модернизация, модифицирование и усовершенствование изделия. Разъяснения этих терминов приведены в приложении А. В связи с этим темой курсового или выпускного проекта вполне может быть, к примеру, модернизация электронного средства.

1.3. Структура ТЗ на разработку конструкции радиоэлектронного средства

Техническое задание в курсовом проекте или выпускной работе составляется на базе основных исходных данных: требований задания на проектирование (выдается руководителем на отдельном бланке), описания работы изделия и результатов анализа электрической схемы. При оформлении ТЗ, как правило, делится на разделы, подразделы, пункты и подпункты. Это делается для облегчения работы с этим документом в дальнейшем, например, для удобства выполнения ссылок на необходимые требования.

Структура ТЗ на выполнение опытно-конструкторских работ (ОКР) в общем случае имеет следующие разделы:

- Вводная часть
- Технические требования
- Технико-экономические требования
- Требования по видам обеспечения
- Специальные требования
- Требования к этапам и стоимости выполнения ОКР
- Порядок выполнения и приемки этапов ОКР

Приведенная структура ТЗ не является универсальной, т.е. на "все случаи жизни". В учебных и выпускных работах по понятным причинам некоторые разделы могут отсутствовать, например, последний раздел. С другой стороны, в ТЗ учебной работы при необходимости может быть добавлен раздел «Принцип работы изделия», в котором приводится описание алгоритма работы, назначение узлов и каскадов, взаимодействие изделия с внешними устройствами и др.

1.4. Описание структурных элементов технического задания

Ниже приводятся требования типичные для технического задания на разработку конструкции ЭС.

1.4.1. Вводная часть

Во вводной части ТЗ приводят необходимые общие сведения об изделии.

Наименование, обозначение и область применения изделия

Здесь приводят: наименование и условное обозначение изделия; краткую характеристику области его применения; общую характеристику объекта, в котором будет использоваться изделие.

Примеры наименований и условных обозначений изделий:

- «Измеритель расхода газа» – ИРГА,
- «Блок преобразования сигналов модернизированный» – БПС-М.

Основание для разработки

Наименование документа, на основании которого выполняется разработка, дата его утверждения. В учебной работе может быть сделана ссылка на учебный план или приказ о начале дипломного проектирования.

Цель и задачи разработки

В реальном проекте объектом разработки может являться: макет для научных исследований; макет технического проекта; опытный образец изделия; изделие для серийного производства и др. В учебных проектах, могут также разрабатываться: прибор или установка для учебной лаборатории; комплект конструкторской документации для использования в учебном процессе и т.п.

Как уже отмечалось, изделие в проекте может разрабатываться "с нуля", модернизироваться уже существующая конструкция или же осуществляться ее модифицирование. В любом случае в названии проекта это должно быть четко отражено. Примеры тем курсового проекта по дисциплине "Основы конструирования ЭС":

"Разработка конструкции прибора для измерения влажности зерна",

"Модернизация блока бортовой системы навигации".

В ТЗ важно правильно сформулировать цель и задачи разработки. Суть данных понятий можно определить следующим образом:

- Цель разработки – это краткое изложение основного результата проекта, который необходимо достигнуть;
- Задачи разработки – это основные средства, с помощью которых планируется достигать поставленную в ТЗ цель.

Например, целью разработки нового прибора может быть повышение конкурентоспособности по сравнению с существующими аналогами. В связи с этим в ТЗ могут ставиться задачи расширения его функциональных возможностей, улучшения массогабаритных характеристик и др. улучшения.

Планируемые улучшения в большинстве случаев должны иметь количественное выражение. Например, задачу уменьшения массы изделия необходимо формулировать с указанием ее величины: "...по сравнению с прототипом масса должна быть уменьшена не менее чем на 25%"

Источники разработки

В курсовых проектах и в ВКР в первую очередь рекомендуется указать источники, в которых приводятся основные исходные данные для проектирования (электрическая схема, ее описание и др.).

Если известен прототип проектируемого изделия или его аналоги, то необходимо привести их основные характеристики или сослаться на источники, где эти данные приводятся. Все это необходимо для того, чтобы в ходе разработки иметь "базу" для анализа ее результатов.

1.4.2. Технические требования

Состав изделия

Указывается наименование, количество и назначение составных частей изделия, поставляемых потребителю, но не соединяемых на заводе изготовителе.

Составными частями изделия в общем случае могут являться:

- основная сборочная единица, например, блок;
- входящие в состав изделия внешние устройства, например датчики;
- программное обеспечение;
- эксплуатационная документация;
- запасное имущество и принадлежности (ЗИП).

Показатели назначения

В этом подразделе приводят требования к выполняемым функциям и электрическим характеристикам изделия. К электрическим характеристикам можно отнести: параметры, характеризующие быстродействие и частотные свойства; мощность (потребляемая, выходная и др.); коэффициент полезного действия; параметры, характеризующие точность и стабильность выполняемых функций; время готовности к работе и др.

При необходимости приводят требования к функциональной, геометрической, электромагнитной, электрической, программной, технологической, и другим видам совместимости с другими изделиями.

*Требования к электропитанию**

Большинство ЭС рассчитывается на питание электрической энергией от сети или от автономного источника питания. Для расширения области применения или удобства использования некоторые изделия имеют комбинированное (универсальное) питание.

В ТЗ на разработку изделий с сетевым питанием обязательно должны быть указаны требования к показателям качества сети, либо сделаны ссылки на нормы, приведенные в соответствующих стандартах. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения установлены **ГОСТ Р 54149-2010**.

Если изделие должно иметь автономное питание, то необходимо обязательно задать характеристики элементов питания, включая их тип, количество, электрическую емкость и др., либо, как минимум, указать минимальное время автономной работы изделия.

Основные способы и требования к питанию ЭС приведены в приложении Г.

*Требования к электропитанию могут входить в состав подраздела «Показатели назначения»;

Требования по надежности

Требования к надежности являются обязательными практически для любого ТЗ. В этом подразделе рекомендуется кроме требований к показателям надежности (ПН), указывать меры по их обеспечению.

К показателям надежности относят:

- показатели безотказности и ремонтпригодности и (или) комплексные показатели;
- показатели долговечности;
- показатели сохраняемости.

Выбор рациональной номенклатуры задаваемых в техническом задании ПН и обоснование их количественных значений производится по **ГОСТ 27.003-90**.

Для обоснования количественных значений ПН используют расчетные, экспериментальные или расчетно-экспериментальные методы. Для подтверждения заданных требований по надежности используются следующие способы:

- расчетный метод – применяется на этапе разработки изделия в соответствии с **ГОСТ 27.301-95**;
- экспериментальный (расчетно-экспериментальный) метод – используется на этапе предварительных и приёмочных испытаний по методике, согласованной с заказчиком.

Конструктивные требования

В данном подразделе приводятся требования к конструктивным параметрам создаваемого изделия и его составных частей. В первую очередь к этим требованиям можно отнести ограничения и нормы на следующие характеристики конструкции:

- габаритные, установочные, присоединительные размеры;
- масса;
- способы крепления на объекте (при необходимости в ТЗ приводится ЭСкиз установочного места для изделия со всеми необходимыми размерами);
- форма, определяющая устойчивость блока на объекте установки (соотношение высоты блока к размерам основания, расположение центра тяжести);
- порядок размещения органов управления, индикации, средств электрической коммутации на панелях изделия;
- возможности агрегатирования изделия (объединение с другими объектами);
- характеристики покрытий (цвет, фактура поверхности, количество слоев и др. свойства);
- электрическая прочность и электрическое сопротивление изоляции, допустимое паразитное влияние на другие объекты;

–способы защиты от климатических, механических и других воздействий;

–особенности конструктивного исполнения изделия.

Нередко при составлении ТЗ некоторые требования не могут быть сразу точно определены. Для их уточнения потребуется выполнить часть этапов разработки. В этом случае требование дополняют фразой "Значения уточняются в процессе разработки изделия на этапе (указывается этап разработки) и согласовываются с (приводится наименование организации, с которой требуется согласование)".

Требования к электромагнитной совместимости

Вопросы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) должны решаться на всех этапах жизненного цикла электронного средства включая его разработку. На этапе технического задания должны быть сформулированы конкретные требования к изделию, выполнение которых позволит ему надежно выполнять заданные функции в определенной помеховой обстановке и одновременно с этим оно само не должно нарушать работу других устройств. В общем случае к этим требованиям можно отнести:

–требования к компоновке изделия в целом и его узлов, выполнение которых позволит избежать недопустимых по величине паразитных связей в конструкции;

–требования к защитным средствам от нежелательных электромагнитных воздействий и взаимодействий (экраны, фильтры, гальванические развязки и др.);

–требования к свойствам и к выполнению электрических связей внутри изделия, а также между изделием и другими объектами.

При формулировке требований к ЭМС необходимо руководствоваться стандартами, которые по Общероссийскому Классификатору Стандартов относятся к группе 33.100 (Электромагнитная совместимость). Их можно найти в интернете, например, на сайте [4].

Пример записи в учебной работе требования к защитным (экранирующим) свойствам корпуса изделия: "Ослабление помехонесущих полей корпусом изделия должно быть не менее $A = \dots$ дБ, в диапазоне частот от $\dots$ до $\dots$ Гц".

Требования к уровню унификации и стандартизации

Требования к использованию стандартных, унифицированных узлов, блоков; показатели уровня унификации и стандартизации и др.

Требования к безопасности

В этом подразделе приводят:

–требования к обеспечению безопасности при монтаже, эксплуатации, обслуживании и ремонте (от воздействия электрического тока, теплового воздействия, высокочастотных полей, ядовитых и взрывча-

тых паров, пыли и газов, акустических шумов и т.п.).

– требования к охране окружающей среды при производстве, эксплуатации, транспортировании, хранении, утилизации изделия.

Для изделий различного назначения общие требования безопасности излагаются в стандартах:

ГОСТ Р 50267.0-92 – для электрических медицинских изделий;

ГОСТ Р 52161.1-2004 – для бытовых и аналогичных электрических приборов;

ГОСТ Р 52319-2005 – для электрического оборудования, предназначенного для измерения, управления и лабораторного применения;

ГОСТ Р МЭК 60065-2002 – для аудио-, видео- и аналогичной электронной аппаратуры;

ГОСТ Р МЭК 60950-2002 – для оборудования информационных технологий.

Условия эксплуатации (использования)

В данном подразделе ТЗ, как правило, указывают требования к стойкости, устойчивости и прочности изделия в определенных условиях эксплуатации. Понятия этих свойств согласно **ГОСТ16019-2001** приведены в приложении А.

В ТЗ условия эксплуатации могут задаваться следующими способами:

– приводятся в таблицах;

– в виде текста, содержащего параметры дестабилизирующих факторов;

– в виде ссылок на нормативно-технические документы (НТД).

Требования к транспортировке и хранению

Основное содержание этого подраздела: условия транспортировки, включая параметры воздействующих дестабилизирующих факторов, и виды транспортных средств; необходимость и способы крепления при транспортировке; расстояние транспортировки и скорости передвижения; требования к необходимой защите, от ударов при погрузке и выгрузке; места, условия и способы хранения.

Производственно-технологические требования

Вид производства изделия (мелкосерийное, серийное, массовое), метод изготовления печатных плат, требования к изготовлению печатных узлов (например, вид монтажа радиоэлементов на платы) и др.

1.4.3. Техничко-экономические требования

Приводят требования, обеспечивающие разработку изделия в обоснованных пределах полной стоимости его жизненного цикла и с оптимальной трудоемкостью серийного производства и технического обслуживания в процессе эксплуатации.

В подразделе указывают ориентировочные предельные значения:

- стоимости разработки изделия;
- стоимости и продолжительности подготовки и освоения серийного производства;
- стоимости изделия в серийном производстве;
- среднегодовой стоимости эксплуатации изделия и содержания его в процессе длительного хранения.

Ввиду отсутствия возможности оценки стоимостных показателей в учебных проектах ограничиваются кратким обоснованием экономических преимуществ разрабатываемого изделия по сравнению с прототипом или аналогами.

В подразделе отдельным пунктом приводят требования по обеспечению экономии и рационального использования топливно-энергетических ресурсов, дефицитных материалов и т.п. при разработке и производстве изделия.

1.4.4. Требования по видам обеспечения

В этом подразделе приводят:

- требования по метрологическому обеспечению (требования к методам измерений и контроля параметров изделия, к контролепригодности изделия и др.)
- требования по программному обеспечению* (требования к составу и структуре специального программного обеспечения, к алгоритмам работы программ, к операционной системе, к ресурсам вычислительных средств и др.).

*На разработку программного обеспечения обычно составляется отдельное ТЗ, которое должно отвечать требованиям **ГОСТ 19.201-78**.

1.4.5. Специальные требования

В этом подразделе приводят:

- требования к методам испытаний изделия при разработке и серийном производстве;
- указывают необходимость разработки математической модели изделия, программных средств;
- требования к специальному оборудованию и оснастке.

1.4.6. Требования к этапам и стоимости выполнения ОКР

Содержание подраздела: перечень этапов, основное содержание работ по этапам, перечень документов, которым заканчиваются этапы, сроки их выполнения, стоимости выполнения и др.

1.4.7. Порядок сдачи и приемки этапов ОКР

Приводят требования:

- количество опытных образцов, которое необходимо для предварительных и приемочных испытаний;
- место проведения испытаний опытных образцов;

–использование опытных образцов после испытаний и др.

1.5. Требования к оформлению и изложению ТЗ

Техническое задание оформляется на листах форматах А4 и должно отвечать требованиям к текстовым конструкторским документам, изложенным в **ГОСТ 2.105–95**.

Техническое задание, как правило, разбивается на разделы, подразделы, пункты и т.п. При присвоении им номеров допускается использовать до 6 арабских цифр, разделенных точками. Структурирование ТЗ облегчает выполнение ссылок на его отдельные фрагменты.

Требования к разрабатываемому изделию установленные в стандартах в техническом задании обычно не приводят, а дают ссылки на номера этих стандартов. Полные названия стандартов, на которые имеются ссылки в тексте пояснительной записки, приводят в разделе «Нормативные ссылки» пояснительной записки проекта.

Тексты стандартов можно найти в интернете, например, на сайте [4].

Требования к тексту технического задания:

–текст ТЗ должен быть кратким, четким и не допускать различных толкований;

–при изложении обязательных требований в тексте должны применяться слова «должен», «следует», «необходимо» и производные от них;

–не допускается использовать в тексте математический знак минус (–) перед отрицательными значениями величин (необходимо писать слово «минус»);

–обозначения и написание единиц физических величин должны отвечать требованиям **ГОСТ 8.417-2002**. Примеры часто встречающихся ошибок в студенческих работах приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Неверно	Верно	Комментарий
1	2	3
мм.рт.ст.	мм рт. ст.	Точка после единицы измерения не ставится
100 kW; 100 кВт	100 kW; 100 кВт	Буквенные обозначения единиц печатают прямым шрифтом

Окончание таблицы 1.1

1	2	3
5В; 80%; 20°C	5 В; 80 %; 20 °C	Между числом и единицей измерения ставится пробел
20 °	20°	Исключение: между числом и обозначением в виде знака, поднятого над строкой, пробел не ставится
100,0±0,1 кг или 50±1 г	(100,0±0,1) кг или 50 г±1 г	Числовые значения с предельными отклонениями заключают в скобки и обозначения единиц помещают за скобками или проставляют обозначение единицы за числовым значением величины и за ее предельным отклонением

1.6. Анализ технического задания

Анализ ТЗ производится с целью определения основных направлений создания конструкции и состоит в оценке степени важности множества взаимосвязанных факторов, оказывающих влияние на принятие решений в процессе конструирования изделия.

В анализе рекомендуется обращаться к отдельным требованиям или группам требований технического задания, анализировать их и принимать необходимые решения по разрабатываемой конструкции. Очевидно, что многие из этих решений будут носить предварительный характер, требующий уточнений в процессе дальнейшей разработки изделия. Таким образом, в результате выполненного анализа создается "образ" разрабатываемой конструкции в некотором приближении к ее конечному виду.

Логически правильно анализ начинать с проверки достаточности данных и требований, приведенных в ТЗ, для осуществления проектирования изделия. Далее изучается патентная и техническая литература, чтобы определить, какие достижения имеются в области назначения разрабатываемого изделия, а также изучаются различного рода источники информации (доклады на конференциях, статьи в периодической печати, каталоги фирм и др.) с целью выявления аналогов изделия и сбора данных об их характеристиках.

При выполнении анализа ТЗ в курсовом проекте необходимо руководствоваться следующими правилами:

1) Ни один из пунктов ТЗ в проекте не должен оставаться без внимания. Сначала выделяют основные требования ТЗ, т.е. те, которые в наибольшей степени могут повлиять на конструкцию изделия, его ха-

рактеристики. Этим требованиям при анализе уделяется основное внимание. Второстепенные требования ТЗ могут быть учтены позже в процессе конструирования. К ним можно отнести:

- требования, которые слабо влияют на наиболее важные показатели качества изделия;
- требования, не выполнение которых можно легко исправить в процессе конструирования.

2) Текст анализа ТЗ должен состоять не из общих фраз, взятых из учебников, а излагать соображения по выполнению того или иного требования (или группы требований). При этом рекомендуется делать ссылки на конкретные пункты ТЗ, а также на различные источники информации (учебную литературу, статьи, монографии, справочники, Internet-сайты и др.).

3) В результате анализа должны вырисовываться главные характеристики будущей конструкции, а также сформулированы задачи и проблемы, которые необходимо решить на последующих этапах разработки изделия.

Пример анализа ТЗ приведен в приложении Б.

1.6. Выполнение практического занятия

Данное практическое занятие является первым этапом курсового проектирования (КП) по дисциплине «Основы конструирования ЭС». Для его выполнения каждому студенту выдается задание в следующем составе:

- схема электрическая принципиальная с перечнем элементов;
- описание принципа работы этой схемы;
- заполненный бланк задания на курсовое проектирование, содержащий условия эксплуатации, недостающие в описании показатели назначения, область применения, объект размещения изделия и другие данные на него.

Практическое занятие выполняется каждым студентом самостоятельно. Возникающие в процессе работы над ТЗ вопросы решаются на аудиторных практических занятиях и консультациях, проводимых руководителем проекта. Среди приводимых в библиографическом списке источников в работе в первую очередь рекомендуется использовать пособие [1]. Учитывая учебный характер проекта, некоторые из приведенных выше пунктов структуры ТЗ допускается не включать в состав разрабатываемого технического задания (необходимо согласовать с руководителем проекта).

При составлении и анализе ТЗ необходимо в полной мере использовать нормативно-техническую литературу (ГОСТ, ОСТ, РД и др.).

Дополнительными материалами, которые призваны помочь в выполнении работы, являются:

- пример технического задания на модернизацию конструкции блока (приложение Б);
- пример анализа технического задания (приложение В).

1.7. Рекомендуемая литература

1. **Сарафанов, А.В.** Основы проектирования электронных средств: Техническое задание. Формирование и анализ. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов. – Электрон. дан. (3 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2008.

2. Конструирование электронных средств: Учебное пособие / В.Ф. Борисов, А.А. Мухин, М.Ф. Митюшин, А.Н. Шишков, Ю.В. Чайка, Шурьгин Б.Д., НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2013. – 111 с.: ил.

3. **Муромцев, Д.Ю.** Конструирование узлов и устройств электронных средств: учебное пособие/ Д.Ю. Муромцев, И.В. Тюрин, О.А. Белоусов. – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – 540 с.: ил. – (Высшее образование).

4. www.gostbase.ru [Электронный ресурс]

1.8. Нормативные ссылки

ГОСТ Р 54149-2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения

ГОСТ Р 15.011-96 Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения

ГОСТ Р 15.201-2000. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство

ГОСТ 28934-91. Совместимость технических средств электромагнитная. Содержание раздела технического задания в части электромагнитной совместимости

ГОСТ 27.003-90 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности

ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения

ГОСТ Р 50267 (МЭК 601-1-88) Изделия медицинские электрические. Часть 1. Общие требования безопасности

ГОСТ Р 52161.1-2004 Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Часть 1. Общие требования

ГОСТ Р 52319-2005 (МЭК 61010-1:2001) Безопасность электрического оборудования для измерения, управления и лабораторного применения. Часть 1. Общие требования

ГОСТ Р МЭК 60065-2002 Аудио-, видео- и аналогичная электронная аппаратура. Требования безопасности

ГОСТ Р МЭК 60950-2002 Безопасность оборудования информационных технологий

ГОСТ 16019-2001 Аппаратура сухопутной подвижной радиосвязи. Требования по стойкости к воздействию механических и климатических факторов и методы испытаний

ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин

ГОСТ 2.105–95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам

ГОСТ 19.201-78 ЕСПД. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению

ЧТО СДЕЛАТЬ:

- Расставить в тексте больше ссылок
- Вставить замечание о важности учета в первую очередь назначения, области применения и объекта размещения, привести пример
- В приложение поместить таблицу по воздействиям, перепроверить все приложения.

ТЕМА 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МАССЫ И ОБЪЕМА КОНСТРУКЦИИ

2.1. Краткие теоретические сведения

Выполняемая на начальных стадиях конструирования оценка массы и объема будущей конструкции имеет своей целью получить ответы на вопросы, правильно ли выбраны метод компоновки и элементная база и не придется ли кардинально их менять в дальнейшем. Основными исходными данными для решения данной задачи являются перечни элементов, входящих в состав изделия.

В расчетах используются коэффициенты дезинтеграции массы q_m , объема q_v , и площади q_s , плотность упаковки элементов γ , эл/см³, плотность конструкции m_0 , кг/дм³, коэффициенты связи функциональных и материальных параметров k_0 . Описания этих параметров приведены в [1].

Через известную массу радиоэлементов $m_{эл}$ можно определить массу конструкции:

$$m_K = q_m m_{эл}.$$

Зная плотность конструкции m_0 , легко определить объем:

$$V_K = m_K / m_0 .$$

Масса и объем конструкции могут быть найдены с использованием других исходных данных, например, суммарного объема элементов $V_{эл}$, числа элементов $N_{эл}$. Тогда

$$V_K = q_v \cdot V_{эл}, \quad V_K = N_{эл} \cdot \gamma, \quad m_K = V_K m_0 .$$

Если известны коэффициенты связи функциональных и материальных параметров конструкции, то масса конструкции

$$m_K = k_0 F ,$$

где k_0 – коэффициент связи доминирующего функционального показателя F с массой конструкции.

Изделия, у которых материальные параметры определяются только одним (доминирующим) функциональным показателем составляют достаточно узкий класс. Поэтому для большинства ЭС связь функциональных и материальных параметров устанавливается с помощью коэффициента, обратного по величине плотности упаковки элементов

$$k_0 = \gamma^{-1} = V/(N_{уз} + N_{дэ}),$$

где V – объем изделия, $N_{уз}$, $N_{дэ}$ – соответственно количество интегральных и дискретных радиоэлементов.

Более подробно вопросы ориентировочных оценок массогабаритных показателей изделий изложены в [1]. Значения коэффициентов дезинтеграции и плотности для некоторых конструкций ЭС приведены в приложении Д.

2.2. Примеры расчетов массогабаритных показателей ЭС

Пример 1. Изделие выполнено на 200 радиоэлементах, средняя масса каждого из которых составляет 0,5 г. Определить ориентировочные значения массы и объема изделия.

Решение.

Определив по исходным данным суммарную массу радиоэлементов $m_{эл} = 100$ г, и приняв коэффициент дезинтеграции массы $q_m = 5$, плотность конструкции $m_0 = 0,5$ кг/дм³, найдем: масса изделия $m_K = q_m m_{эл} = 5 \times 100 = 500$ г, объем $V_K = m_K / m_0 = 0,5 / 0,5 = 1$ кг.

Пример 3. Радиоприемное устройство выполнено на 10 микросхемах второй степени интеграции и 80 дискретных радиоэлементах. Плотность упаковки элементов в изделии составляет 5 эл/см³. Определить массу устройства.

Решение.

Находим суммарное число радиоэлементов в изделии $N_{уз} + N_{дэ} = 10 \times 100 + 80 = 1080$. Определяем объем радиоприемного устройства $V_K = (N_{уз} + N_{дэ}) / \gamma = 1080 / 5 = 216$ см³, и через показатель плотности $m_0 = 6$ г/см³ находим значение массы устройства $m = m_0 V = 6 \times 216 = 1296$ г.

2.3. Рекомендуемая литература

1. Конструирование радиоэлектронных средств / В. Ф. Борисов, О. П. Лавренов, А. С. Назаров А. Н. Чекмарев; Под ред. А. С. Назарова – М.: изд. МАИ, 1996.

2. Конструирование блоков бортовой авиационной аппаратуры связи: Учебное пособие / Е.Л. Белоусов, М.Н. Ушкар / НГТУ, Нижний Новгород, 2005, 237 с.

ТЕМА 3. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

3.1. Общие сведения

Для каждого конкретного изделия габариты печатных плат зависят от его конструкции, которая диктует также и формы плат, точки крепления, зоны запрета/разрешения на установку элементов и на прокладку печатных проводников и другие характеристики. Учитывая это, конструирование устройств ЭС часто выполняют в следующем порядке:

1) Определяют площади плат, необходимые для размещения требуемых радиоэлементов;

2) Разрабатывают конструкцию изделия (блока, пульта и др.) с решением следующих задач: вначале разрабатывается корпус устройства, выбираются элементы и места крепления, места размещения соединителей и т.д., и только после этого, конструируется печатная плата уже с известными размерами.

Рассмотренный цикл относительно длительный и трудоемкий, но он дает хорошие результаты проектирования изделий.

Площадь платы ($S_{пл}$) в общем случае образуется из площади краевых полей ($S_{кр}$) и монтажной площади для размещения РЭ ($S_{мп}$):
$$S_{пл} = S_{кр} + S_{мп}.$$

Краевое поле предусматривается для фиксации платы при изготовлении модуля, размещения зон для направляющих элементов и т.п. На этом поле, как правило, запрещено располагать радиоэлементы.

На рис. 3.1 показан пример распределения площади печатной платы для поверхностного монтажа согласно стандарту IPC-SM-782A.

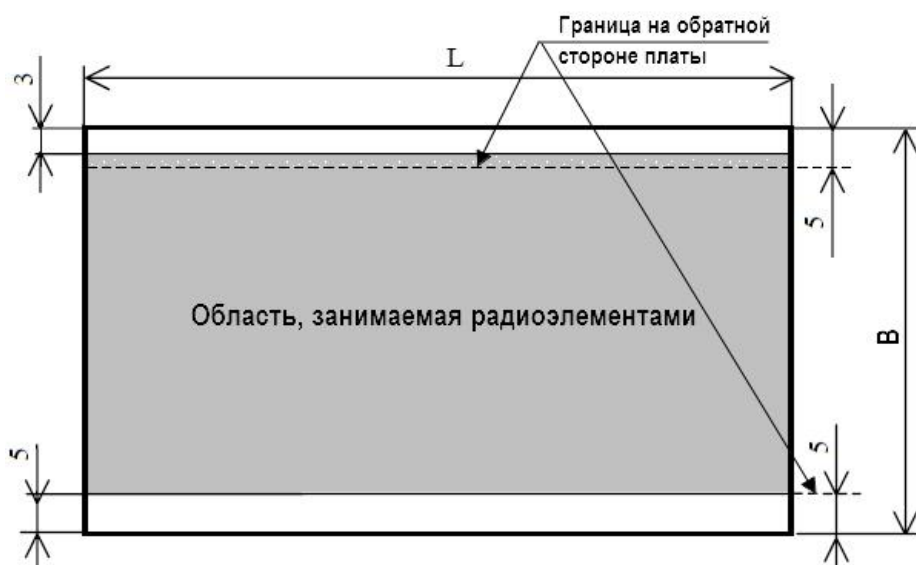


Рис. 3.1. Расположение основных зон на плате (IPC-SM-782A).

Площадь монтажной зоны $S_{МП}$, необходимую для одностороннего размещения радиоэлементов, приближенно можно определить по формуле:

$$S_{МП} = K_S \cdot \sum_{i=1}^n S_i, \quad (3.1)$$

где S_i – установочная площадь i -го радиоэлемента;

K_S – коэффициент заполнения по площади;

n – количество радиоэлементов на плате.

Коэффициент заполнения K_S , который зависит от назначения и условий эксплуатации изделия, находится в пределах 1,5...2,5. Его точное значение можно определить основываясь на опыте предыдущих разработок аналогичных конструкций.

Если на плате располагаются одновременно радиоэлементы с планарными и штырьковыми выводами, то более точным будет расчет по формуле:

$$S_{МП} = \frac{S_{эл.пл}}{K_{Sпл}} + \frac{S_{эл.шт}}{K_{Sшт}}, \quad (3.2)$$

где $S_{эл.пл}$ – общая площадь, занимаемая РЭ с планарными выводами;

$S_{эл.шт}$ – общая площадь, занимаемая РЭ со штырьковыми выводами;

$K_{Sпл}$ – коэффициент заполнения площади платы для РЭ с планарными выводами, выбирается $K_{Sпл} \leq 0,4$;

$K_{Sшт}$ – коэффициент заполнения площади платы для РЭ со штырьковыми выводами, выбирается $K_{Sшт} \leq 0,6$.

Установочная область (площадь) S_i в общем случае определяется размерами посадочного места (ПМ) радиоэлемента $S_{ПМ}$ плюс площадь защитной зоны S_3 : $S_i = S_{ПМ} + S_3$.

Размеры посадочного места компонента – это максимальные габаритные размеры его проекции на плату с учетом границ контактных площадок, которые необходимы для его монтажа на плату. На рис. 3.2,а приведен пример структуры установочной области ИС. Относительные размеры зон на этом рисунке показаны условно.

Защитная зона вводится с целью обеспечения дополнительного пространства вокруг компонента для выполнения сборочно-монтажных работ, его контроля и ремонта, а также для ослабления тепловых и/или электромагнитных связей между соседними компонентами.

Защитная зона вводится с целью обеспечения дополнительного пространства вокруг компонента для выполнения сборочно-монтажных работ, его контроля и ремонта, а также для ослабления тепловых и/или электромагнитных связей между соседними компонентами.

Примером того, как может защитная зона повлиять на размеры установочного поля РЭ является требование к установке чиповой антенны LDA21-K диапазона 2,4 ГГц, которая имеет рекордно малые размеры – $2 \times 1,25 \times 1$ мм ($S_{\text{пм}} = 2,5$ мм²). Изготовитель чипа рекомендует обеспечить вокруг нее защитную зону для исключения электромагнитного влияния соседних радиоэлементов на характеристики антенны. С учетом этой зоны минимальные размеры установочной площадки 3×5 мм ($S_i = 15$ мм²). Как видим, за счет защитной зоны площадь посадочного места возросла в 6 раз.

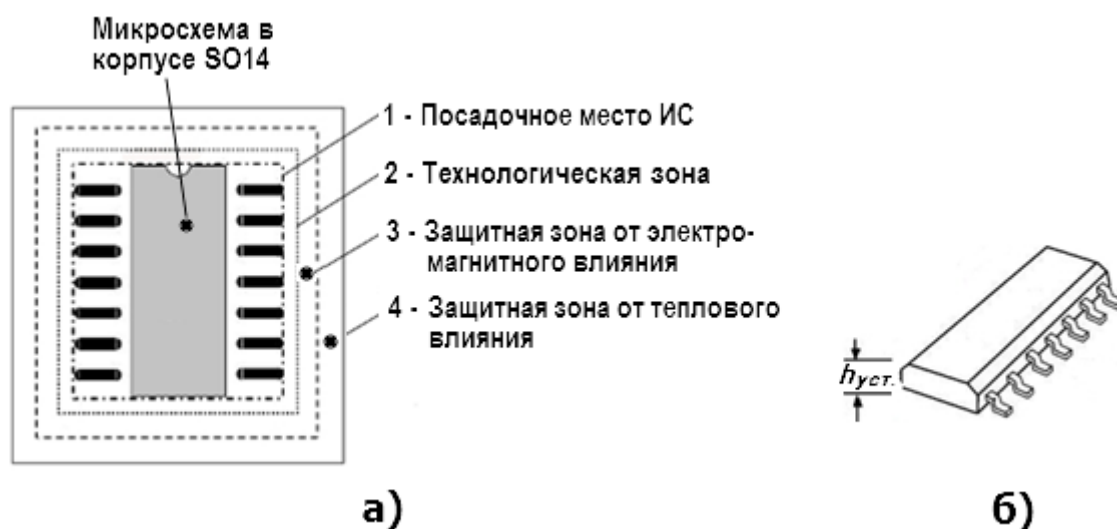


Рис. 3.3. Структура установочного поля ИС в корпусе SO14 (а), установочная высота корпуса SO14 (б)

Расчет защитных зон для уменьшения тепловых и электромагнитных влияний является специальной задачей, требующей использования компьютерного моделирования или выполнения сложных расчетов вручную, поэтому в данной теме не рассматривается. Размеры технологических зон зависят от технологии сборки и применяемого оборудования. Как правило, они приводятся в нормативно-технологической документации на сборку изделия.

Для выполнения компоновки устройства необходимо знать установочную высоту радиоэлемента $h_{уст}$ (рис. 3.2,б), так как от этого размера зависит величина зазора между соседними платами.

Посадочные места для конкретных типов компонентов могут быть получены следующими способами:

- путем расчета с учетом требований стандартов [3–11], в том числе используя специальные программы – калькуляторы [12];
- выбором готовых вариантов ПМ компонентов из стандартов и литературы [2, 3];
- в случае проектирования с помощью САПР – из встроенных библиотек моделей элементов и их посадочных мест.

После расчета $S_{МП}$ по формуле (3.1) или (3.2) определяют размеры платы, которые должны отвечать требованиям стандартов [13, 14].

3.2. Основы проектирования посадочных мест КМО

Установочные площадь и высота компонента монтируемого в отверстия (КМО) зависят не только от размеров самого радиоэлемента, но и от варианта его установки на плату. Поэтому перед проектированием ПМ необходимо для всех КМО выбрать варианты их установки. Для каждого из вариантов гибкие выводы РЭ должны быть определенным образом отформованы. В отечественной практике варианты формовки и установки (ВФУ) КМО на плату, а также требования к ним регламентируются стандартом [3]. В качестве примера на рис. 3.3 приведены наиболее распространенные варианты установки на плату радиоэлемента с двумя аксиальными выводами (резистор, конденсатор, диод, дроссель).



Рис. 3.3. Примеры установки КМО из стандарта [3]

На рис. 3.4 приведен пример посадочного места этого радиоэлемента. Минимальное требуемое расстояние между центрами монтажных отверстий L_y (установочный размер) для РЭ рассматриваемого вида рассчитывается по формуле:

$$L_y = L_B + 2L_0 + 2R + d, \text{ мм}$$

где L_B – максимальная длина корпуса, мм;
 L_0 – минимальный размер до места изгиба вывода, мм;
 R – радиус изгиба вывода, мм;
 d – номинальный диаметр вывода, мм.

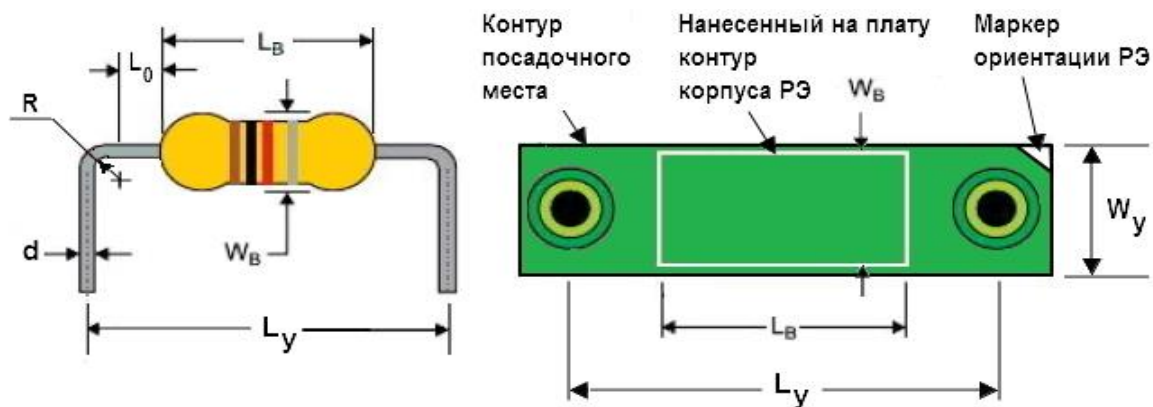


Рис. 3.4. Размеры и посадочное место КМО

Согласно [3] минимальный размер L_0 , мм, составляет:

- для резисторов, конденсаторов0,5;
- для микросхем и других РЭ в корпусах типа 41,0;
- для полупроводниковых приборов2,0;
- для дросселей3,5.

Другой минимальный размер – радиус изгиба выводов R , мм:

- для выводов диаметром/толщиной до 0,5 мм включительно.....0,5;
- для выводов диаметром/толщиной 0,5-1,0 мм включительно...1,0;
- для выводов диаметром/толщиной свыше 1,0 мм1,5.

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

Для всех типов радиоэлементов минимально допустимый размер от корпуса до места пайки – 2,5 мм (во избежании перегрева при пайке).

После вычислений центры отверстий должны быть помещены в ближайшие узлы стандартной координатной сетки, т.е. окончательные размеры по ГОСТ 29137-91 следует выбирать кратными шагу координатной сетки 2,5 или 1,25 мм. Основной шаг КС – 2,5 мм.

Установочные размеры L_y для рассмотренного вида РЭ можно определить по таблицам 2,3 [3]. Минимальный установочный размер W_y обычно принимают равным максимальному размеру W_B .

Стандартом [3] установлена система кодирования варианта формовки и установки КМО на плату. Каждый вариант имеет условное обозначение, структура которого содержит 13 цифр в пяти блоках (рис. 3.5).

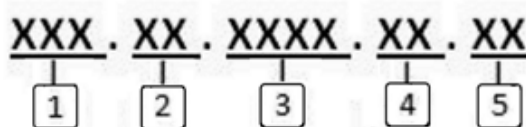


Рис. 3.5. Структура кода варианта формовки и установки КМО

Первый трехзначный блок обозначает ВФУ в соответствии с таблицей 1, приведенной в стандарте. Третий знак в этом блоке означает наличие (цифра 1) или отсутствие (цифра 0) дополнительного крепления РЭ (приклеивкой или др. способом).

Второй двухзначный блок – это номер чертежа в стандарте, на котором изображена установка РЭ.

Третий блок – шифр позиции согласно таблицам 2...11 стандарта.

Четвертый блок – глубина формовки вывода. Левая цифра в этом коде обозначает единицы, а правая – десятые доли миллиметра.

Пятый блок – кодируется наличие дополнительной формовки выводов: опорный зиг (рис. 1, а) – 01, зиг-замок (рис. 1, в) – 02, замок (рис. 1, б) – 03.

Пример записи ВФУ радиоэлементов на сборочном чертеже печатного узла, имеющих в спецификации позиции 1, 2, 3, приведен на рис. 3.6.

*Установку производить по ГОСТ 20137:
поз. 1 – вариант 140.08.0403.00.02
поз. 2 – вариант 301.20.0000.00.00
поз. 3 – вариант 370.24.1303.13.00*

Рис. 3.6. Пример записи ВФУ на сборочном чертеже

Если используется нестандартный вариант установки РЭ на плату, тогда на поле сборочного чертежа печатного узла помещается эскиз его установки с необходимыми размерами и указаниями.

3.3. Основы проектирования посадочных мест КМП

Компоненты, монтируемые на поверхность, как правило, имеют значительно меньшие размеры, чем компоненты монтируемые выводами в отверстия. К тому же их монтаж на печатную плату осуществляется преимущественно с помощью высокопроизводительных автоматов. Все это делает очень важным правильный учет всех допусков при проектировании посадочных мест для КМП. От этого зависит качество сборки и надежность изделия.

В системе стандартов ИРС (ИРС-7351В) вопросы проектирования ПМ рассматриваются с упором на уровни плотности печатных плат (их всего три). Для сравнения на рис. 3.6 приведены три фрагмента узла с разными уровнями плотности монтажа.

Пойдя по аналогичному пути, в отечественных ГОСТ Р МЭК 61188 также установлено три уровня плотности монтажа с аналогичными свойствами. Однако одновременно с этим действует отечественный

стандарт [13], который устанавливает для печатных плат 7 классов точности. Понятно, что каждый класс точности обуславливает определенную потенциальную плотность печатного монтажа.



Рис. 3.6. Уровни плотности монтажа

Деление на три класса по плотности позволяет производителю осуществить оптимальный выбор геометрии контактных площадок и, тем самым, повысить выход годной продукции в каждом классе изделий.

Уровень плотности 1.

Увеличение размеров КП позволяет повысить производительность при сборке, повысить прочность соединений (в основном она определяется объемом припоя), но при этом увеличиваются размеры изделия. Использование максимальных размеров посадочного места в изделиях, для которых плотность монтажа не критична, позволяет без проблем использовать пайку волной или оплавлением при монтаже корпусов почти всех известных типов.

Уровень плотности 3.

Для изделий с умеренным уровнем плотности размещения компонентов рассматривается использование усредненной геометрии посадочного места. Усредненные посадочные места, разработанные для широкой номенклатуры компонентов, позволяют обеспечить надежный контакт припоя для процессов пайки оплавлением. Однако для монтажа без выводных чипов и компонентов с выводами типа "крыло чайки" могут успешно использоваться процессы пайки волной или пайки оплавлением.

Уровень плотности 3.

При высокой плотности размещения компонентов, типичной для портативных и переносных изделий, допускается рассматривать мини-

мальные размеры геометрии посадочного места. Выбор минимальной геометрии посадочного места, возможно, не является подходящим для всех категорий использования изделия.

Анализ стандартов [3–11] позволил выявить конструктивные параметры, требующие расчета при разработке посадочных мест:

Z , X – длина и ширина посадочного места;

G – расстояние между контактными площадками посадочного места;

L , B – длина и ширина вывода компонента;

H – длина компонента;

S – расстояние между торцевыми контактами компонента;

J – желательный размер галтели припоя или выступа контактной площадки;

J_T – галтель припоя или выступ контактной площадки на носке;

J_H – галтель припоя или выступ контактной площадки на пятке;

J_S – галтель припоя или выступ контактной площадки сбоку;

C – допуски компонента;

C_L – допуск на длину компонента;

C_S – допуск на расстояние между выводами компонента;

C_W – допуск на ширину компонента;

F – технологические допуски на печатную плату (геометрия посадочного места);

P – допуск установки компонента (точность оборудования установки).

Обычно исходные данные для проектирования ПМ берут из документации производителя компонента, либо из стандарта JEDEC. В качестве примера, возьмем корпус типа SOIC. Основные его размеры показаны на рис. 3.7 и рис. 3.8.

Параметры Z , G , и X – это основные параметры, которые необходимы для создания посадочного места. При их расчете необходимо использовать среднеквадратичные значения допусков (F , P , C).

Кроме того, при разработке посадочного места помимо описанных выше параметров для достижения наилучшего паяного соединения необходимо учитывать при разработке: паяльную маску, трафарет паяльной пасты, расстояние между соседними компонентами, расстояние между основанием компонента и поверхностью печатной платы (если необходимо), запретные области (если необходимо), соответствующие правила при применении клея.

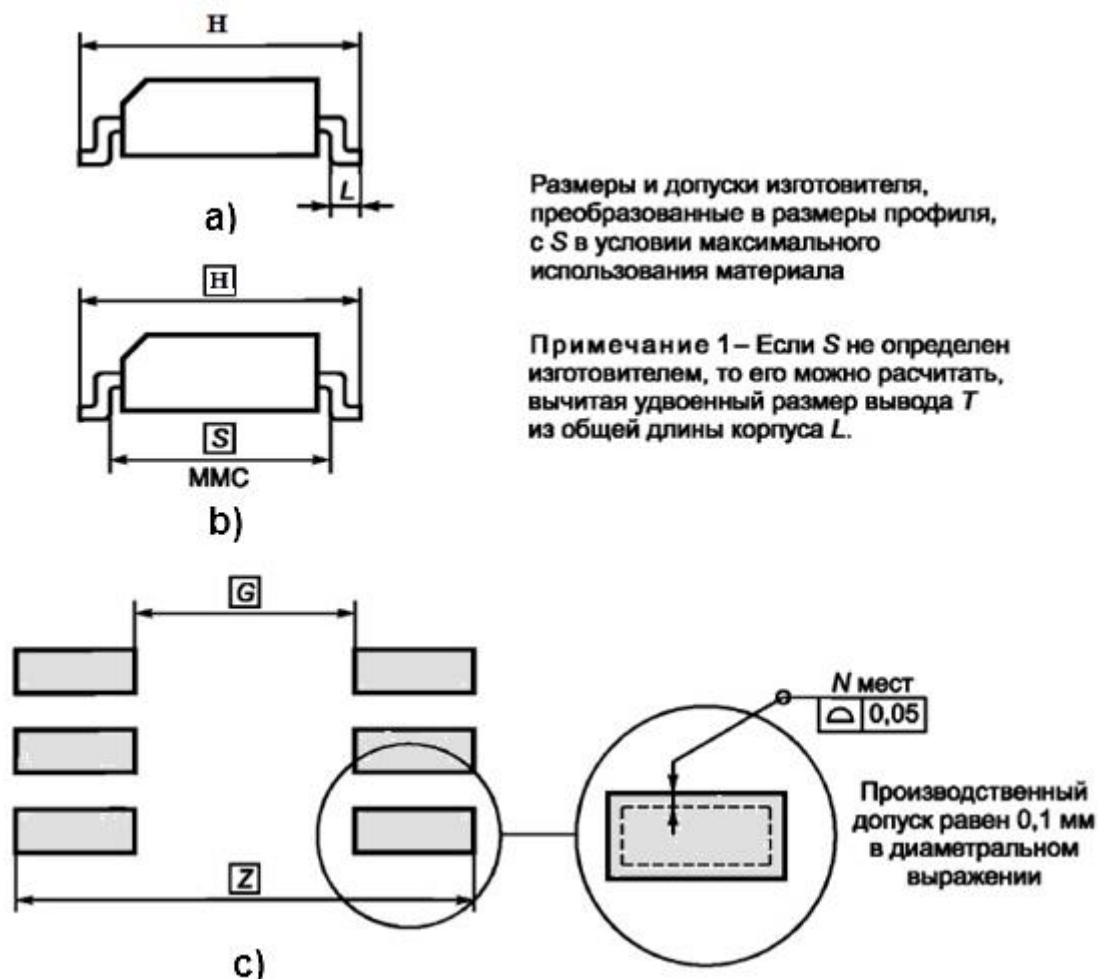


Рис. 3.7. Производственные размеры корпуса SOIC

Формулы для расчета основных размеров ПМ приведены в стандартах IPC-7351/ ГОСТ Р МЭК 61188.

Большое значение для обеспечения качества и надежности поверхностного монтажа имеет геометрия контактных площадок. Их совокупность на посадочном месте принято называть стек. Как видно на рис. 3.6 контактная площадка должна быть больше, чем размер ножки вывода микросхемы. Необходимое превышение размера КП приведено в стандарте IPC-7353 (стр. 8-14). Виды припусков размеров КП показаны на рис. 3.8.



Рис. 3.8.

Значения размеров J_T , J_H , J_S зависят от типа компонента и требуемого уровня плотности платы. Для корпуса на рис. 3.7 можно принять следующие значения:

- для первого уровня $J_T = 0,55$ мм, $J_H = 0,45$ мм, $J_S = 0,05$ мм;
- для второго уровня $J_T = 0,35$ мм, $J_H = 0,35$ мм, $J_S = 0,03$ мм;
- для третьего уровня $J_T = 0,15$ мм, $J_H = 0,25$ мм, $J_S = 0,01$ мм.

Формулы для расчета размеров КП приведены в стандартах IPC-7351/ГОСТ Р МЭК 61188.

3.4. Компьютерные средства проектирования ПМ

Практически все известные системы автоматизированного проектирования печатных плат имеют в своем составе редакторы для проектирования посадочных мест. Разработанные с их помощью ПМ хранятся в базе данных системы и могут использоваться многократно по мере надобности. Однако появление всё новых типов компонентов в применении требует время от времени вести разработку новых посадочных мест для удовлетворения потребностей в разработке современных ЭС.

Все еще находящаяся в использовании старая система проектирования печатных плат P-CAD не отвечает всем требованиям стандартов IPC-7351/ГОСТ Р МЭК 61188. В качестве примера одного из ее недостатков рассмотрим результат проектирования в редакторе PCB Editor посадочного места для корпуса SOIC-8. Скриншот этого посадочного места представлен на рис. 3.9. Вокруг его контура (Place Boundary) не предусмотрен запас, который позволил бы размещать компоненты вплотную, как показано на рис. 3.10, а. Вместо этого их приходится располагать с достаточно большим зазором, как показано на рис. 3.10, в.

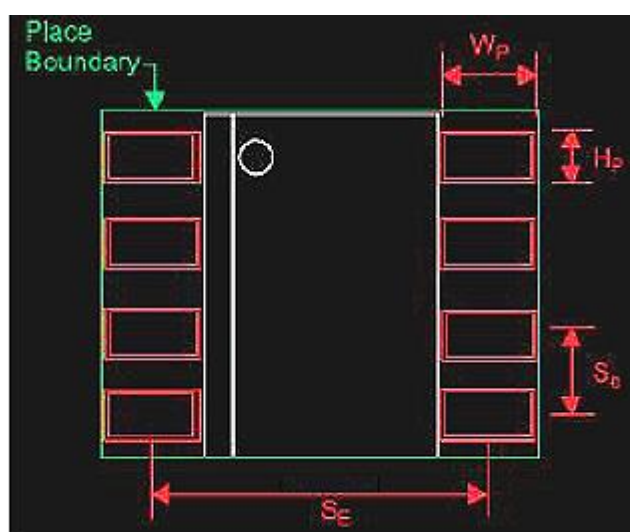


Рис. 3.9. Посадочное место SOIC-8, разработанное в PCB Editor

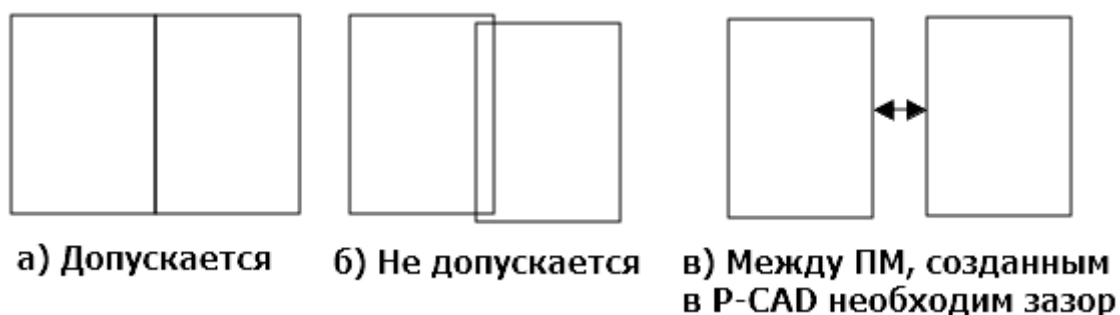


Рис. 3.10. Размещение компонентов на плате

Современные САПР не имеют рассмотренного недостатка. На рис. 3.11 приведено сравнение размеров посадочных мест, разработанного в PCB Editor и ПМ отвечающего требованиям стандартов IPC-7351/ ГОСТ Р МЭК 61188. Увеличение размеров ПМ позволяет при размещении компонентов на плате устанавливать их вплотную, как показано на рис. 3.10, а. В целом, это более удобно при проектировании платы и позволяет несколько повысить плотность элементов на ней.

Величина расширения зависит от требуемого уровня плотности платы. В стандарте IPC-7351 (табл. 2, 3-14) приведены рекомендуемые величины расширений в зависимости от типа корпуса компонента и уровня плотности платы А, В, С (1, 2, 3).

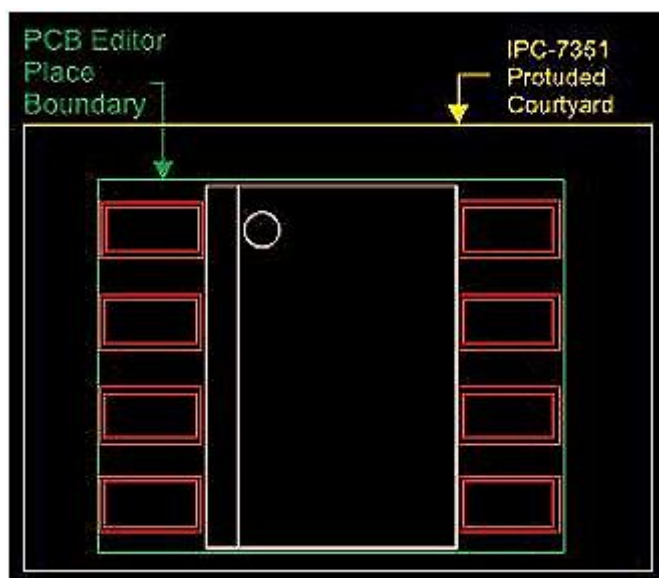


Рис. 3.11. Сравнение размеров ПМ, полученных в разных редакторах

Примеры программных средств разработки ПМ, отвечающих стандарту IPC-7351B:

LP Wizard – разработчик Mentor Graphic Corp.;

OrCAD Library Builder – разработчик Cadence Design;

PCB Library Expert – позволяет легко создавать футпринты из справочных данных на компонент (DataSheet), и сохранять их в формате всех основных САПР (имеется бесплатная Lite версия);

CompBox – входит в отечественную систему ГРИФ-4, автоматически формирует ПМ в соответствии с рекомендациями стандартов IPC.

IPC-7351 LP – компьютерная программа, прилагаемая к стандарту IPC-7351B, позволяет просматривать библиотеки посадочных мест под разные компоненты, рассчитывать размеры контактных площадок. Программа является условно бесплатной, находится на сайте www.ipc.org в разделе «PCB Tools Calculators» (Инструменты и расчеты PCB).

3.5. Рекомендуемая литература и стандарты

1. Конструирование радиоэлектронных средств / В. Ф. Борисов, О. П. Лавренов, А. С. Назаров А. Н. Чекмарев; Под ред. А. С. Назарова – М.: изд. МАИ, 1996.

2. Пирогова, Е.В. Проектирование и технология печатных плат: Учебник. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005, – 560 с.

3. ГОСТ 29137-91. Формовка выводов и установка изделий электронной техники на печатные платы. Общие требования и нормы конструирования.

4. http://www.topline.tv/lang/ru/products_russian.htm

5. ГОСТ Р МЭК 61188-5-1-2013. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-1. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Общие требования. Введ. с 01.07.2013. – М.: Стандартинформ, 2015. – 61 с.

6. ГОСТ Р МЭК 61188-5-2-2013. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-3. Общие требования. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Дискретные компоненты. Введ. с 01.03.2015. – М.: Стандартинформ, 2014. – 27 с.

7. ГОСТ Р МЭК 61188-5-3-2013. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-3. Общие требования. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Компоненты с J-образными выводами с двух сторон. Введ. с 01.03.2015. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

8. ГОСТ Р МЭК 61188-5-4-2013. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-4. Общие требования. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Компоненты с выводами в виде "крыла чайки" с двух сторон. Введ. с 01.03.2015. – М.: Стандартинформ, 2014. – 42 с.

9. ГОСТ Р МЭК 61188-5-5-2013. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-5. Общие требования. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Компоненты с выводами в виде "крыла чайки" с четырех сторон. Введ. с 01.03.2015. – М.: Стандартиформ, 2014. – 41 с.

10. ГОСТ Р МЭК 61188-5-6-2013. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-6. Общие требования. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Компоненты с J-образными выводами с четырех сторон. Введ. с 01.03.2015. – М.: Стандартиформ, 2014. – 15 с.

11. ГОСТ Р МЭК 61188-5-8-2013. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-8. Общие требования. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Компоненты с матрицей контактов (BGA, FBGA, CGA, LGA). Введ. с 01.03.2015. – М.: Стандартиформ, 2014. – 23 с.

12. <https://printedboards.ru/programs> – Набор калькуляторов для расчета посадочных мест, контактных площадок, проводников и др.

13. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции.

14. ГОСТ 10317-79 Платы печатные. Основные размеры.

ТЕМА 4. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

4.1. Краткие теоретические сведения

Принятие в процессе проектирования любого технического решения (выбор элементной базы, радиотехнических и конструкционных материалов, структуры изделия или в общем случае некоторого объекта) основано на анализе и оценке возможных решений и выборе лучшего. Ввиду того, что техническое решение (объект), как правило, характеризуется совокупностью отдельных (дифференциальных) параметров, то его оценка производится с помощью комплексного показателя качества.

Комплексный показатель качества для каждого объекта записывается в виде:

$$Q = \sum_{i=1}^n \varphi_i \alpha_i^*, \quad (4.1)$$

где φ_i – весовые коэффициенты (коэффициенты значимости), определяющие значимость дифференциальных показателей качества; α_i^* – нормированные значения показателей качества; n – число дифференциальных показателей качества.

Для вычисления значения Q по выражению (4.1) необходимо:

- обосновать группу объектов, из которых производится выбор, и дифференциальные показатели качества $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$;
- привести влияние дифференциальных показателей на качество объекта к одной общей тенденции: повышения или понижения качества;
- произвести нормирование дифференциальных показателей;
- обосновать значения весовых коэффициентов.

Выбор дифференциальных показателей качества α_i , в число которых могут входить функциональные и материальные параметры объекта, производится в интересах обеспечения требований ТЗ к показателям качества проектируемого изделия.

Приведение влияния выбранных дифференциальных показателей на качество объекта к одной тенденции состоит в замене на обратные величины показателей, воздействие которых на качество объекта противоположно большинству дифференциальных показателей.

Нормирование дифференциальных показателей может быть выполнено по следующим формулам:

$$\alpha_i^* = (\alpha_{i \max} - \alpha_i) / \alpha_{i \max}, \quad (4.2)$$

$$\alpha_i^* = \alpha_i / \alpha_{i \max}, \quad (4.3)$$

$$\alpha_i^* = \alpha_i / \alpha_{i \text{ ТЗ}}, \quad (4.4)$$

где $\alpha_{i \max}$ – максимальное из значений i -го дифференциального показателя для сравниваемых элементов, $\alpha_{i \text{ ТЗ}}$ – значение дифференциального показателя, оговоренное в ТЗ.

В инженерной практике нормирование дифференциальных показателей обычно выполняется по формулам (4.2) и (4.3).

Весовые коэффициенты φ_i подчеркивают значимость того или иного дифференциального показателя качества объекта по отношению к показателям качества проектируемого изделия. Выбор весовых коэффициентов производится из условия

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i = k$$

где k – некоторое целое число. Обычно полагают $k = 1, 10, 100$ и т.д.

Определение весовых коэффициентов осуществляется одним из следующих методов:

1. Директивный
2. Статический
3. Стоимостной
4. Аналитический
5. Эвристический.

К директивному методу относятся все случаи, когда весовые коэффициенты назначаются заказчиком, вышестоящей организацией и т.п.

Статические методы нахождения φ_i могут быть применены при достаточно большом опыте проектирования систем аналогичного назначения. За весовой коэффициент принимается степень приближения i -го показателя к эталону. Это значение вычисляется как среднее арифметическое при обработке большого количества вариантов готовых изделий.

При использовании стоимостного метода значения φ_i определяются по формуле:

$$\varphi_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i$$

где C_i – денежные или трудовые затраты для получения i -го свойства.

Стоимостной метод теоретически самый универсальный, однако трудности дифференцирования затрат на каждый показатель, особенно на ранних стадиях проектирования, значительно ограничивает его использование на практике.

Аналитические методы основываются на использовании только информации, что содержится в самих значениях показателей и допустимых областей их применения.

Широкое распространение в практике разработки изделий находят эвристические методы. Они связаны с учётом мнений групп экспертов, то есть это способы принятия решений, использующие обобщённый человеческий опыт.

Во многих случаях выбора элементной базы важнейшими дифференциальными показателями качества являются материальные параметры изделия (масса, объем и др.). Эти параметры необходимо предварительно рассчитать с помощью коэффициентов дезинтеграции:

$$m_k = m_{эл} \cdot q_{m1} \cdot n \cdot q_{m2},$$

$$V_k = V_{эл} \cdot q_{V1} \cdot n \cdot q_{V2},$$

где $m_{эл}$, $V_{эл}$ – соответственно суммарные масса и объем элементов, размещенных на плате функционального узла (модуля); n – число функциональных узлов в конструкции изделия; q_{m1} , q_{m2} – соответственно коэффициенты дезинтеграции массы «радиоэлемент – функциональный узел (модуль)», «функциональный узел (модуль) – блок»; q_{V1} , q_{V2} – то же для объемов.

Число функциональных узлов (модулей) определяется после решения задачи разукрупнения схемы. Значения коэффициентов дезинтеграции приведены в приложении Д.

Критерий комплексного показателя качества является универсальным. Тем не менее, часто при обосновании выбора элементной базы используются стоимостные показатели [1], которые также относятся к материальным параметрам.

При выборе ЭБ рекомендуется отдавать предпочтение радиоэлементам, предназначенным для монтажа на поверхность, так называемым чип или SMD компонентам.

4.2. Примеры применения комплексной оценки качества

Пример 1. Выбор серии ИС для проектируемого устройства

Выбрать лучшую серию ИС из трех серий, характеризующихся следующими дифференциальными показателями качества: тактовая частота f_T , МГц; статическая помехоустойчивость U_{nx} , В; коэффициент разветвления по выходу n ; количество типов ИС в серии k ; стоимость основного элемента $C_{ис}$, руб.; прогнозируемая масса устройства, построенного с использованием ИС данной серии, m , кг.

Численные значения этих показателей и значения весовых коэффициентов, назначенных из условия $\sum_{i=1}^n \varphi_i = 1$, приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Серия ИС	f_T , МГц	U_{nx} , В	n	k	$C_{ис}$, руб	m , кг
1	1,5	0,5	10	8	5	5
2	3,0	0,4	7	12	8	3
3	1,0	0,4	4	9	10	7,1
ϕ_i	0,35	0,15	0,15	0,05	0,05	0,25

Выбираем тенденцию повышения качества серии при увеличении каждого из дифференциальных показателей. Чтобы привести все дифференциальные показатели к этой тенденции величины $C_{ис}$ и m заменяем обратными величинами и заносим в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Серия ИС	f_T , МГц	U_{nx} , В	n	k	$(C_{ис}, \text{руб})^{-1}$	$(m, \text{кг})^{-1}$
1	1,5	0,5	10	8	0,2	0,2
2	3,0	0,4	7	12	0,125	0,33
3	1,0	0,4	4	9	0,1	0,14
ϕ_i	0,35	0,15	0,15	0,05	0,05	0,25

Нормирование показателей произведем по формуле (4.3). Нормированные показатели качества серий ИС приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Серия ИС	f_T	U_{nx}	n	k	$(C_{ис}, \text{руб})^{-1}$	$(m)^{-1}$
1	0,5	1,0	1,0	0,67	1,0	0,61
2	1,0	0,8	0,7	1,0	0,63	1,0
3	0,33	0,8	0,4	0,75	0,5	0,43

Определяем величины комплексных показателей качества для каждой из серий ИС

$$Q_1 = 0,35 \cdot 0,5 + 0,15 \cdot 1,0 + 0,15 \cdot 1,0 + 0,05 \cdot 0,76 + 0,05 \cdot 1,0 + 0,25 \cdot 0,6 = 0,713;$$

$$Q_2 = 0,35 \cdot 1,0 + 0,15 \cdot 0,8 + 0,15 \cdot 0,7 + 0,05 \cdot 1,0 + 0,05 \cdot 0,63 + 0,25 \cdot 1,0 = \underline{0,906};$$

$$Q_3 = 0,35 \cdot 0,33 + 0,15 \cdot 0,8 + 0,15 \cdot 0,4 + 0,05 \cdot 0,75 + 0,05 \cdot 0,5 + 0,25 \cdot 0,43 = 0,46.$$

Из сравнения комплексных оценок серий ИС следует, что предпочтение должно быть отдано второй серии.

Пример 2. Выбор лучшего конструктивно-технологического варианта бортового устройства [1]

Для блока бортового назначения выбрать лучший вариант из двух:

- на печатных платах с корпусированными ИС;
- на бескорпусных микросборках (МСБ).

Для сравнения конструкций используем комплексный показатель вида:

$$Q = \varphi_m m_0 + \varphi_v V_0 + \varphi_\lambda \lambda_0 + \varphi_P P_0 + \varphi_C C_0,$$

где m_0 , V_0 , λ_0 , C_0 – нормированные значения материальных параметров: массы, объема, интенсивности отказов и стоимости.

Принимаем следующие значения коэффициентов значимости $\varphi_m=0,9$; $\varphi_v=\varphi_\lambda=0,8$; $\varphi_C=0,4$.

Учитывая, что при выборе варианта на микросборках масса уменьшится в 3 раза, объём – в 5 раз, частота отказов – в 2 раза, а стоимость увеличится в 3 раза, определим нормативные материальные показатели. В варианте на печатных платах они все будут равны 1 (сами относительно себя), а во втором варианте:

$$m_0=0,33; V_0=0,2; \lambda_0=0,5; C_0=4.$$

Определяем значения Q_1 и Q_2 :

$$Q_1 = 1 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,3 = 2,8$$

$$Q_2 = 0,33 \cdot 0,9 + 0,2 \cdot 0,8 + 0,5 \cdot 0,8 + 3 \cdot 0,3 = \underline{1,757}$$

Вывод: конструкция на микросборках является лучшим вариантом.

4.3. Рекомендуемая литература

1. Конструирование радиоэлектронных средств / В. Ф. Борисов, О. П. Лавренов, А. С. Назаров А. Н. Чекмарев; Под ред. А. С. Назарова – М.: изд. МАИ, 1996.

2. Конструирование блоков бортовой авиационной аппаратуры связи: Учебное пособие / Е.Л. Белоусов, М.Н. Ушкар / НГТУ, Нижний Новгород, 2005, 237 с.

ТЕМА 5. РАЗРАБОТКА КОМПОНОВКИ БЛОКА ЭЛЕКТРОННОГО СРЕДСТВА

5.1. Цель практического занятия:

Приобретение студентом практических навыков в разработке внутренней компоновки блока электронного средства.

5.2. Исходные данные для выполнения работы

В качестве исходных данных берется задание на выполнение курсового проекта (КП) по дисциплине: "Основы конструирования ЭС". Результаты работы рекомендуется использовать при выполнении КП.

5.3. Краткие сведения о компоновке блоков

Компоновка блока – взаимное расположение и ориентация печатных узлов (модулей) и других конструктивных элементов в заданном объеме блока.

Компоновка – это свойство (характеристика) изделия, а процесс ее разработки обозначается термином "компонование".

Компонование является сложной многокритериальной задачей существенно влияющей на получаемые характеристики изделия! Это одна из немногих творческих задач, решаемых конструктором в своей деятельности.

Различают *внутреннюю* и *внешнюю* компоновку изделия.

Цель внутреннего компонования блока – оптимальное размещение составных частей различных структурных уровней с учетом обеспечения необходимых массогабаритных показателей, электромагнитной совместимости, нормального теплового режима, стойкости к механическим воздействиям, обеспечения производственной и эксплуатационной технологичности конструкции (удобство сборки, электромонтажа и ремонта изделия). Кроме этого к компоновке изделия могут предъявляться специальные требования, которые приводятся в ТЗ на его разработку или обуславливаются его назначением. Это могут быть требования к форме корпуса, размещению отдельных компонентов, узлов и модулей в корпусе изделия и на его панелях и др. Более подробно особенности компоновки различных видов ЭС приведены в [3], компоновка бортовых ЭС – в [2]. В [1] даны общие рекомендации по выполнению компоновки блоков ЭС.

Основная задача внешней компоновки блока – размещение средств индикации, устройств коммутации и органов управления на панелях корпуса блока с учетом требований эргономики и технической эстетики. Данная задача актуальна, если аппаратура обслуживается человеком-оператором.

Блоки ЭС, а также печатные узлы и модули, могут иметь *регулярную* или *нерегулярную (произвольную)* структуру. Принцип регулярной компоновки блока: платы одинакового размера устанавливаются в блоке параллельно друг другу с одинаковым шагом. Регулярная компоновка блоков и печатных узлов (ПУ) характерна для цифровых ЭС третьего поколения, где использовалось большое число ИС малой и средней степеней интеграции. В настоящее время такая компоновка ПУ встречается редко, т.к. основой элементной базы современных ЭС являются БИС и СБИС, помещенные в разные по геометрии корпуса.

Блоки с нерегулярной структурой характеризуются большим числом вариантов компоновочных схем, т.к. ПУ в них могут иметь неодинаковые размеры и формы, по-разному ориентируются в пространстве, могут иметь разные величины зазоров между платами и т.д.

Как правило, задача первоначальной компоновки блока нерегулярной структуры состоит в генерации нескольких вариантов компоновочных схем, их сравнительном анализе и выборе наилучшего. Проще всего эту задачу можно выполнить, ориентируясь на наиболее удачные и перспективные решения, выявленные в результате анализа аналогичных конструкций ЭС.

Различают следующие способы компонования:

- аналитический,
- модельный,
- натурный.

Целью выполнения аналитической компоновки является определение и расчет компоновочных параметров изделия – объема, массы, площади и др.

В процессе модельного компонования выполняют размещение моделей деталей и узлов на плоскости или в пространстве. Моделями оперирует либо специальная компьютерная программа, либо разработчик в пределах заданного контура изделия (блока, стойки, платы и т.д.) с целью получения наилучшего результата.

Натурная компоновка отличается от модельной компоновки тем, что оперирует реальными частями изделия, а не их моделями. Используется при компоновании макетов с целью определения тепловых и электрических связей и т.д.

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

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

Результаты компонования могут быть представлены:

- 1) детально в виде сборочного чертежа или в виде 3D-модели завершеного изделия (пример приведен на рисунке 5.1);
- 2) упрощенно в виде компоновочного эскиза;
- 3) в виде натурного макета.

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

Существуют типовые варианты компоновки ЭС, такие как разъемная, книжная, этажерочная, мезонинная и др. Их особенности, характеристики и рекомендуемые области применения рассмотрены в [3].

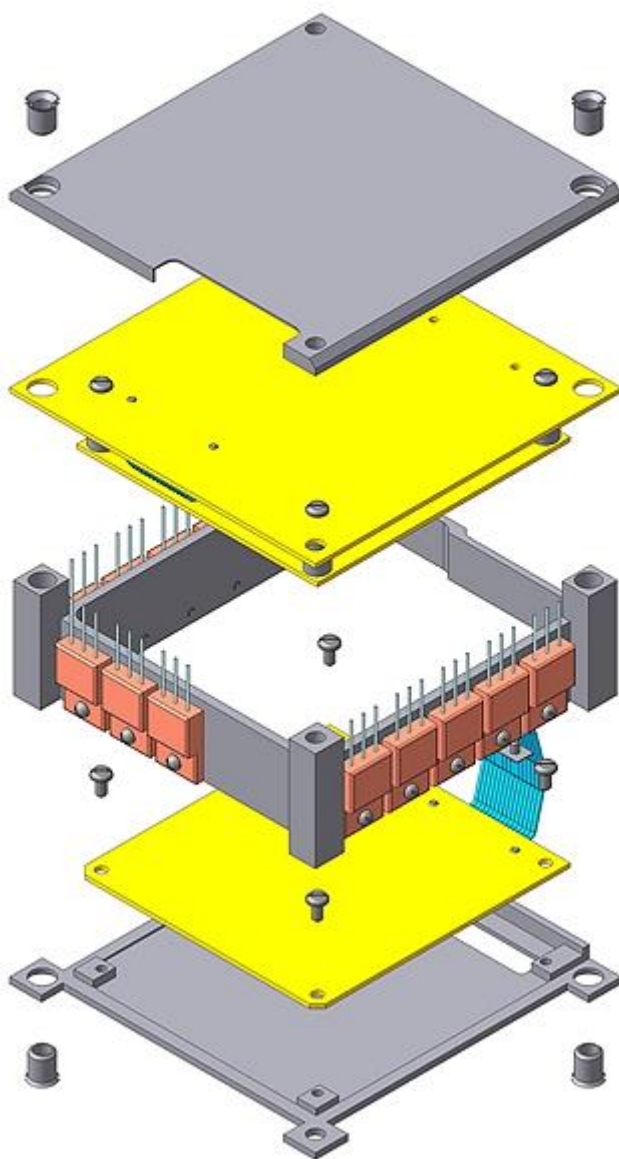


Рис. 5.1. 3D модель бортового блока питания (в разборе)

5.5. Требования к отчету по практической работе

Отчет должен содержать:

- Титульный лист
- Цель работы
- Исходные данные (можно приложить ксерокопию исходных данных, выданных для выполнения КП)
- Обоснование типа компоновки блока (разъемная, неразъемная и т.д.)
- Не менее двух вариантов компоновки блока, выбор наилучшего среди них
- Обоснование величин зазоров и других размеров на компоновочном эскизе
- Расчет габаритных размеров блока
- Список использованных в работе источников (учебников, пособий, сайтов и др.).

5.5. Пример выполнения компоновки блока тестирования аккумуляторов БТА

Исходные данные

Согласно ТЗ блок тестирования аккумуляторов БТА должен быть выполнен в виде настольного пульта.

В результате анализа ТЗ определены требования к компоновке БТА:

- на лицевой панели БТА должны располагаться: дисплей, единичные индикаторы и отсек для установки аккумуляторов;
- к блоку не предъявляются жесткие требования по массогабаритным параметрам, поэтому для упрощения его сборки и ремонта целесообразно использовать разъемный вариант конструкции.

Электрическая схема БТА разукрупнена с учетом требования функциональной завершенности КТЕ на три печатных узла:

- плата измерения температуры аккумуляторов (ПУ1);
- плата индикации (ПУ2);
- плата микроконтроллера (ПУ3).

Компонование блока

Перед компонованием БТА предварительно сделан анализ, который позволил установить следующее:

- в соответствии с назначением изделия требования к его массогабаритным характеристикам невысокие;
- ориентация печатных плат с точки зрения обеспечения механической прочности и теплового режима не играет особой роли, т.к. изделие предназначено для эксплуатации в отапливаемом помещении с

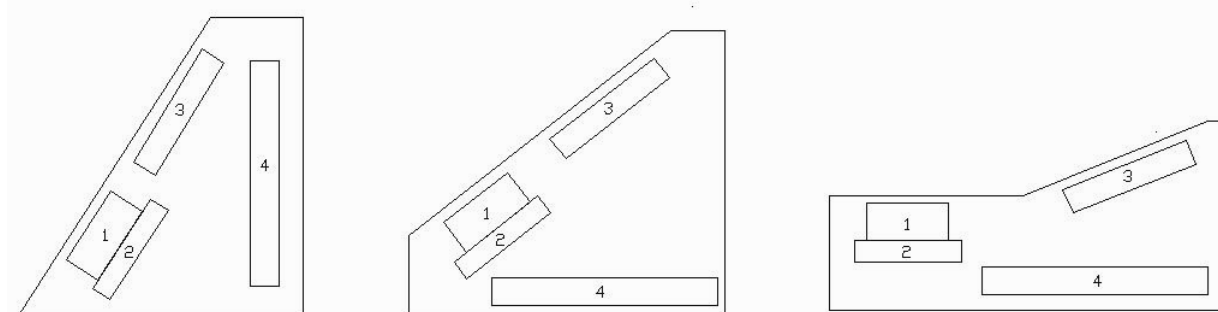
установкой на рабочем столе, а платы имеют небольшие мощности рассеяния;

- плата ПУ1 должна примыкать ко дну аккумуляторного отсека, так как на ней расположены контактные датчики для измерения температур аккумуляторов;

- для исключения взаимного температурного влияния аккумуляторов и соседних РЭ отсек должен иметь теплоизолирующие перегородки;

- для удобства считывания показаний индикаторов лицевую панель необходимо выполнить с наклоном относительно горизонтальной плоскости.

В проекте предложены три варианта компоновки БТА (рисунок 5.2). Чтобы показать только «идею» его компоновки были выполнены по одной проекции каждого варианта, однако в других случаях, как правило, необходимо выполнение большего числа проекций.



а)

б)

в)

1 – отсек для аккумуляторов; 2 – плата измерения температуры;
3 – плата индикации; 4 – плата микроконтроллера

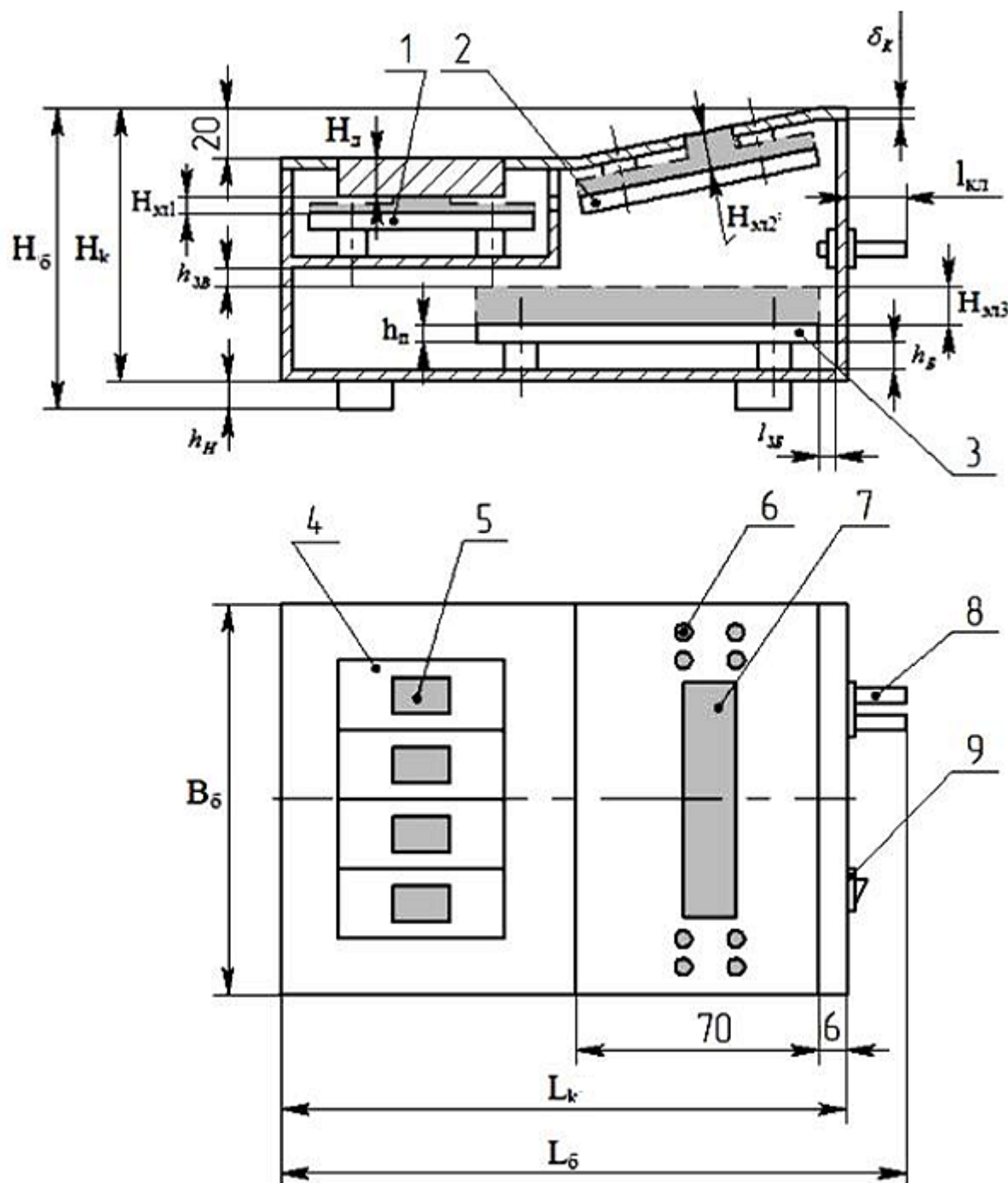
Рис. 5.2. Эскизы вариантов компоновки БТА

Путем анализа был выбран вариант, изображенный на рисунке 5.2, в. Обоснование выбора:

- в этом случае обеспечивается наибольшая устойчивость блока на поверхности стола;

- отсек 1 расположен горизонтально, что предотвратит выпадение вставленных в него аккумуляторов без использования дополнительного крепления (аккумуляторы будут фиксироваться с помощью пружинных электрических контактов).

Эскиз компоновки БТА выполнен в двух проекциях без соблюдения масштаба, но с указанием всех необходимых размеров (рис. 5.3).



1 – плата измерения температуры; 2 – плата индикации; 3 – плата микроконтроллера; 4 – отсек аккумуляторов; 5 – микросхемы измерения температуры (для них в корпусе отсека аккумуляторов сделаны прямоугольные вырезы для того, чтобы они контактировали с аккумуляторами); 6 – светодиоды индикации зарядки-разрядки; 7 – дисплей; 8 – клеммный соединитель питания; 9 – выключатель питания.

Рис. 5.3. Компоновочный эскиз блока

Расчет габаритных размеров БТА

Для расчета были приняты следующие значения зазоров и других размеров:

- толщина всех плат $h_{\text{п}}=1,5$ мм;
- воздушный зазор между наиболее высоким элементом на плате микроконтроллера и аккумуляторным отсеком назначен исходя из недопустимости их касания, $h_{\text{зв}} = 4$ мм;
- высота ножек (опор) $h_{\text{н}} = 4$ мм;
- толщина стенок корпуса без учета локальных утолщений типа рёбер жёсткости, приливов и др. $\delta_{\text{к}}=1$ мм;
- высота бобышек должна позволять надежно закреплять платы ПУ1 и ПУ3 с помощью винтов М3, $h_{\text{б}} = 8$ мм;
- для платы индикации высота стоек определяется самым высоким индикатором, $h_{\text{с}} = 11$ мм);
- боковые зазоры, назначаемые из условия удобства сборки и монтажа блока, везде должны быть $l_{\text{зб}} = 5$ мм.

Расчет.

Определяем длину $L_{\text{к}}$, ширину $B_{\text{к}}$ и высоту $H_{\text{к}}$ кожуха блока:

$$L_{\text{к}}=L_{\text{х1}}+3l_{\text{зб}}+2\delta_{\text{к}}+70+6=60+3\cdot5+2\cdot1+70+6=153 \text{ мм};$$

$$B_{\text{к}}=L_{\text{у3}}+2l_{\text{зб}}+2\delta_{\text{к}}=115+2\cdot5+2\cdot1=127 \text{ мм};$$

$$H_{\text{к}}=2h_{\text{б}}+2h_{\text{п}}+2\delta_{\text{к}}$$

$$+h_{\text{зв}}+H_{\text{эл3}}+H_{\text{эл1}}+H_{\text{д}}+20=2\cdot8+2\cdot1,5+2\cdot1+4+23+9+11+20=88 \text{ мм},$$

где $H_{\text{д}}$ – высота отсека аккумуляторов.

Габаритные размеры блока определяем с учетом наличия выступающих частей:

$$L_{\text{б}}=L_{\text{к}}+l_{\text{кл}}=153+24=177 \text{ мм},$$

где $l_{\text{кл}}$ – выступающая часть клеммного соединителя;

$$B_{\text{б}}=B_{\text{к}}=127 \text{ мм};$$

$$H_{\text{б}}=H_{\text{к}}+h_{\text{н}}=89+4=93 \text{ мм},$$

где $h_{\text{н}}$ – высота ножек (опор).

Получены габаритные размеры блока: $L_{\text{б}}=177$ мм, $B_{\text{б}}=127$ мм, $H_{\text{б}}=93$ мм.

5.6. Рекомендуемая литература

1. Конструирование электронных средств: учеб. пособие / В.Ф. Борисов [и др.]; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2013. – 111 с.

2. Е.Л.Белоусов, М.Н.Ушкар Конструирование блоков бортовой авиационной аппаратуры связи. Учебное пособие / Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, 2005. - 237 с.

3. Конструирование радиоэлектронных средств / В. Ф. Борисов, О. П. Лавренов, А. С. Назаров А. Н. Чекмарев; Под ред. А. С. Назарова – М.: изд. МАИ, 1996.

ТЕМА 6. ВЫБОР СПОСОБА ОХЛАЖДЕНИЯ

6.1 Цель практического занятия:

освоить методику выбора способа охлаждения (СО) электронного средства (ЭС), используемую на ранних стадиях проектирования.

6.2. Методика выбора способа охлаждения

Охлаждение необходимо любому активному электронному средству для обеспечения ему нормального теплового режима (НТР). Известно много способов охлаждения, среди которых самым простым, дешевым и надежным является естественное воздушное охлаждение (ЕВО). Однако возможности ЕВО весьма скромные и когда требуется отвести от аппарата значительную мощность, потребуется применять очень громоздкий радиатор. Для подобных случаев разработаны более эффективные способы принудительного отвода тепла [1].

На практике необходимо выбрать способ охлаждения, который необходим и достаточен для обеспечения нормального теплового режима (НТР) разрабатываемого изделия. В результате выбора возможно потребуется изменение конструкции под другую систему охлаждения.

Исходные данные, необходимые для выбора СО:

- тепловой поток P , Вт, рассеиваемый поверхностью теплообмена изделия;
- площадь поверхности теплообмена (корпуса) S_K , м²;
- допустимая рабочая температура наименее термостойкого элемента $t_{эл\ min}$, °С;
- максимальная температура окружающей среды $t_{с\ max}$, °С;
- минимальное давление окружающей среды $H_{с\ min}$, мм рт. ст.

Значение теплового потока приближенно определяют через потребляемую от источников питания мощность P_n с учетом коэффициента полезного действия изделия η :

$$P = P_n \cdot (1 - \eta) \quad (6.1)$$

Коэффициент полезного действия определяется классом аппаратуры. Для цифровых схем принимают $\eta=0,1$, для маломощных аналоговых и аналого-цифровых схем $\eta=0,2...0,3$. Силовые устройства, как правило, имеют существенно более высокие КПД (до 0,95), т.к. они проектируются исходя из необходимости обеспечения максимальной энергетической эффективности. В таблице 6.1 приведены типовые значения КПД и удельной мощности различных типов источников питания, которые часто встречаются в схемах ЭС.

Чтобы выбрать способ охлаждения, необходимо найти поверхностную плотность теплового потока и допустимый перегрев в конструкции по формулам:

$$P_{0S} = k_H P / S_K, \text{ Вт/м}^2, \quad (6.2)$$

$$\Delta t_{\text{доп}} = t_{\text{эл min}} - t_{\text{с max}}, \quad (6.3)$$

где $k_H = 1/(H_{\text{с. min}}/H)^{0,5}$ – поправочный коэффициент на давление окружающей среды,

$H = 760$ мм рт. ст. – нормальное давление.

Таблица 6.1. Энергетические характеристики источников питания

Тип источника питания	Типовой КПД, %	Типовая плотность мощности, Вт/дм ³
Линейный источник питания	40 – 60	15 – 30
<i>Импульсные ИП</i>		
Обратноходовый преобразователь	78 – 85	60 – 380
Прямоходовый преобразователь	75 – 92	120 – 200
Двухтактный преобразователь	72 – 80	120 – 330

При известных габаритных размерах корпуса блока прямоугольной формы $L \times B \times H$ площадь поверхности определяется по формуле

$$S_K = 2(L \cdot B + L \cdot H + B \cdot H). \quad (6.4)$$

В тех случаях, когда габаритные размеры изделия неизвестны, площадь поверхности теплообмена S_K можно найти ориентировочно, используя коэффициенты дезинтеграции объема q_V (см. тему 2):

$$S_K = 6(q_V \cdot V_{\text{эл}})^{2/3}, \quad (6.5)$$

где $V_{\text{эл}}$ – суммарный установочный объем элементов.

Для выбора способа охлаждения рекомендуется использовать график, приведенный на рис. 6.1. Значения P_{0S} и $\Delta t_{\text{доп}}$ представляют собой координаты точки, положение которой определяет необходимый способ охлаждения конструкции.

Не заштрихованные зоны диаграммы относятся к следующим способам охлаждения: 1–естественное воздушное, 3–принудительное воздушное, 5–принудительное жидкостное, 9–принудительное испарительное.

Заштрихованным зонам соответствуют следующие способы охлаждения: 2–естественное и принудительное воздушное, 4–принудительное воздушное и жидкостное, 6–принудительное жидкостное и естественное испарительное, 7–принудительное жидкостное, принудительное и естественное испарительное, 8–естественное и принудительное испарительное.

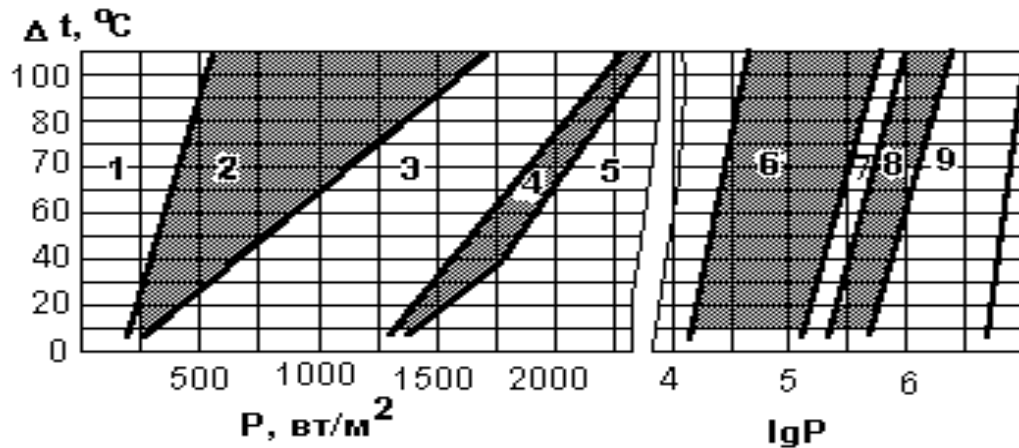


Рис. 6.1. График для выбора способа охлаждения изделия

Если точка с координатами $(P_{0S}, \Delta t_{доп})$ попадает в заштрихованную зону, где возможно использование двух и даже трех различных способов охлаждения, задача выбора может быть решена путем использования вероятностных кривых, которые связывают показатели P_S , $\Delta t_{доп}$ и вероятности обеспечения нормального теплового режима при различных условиях теплообмена.

Графики вероятностных кривых для наиболее распространенных способов охлаждения приведены в приложении Е.

- на рис. Е.1, а – для ЭС в герметичном кожухе с естественным воздушным охлаждением (должна использоваться шкала $W=0$ кг/с·м², где W – массовый удельный расход воздуха); и с принудительным внутренним перемешиванием воздуха для трех значений расхода воздуха (приведены три шкалы для $W=1$, $W=2$ и $W=3$ кг/с·м²);
- на рис. Е.1, б – аналогичные кривые, но построенные для случая наружного обдува кожуха для четырех значений расхода воздуха ($W=1$, $W=2$, $W=3$ и $W=4$ кг/с·м²);
- на рис. Е.2 – для ЭС с естественным воздушным охлаждением в перфорированном кожухе;
- на рис. Е.3 – для ЭС с принудительным охлаждением продувом воздухом.

В последнем случае используется дополнительный показатель – массовый расход воздуха на единицу рассеиваемой блоком мощности, кг/ч·кВт.

Вероятностная оценка показывает, какое внимание должен уделять конструктор выбираемому способу охлаждения изделия.

При работе с вероятностными кривыми рекомендуется использовать следующие правила:

1) Если точка попадает в область $p \geq 0,8$, то можно остановиться на этом способе охлаждения;

2) Если точка попадает в область $0,8 > p \geq 0,3$, то можно выбирать этот способ охлаждения, но чем меньше P , тем больше внимания придется уделить обеспечению и анализу теплового режима в дальнейшем при детальной проработке конструкции;

3) При попадании в область $0,3 > p \geq 0,1$ не рекомендуется выбирать данный метод охлаждения;

4) При попадании в область $0,1 > p \geq 0,05$ обеспечить нормальный тепловой режим данным методом охлаждения удастся очень редко, а при $p < 0,05$ – практически невозможно.

6.3. Примеры выбора СО

Пример 1.

Проектируемое изделие с размерами 150×200×250 мм и потреблением от источников электропитания 30 Вт предназначено для эксплуатации в диапазоне температур от минус 15 до +45°C при пониженном атмосферном давлении 61 кПа. Допустимая рабочая температура примененного в изделии наименее теплостойкого радиоэлемента составляет +65°C. Выбрать способ охлаждения, при котором будет обеспечен нормальный тепловой режим изделия.

Находим площадь поверхности теплообмена изделия:

$$S_k = 2(0,15 \times 0,2 + 0,15 \times 0,25 + 0,2 \times 0,25) = 0,118 \text{ м}^2$$

Определяем величину теплового потока

$$P = 0,8 \cdot P_{\Pi} = 0,8 \cdot 30 = 24 \text{ Вт}$$

и поправочный коэффициент на давление окружающей среды

$$k_H = 1/(H_{c \text{ min}}/H)^{0,5} = 1/(61/101)^{0,5} = 1,29$$

Находим поверхностную плотность теплового потока:

$$P_{0S} = k_H P / S_k = 1,29 \times 24 / 0,118 = 262,37 \text{ Вт/м}^2.$$

Определяем допустимый перегрев поверхности теплообмена

$$\Delta t_{\text{доп}} = t_{\text{эл min}} - t_{c \text{ max}} = 65 - 45 = 20 \text{ °C}$$

С помощью графиков на рис. 6.1 определяем, что точка с координатами P_{0S} и $\Delta t_{\text{доп}}$ попадает в зону номер 1. Следовательно, нормальный

тепловой режим изделия будет обеспечен при естественном воздушном охлаждении.

Пример 2.

Негерметичный блок имеет следующие данные: $P = 500 \text{ Вт}$, $P_{0s} = 400 \text{ Вт/м}^2$, $\Delta t_{\text{доп}} = 30^\circ\text{C}$. Режим работы длительный. Давление воздуха, окружающего блок нормальное атмосферное.

Рабочая точка на графике рисунка 6.1 попадает в область 2, следовательно, возможно как естественное, так и принудительное воздушное охлаждение.

По кривым на рис. Е.2 находим, что НТР блока может быть обеспечен при естественном охлаждении и перфорированном кожухе с вероятностью $p = 0,28$. Так как эта вероятность мала, необходимо уделить особое внимание обеспечению НТР даже в ущерб другим характеристикам блока. Выбираем использование принудительного воздушного охлаждения, при котором ухудшатся массогабаритные характеристики блока и возникнет акустический шум.

На рис. Е.3 для вероятности $p = 0,6$ находим требуемый для обеспечения НТР удельный расход воздуха: $G/10^{-3} \cdot P = 240 \text{ кг/ч} \cdot \text{кВт}$, отсюда $G = 120 \text{ кг/ч}$. Расход воздуха такой величины вполне реализуем на практике с помощью стандартного вентилятора.

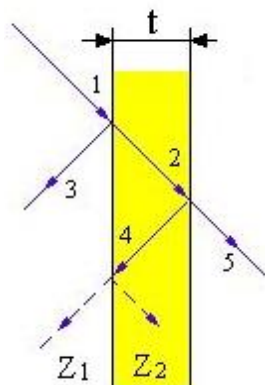
6.6. Рекомендуемая литература

1. Роткоп Л. Л., Спокойные Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. М., "Советское радио", 1976, 232 с.

ТЕМА 7. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНА

7.1 Краткие теоретические сведения

При падении на экран плоской электромагнитной волны происходит ее отражение, поглощение, а также повторные отражения в толще экрана (рис. 7.1).



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

Рис. 7.1. Экранирование плоской ЕМ-волны

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

$$S = A_{\Pi} + A_{\text{О}} + A_{\text{П.О}} \quad (7.1)$$

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

$A_{\text{О}}$ – составляющая, определяющая отражение от границы раздела при входе волны в экран.

$A_{\text{П.О}}$ – характеризует потери за счёт повторных отражений в толще экрана.

Все величины в формуле (7.1) выражаются в дБ.

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

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

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

$$A_{\Pi} = 8,686 \frac{t}{\delta} = 131,4 \cdot t \cdot \sqrt{f \mu_r \sigma_r}, \text{ дБ} \quad (7.2)$$

где t – толщина стенки экрана, мм;

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

f – частота, МГц.

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

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

$$A_0 = 20 \log(Z_1/Z_2) \quad (7.3)$$

где Z_1 – модуль импеданса окружающей среды;

Z_2 – модуль импеданса экрана.

Эффективность экранирования в результате отражения в дальней зоне:

$$A_0 = 168 - 10 \log \frac{f \mu_r}{\sigma_r}, \text{ дБ} \quad (7.4)$$

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

На рис. 7.2 показана физическая картина того как проникает электрическое и магнитное поле через апертуры в экране. Если проникновение велико, то эффективность экранирования будет реально невысоким.

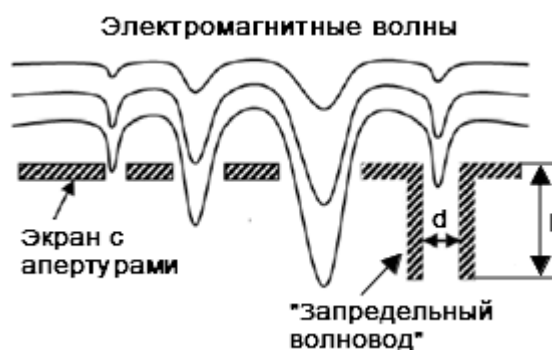


Рис. 7.2. Проникновение поля в отверстия экрана

Возможно выполнение специальных по конфигурации отверстий, не пропускающих электромагнитную волну, которые называют "запредельными волноводами" – рис. 7.2, 7.3. Как правило, эти отверстия выполняют путем вытягивания металла на длину l . При этом образуется некоторое подобие волновода с определенной частотой среза, выше которой электромагнитные волны не проникают из волновода внутрь изделия. Частота среза зависит от поперечных размеров и формы сечения, а также от длины волновода.

Форма сечения "запредельного волновода" может быть круговой, квадратной или в виде правильного шестиугольника ("соты") – рис. 7.3.

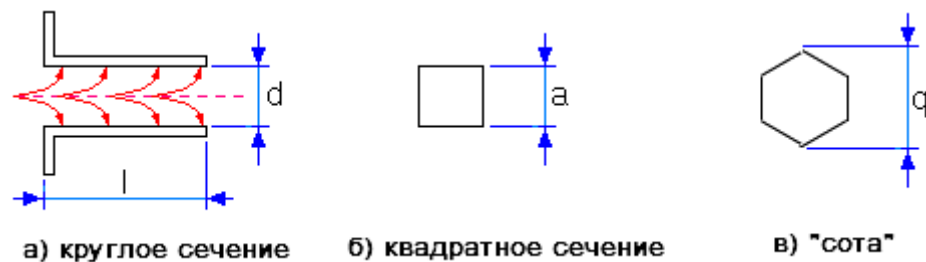


Рис. 7.3. Геометрические параметры "запредельных волноводов"

Частота среза для волновода круглого сечения определяется по формуле

$$f_{\text{ср}} = 1,75 \cdot 10^5 / d, \quad (7.5)$$

Формулы для расчета ослаблений для волноводов различных сечений представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1. Расчетные соотношения для запредельных волноводов

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

В таблице использованы обозначения:

l – длина волновода, мм;

d – диаметр окружности для патрубка круглого сечения;

a – максимальный размер для прямоугольного сечения;

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

Эффективность экранирования снижается из-за утечек через щели, отверстия, резонансных эффектов полостей и т.д. Формулу для эффективности экранирования (7.1) можно дополнить *поправочными коэффициентами* для неидеального экрана. Это один из распространенных подходов, используемых в инженерной практике, поскольку получение адекватных моделей для неоднородностей в экране достаточно сложная задача.

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

$$S = A_{\Pi} + A_0 + A_{\Pi,0} - k_a$$

где k_a – поправка на утечки через апертуры.

7.2. Пример оценки экранирующей способности корпуса

Исходные данные.

Корпус блока выполнен из алюминиевого сплава Д16. Минимальная толщина стенок корпуса $t = 1,5$ мм. На корпусе имеются выступающие части:

- на верхней стенке – ребра охлаждения и ручка для переноски;
- на нижней стенке – элементы крепления.

На передней стенке имеется несколько сквозных отверстий круглой формы, наибольший диаметр которых $D=10$ мм, и несколько несквозных отверстий глубиной 0,5 мм.

Согласно ТЗ на разработку изделия эффективность экранирования корпуса должна быть $S \geq 90$ дБ в диапазоне частот (0,1 – 10) МГц.

Анализ исходных данных.

Выступающие части не оказывают влияния на поле внутри корпуса, поэтому их не будем учитывать.

В корпусе имеются несквозные и сквозные отверстия. Если толщина корпуса в несквозных отверстиях больше толщины скин-слоя на частоте $f_{\min}$, то эти отверстия можно не учитывать.

Влиянием сквозных отверстий можно будет также пренебречь, если их частота среза существенно превышает $f_{\max}$.

Толщину скин-слоя можно определить по известной формуле

$$\delta = \frac{66}{\sqrt{\mu_r \sigma_r f}}, \quad (7.6)$$

Для наименьшей частоты заданного диапазона (0,1 МГц) по (7.6) определяем $\delta = 66/(1 \cdot 0,63 \cdot 0,1)^{0,5} = 264$ мкм = 0,264 мм. Учитывая, что $\delta \leq (1,5 - 0,5) = 1,0$ мм, влиянием несквозных отверстий можно пренебречь.

Частоту среза для круглого отверстия определяем по формуле (7.5)

$f_{cp} = 1,75 \cdot 10^5 / 10 \cdot 10^3 = 17,5$ МГц, следовательно, влиянием сквозных отверстий также можно пренебречь.

Оценка эффективности корпуса.

Расчет потерь в электромагнитном экране выполним без учета потерь за счет многократных отражений по формуле:

$$S = A_{\Pi} + A_o, \text{ дБ}, \quad (7.7)$$

Для определения величин A_{Π} и A_o воспользуемся формулами (7.2) и (7.4) соответственно. Электрические и магнитные характеристики материала экрана определим по таблице 7.2, взятой с небольшими сокращениями в [1].

Табл. 7.2. Относительная проводимость и магнитная проницаемость металлов

Металл	Относительная проводимость σ_r	Магнитная проницаемость μ_r при $f \leq 10$ кГц	$\sqrt{\sigma_r \mu_r}$ поглощение	$\sqrt{\sigma_r / \mu_r}$ отражение
1	2	3	4	5
Немагнитные металлы				
Серебро	1,064	1	1,03	1,03
Медь (литая)	1,00	1	1	1
Медь (напыление)	0,10	1	0,32	0,32
Золото	0,70	1	0,88	0,88
Хром	0,664	1	0,81	0,81
Алюминий (мягкий)	0,63	1	0,78	0,78
Алюминий (закаленный)	0,40	1	0,63	0,63
Алюминий (фольга, 0,15 мм)	0,53	1	0,73	0,73
Алюминий (напыление)	0,036	1	0,19	0,19
Латунь (91 % Cu, 9 % Zn)	0,47	1	0,69	0,69
Магнитные металлы				
Сталь	0,10	180	4,24	0,023
Электротехническая сталь	0,23	200-600		
Низконикелевый пермаллой	0,21	1500-4000		
Мю-металл (Mumetal)	0,20	20000		
Суперпермаллой	0,023	100000	53,7	0,0005

Для алюминиевого сплава типа Д16 (алюминий закаленный) безразмерная величина $\sqrt{\mu_r \sigma_r}$ равна 0,63. Очевидно, что на нижней частоте заданного частотного диапазона величина потерь на поглощение будет минимальной, поэтому выполняем расчет по формуле (7.2) для частоты 0,1 МГц:

$$A = 131,4 \cdot 1,5 \cdot (0,1)^2 \cdot 0,63 = 1,242 \text{ дБ.}$$

Для этого же материала безразмерная величина $\sqrt{\mu_r/\sigma_r}$ равна также 0,63. Подставляя в формулу (7.4) известные нам величины получим:

$$A_0 = 108,1 - 10 \log(0,63)^2 \cdot 0,1 = 94 \text{ дБ.}$$

По формуле (7.7) определяем общие потери в экране на частоте 0,1 МГц:

$$S = 1,242 + 94 = 95,24 \text{ дБ.}$$

Делаем вывод, что в заданном диапазоне частот корпус по своим характеристикам отвечает требованиям ТЗ.

7.3. Рекомендуемая литература

1. **Кечиев, Л.Н.** Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. / Л.Н. Кечиев. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с: ил. – (Библиотека ЭМС).

ТЕМА 8. РАСЧЕТ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ПЕЧАТНОГО УЗЛА ПРОСТОЙ КОНСТРУКЦИИ

8.1. Введение

Электронное средство (ЭС) состоит из множества деталей и узлов, обладающих различными запасами стойкости к механическим воздействиям (МВ) – линейным перегрузкам, вибрациям, ударам. В большом числе случаев для определения стойкости к МВ завершённой конструкции 2 и 3 структурных уровней достаточно ограничиться анализом наиболее «слабых» ее элементов, к которым можно отнести и печатные узлы (ПУ) по следующим причинам:

- печатный узел представляет собой плоскую конструкцию с большим отношением размера короткой стороны к ее толщине;
- в местах установки ПУ часто слабо закреплены (обычно винтами);
- материалы, из которых изготавливаются печатные платы, не отличаются высокими механическими характеристиками.

В ТЗ на конструирование изделия среди прочих параметров внешних воздействий задается частотный диапазон вибраций. Среди них наибольшую опасность представляют собой частоты, на которых возможны резонансы в конструкции или в ее отдельных элементах.

Согласно ГОСТ 30631-99 **резонанс изделия** – явление увеличения амплитуды вынужденных колебаний конструкции в два раза и более при постоянном внешнем воздействии, возникающее на частотах вибрационных нагрузок, близких к собственной частоте колебаний (СЧК) изделия.

Наличие резонансов у изделия или у его элементов может приводить к восстанавливаемым и невосстанавливаемым отказам.

Анализ стойкости печатного узла к МВ проводят в следующем порядке:

- 1) Определение расчетной модели конструкции, достаточно близкой к реальной конструкции по своему поведению в заданных условиях эксплуатации;
- 2) Расчет собственных частот модели печатного узла;
- 3) Расчет и анализ параметров, характеризующих стойкость ПУ к заданным МВ;

4) При необходимости – выбор решения по повышению стойкости конструкции к МВ, проверка его достаточности.

8.2. Определение расчетной модели

Печатный узел чаще всего выполняется на плате прямоугольной формы, толщина которой в 10 или большее число раз меньше ее короткой стороны. Учитывая это и принимая ряд допущений [2, 3], печатный узел можно достаточно точно для многих задач моделировать пластиной при определенном закреплении ее сторон. При этом, как правило, принимается допущение, что масса радиоэлементов равномерно распределена по поверхности платы.

На практике встречаются следующие виды крепления печатных плат:

- крепление платы в нескольких точках, например, винтами;
- жесткое крепление одной или нескольких сторон платы;
- свободное опирание одной или нескольких сторон платы;
- одна или несколько сторон платы свободны в пространстве.

На рис. 8.1 представлены условные обозначения перечисленных способов закрепления, принятые в данном пособии.

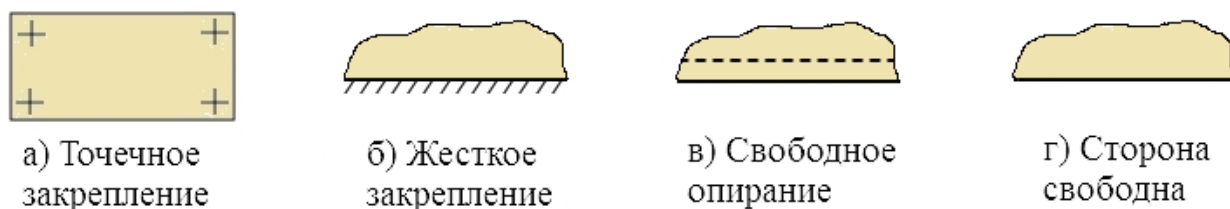
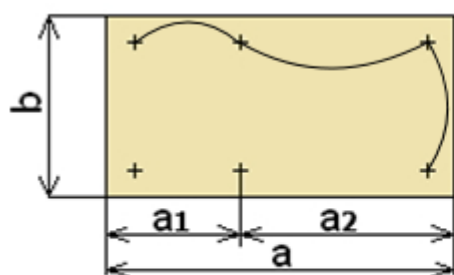


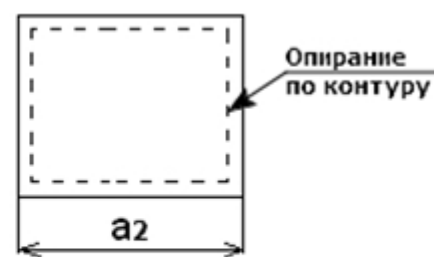
Рис. 8.1. Условные обозначения моделей закрепления платы

Рассмотрим два примера определения расчетной модели ПУ.

Пример 8.1. Плата, закрепленная в шести точках (рис. 8.2, а), представлена моделью в виде пластины, равномерно нагруженной массой радиоэлементов, с размерами $a_2 \times b$ и свободным опиранием по контуру – рис. 8.2, б. В данном случае считается, что крепления винтами абсолютно жесткие, на каждой стороне платы укладывается полуволна изгибных колебаний. Если рассматривать наихудший случай для обеспечения стойкости платы к вибрации, то для расчета СЧК можно принять модель половины платы с большим размером a_2 .



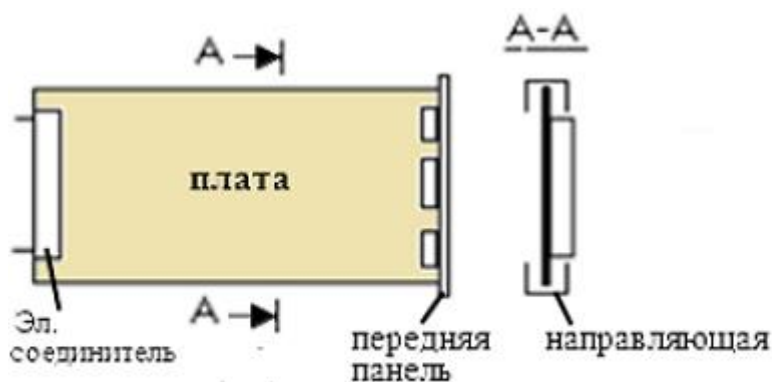
а) Схема крепления платы



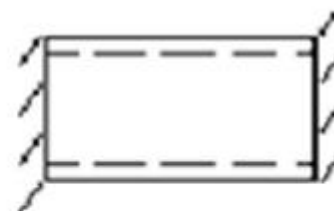
б) Расчетная модель

Рис. 8.2. Плата, закрепленная в шести точках

Пример 8.2. Печатный узел блока разъемной конструкции, имеющий электрический соединитель и лицевую панель – рис. 8.3, а. В его модели, представленной на рис. 8.3, б, короткие стороны платы считаются жестко заземленными, так как на них установлены элементы, обладающие во много раз большей жесткостью, чем сама плата. Две другие стороны платы вставляются в направляющие, в которых она имеет некоторую свободу колебания, поэтому эти стороны считаются свободно опертыми.



а) Конструкция модуля



б) Модель

Рис. 8.3. Конструкция и модель модуля разъемной конструкции

В аналогичном примере, приведенном в [3], считается, что в определении способа закрепления коротких сторон платы есть неопределенность. Чтобы решить эту проблему в [3] рекомендуется провести расчет СЧК для крайних случаев – свободного опирания и жесткого заземле-

ния. Истинные значения будут находиться между полученными значениями СЧК.

8.3. Расчет собственных частот плат

Колебания механической системы могут быть представлены через уравнения для отдельных точек этой системы, называемых **уравнениями Ламе**. Они универсальны, но очень сложны для решения [3]. Поэтому используя различные гипотезы, трехмерные уравнения Ламе преобразуют в более пригодные для решения двух- или одномерные уравнения. Для свободных незатухающих изгибных колебаний пластин получено уравнение:

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + D \left(\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} \right) = 0, \quad (8.1)$$

где $z=z(x,y,t)$ – виброперемещение пластины в точке с координатами (x,y) ;

D – цилиндрическая жесткость пластины.

Существует точное решение уравнения (8.1), однако оно имеет ограниченное применение, так как справедливо только для прямоугольных пластин со свободным опиранием двух любых противоположных сторон и произвольным креплением двух других сторон. Поэтому на практике обычно используются формулы, полученные приближенными методами. Среди них наиболее распространены методы Рэлея и Ритца.

Формула Рэлея позволяет рассчитать частоту **основного тона** собственных колебаний прямоугольной пластины с учетом нагрузки радиоэлементами при любых вариантах закрепления сторон:

$$f_{0_1} = \frac{1}{2\pi} \frac{k_\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{D}{m_0}}, \quad (8.2)$$

где k_α – коэффициент закрепления, зависящий от соотношения размеров сторон платы и способа их закрепления;

$D = Eh^3/12(1-\epsilon_n^2)$ – цилиндрическая жесткость, Н·м;

E – модуль упругости, Н/м²;

h – толщина платы, м;

ε_{Π} – коэффициент Пуассона;

$m_0 = m_{\Pi\gamma}/a \cdot b$ – приведенная масса печатного узла, кг/м²;

a и b – длина и ширина платы ($a \geq b$), м.

Коэффициент закрепления определяется по формуле

$$k_{\alpha} = \kappa(\alpha + \beta \frac{a^2}{b^2} + \gamma \frac{a^4}{b^4})^{0,5}, \quad (8.3)$$

Значения коэффициентов $\kappa, \alpha, \beta, \gamma$ приведены в таблице К.4 приложения К.

Необходимо отметить, что метод Рэлея дает хорошую точность расчета только для основного тона пластины. Его развитием является метод Ритца, который также называют методом Рэлея-Ритца [3].

Формула Ритца позволяет рассчитывать частоты свободных колебаний пластины **основного тона и обертонов** для различных вариантов ее закрепления. Она имеет вид

$$f_{0i} = \frac{1}{2\pi} \frac{k_{\alpha i}}{a^2} \sqrt{\frac{D}{m_{\Pi\gamma}}} \cdot K_{PЭ}, \quad (8.4)$$

где $k_{\alpha i}$ – коэффициент, зависящий от соотношения размеров сторон платы, способа их закрепления и номера обертона;

$K_{PЭ}$ – коэффициент, учитывающий массу радиоэлементов.

Значения коэффициента $k_{\alpha i}$ для определенных комбинаций краевых условий и отношений сторон пластины приводятся в [1, стр. 144]. Поправочный коэффициент на массу РЭ рассчитывается по формуле: $K_{PЭ} = 1/(1 + m_{PЭ}/m_{\Pi})^{0,5}$; $m_{PЭ}$ – масса радиоэлементов, равномерно размещенных на плате; m_{Π} – масса платы.

Для упрощения процедуры расчета СЧК основного тона можно использовать формулу, полученную путем преобразования (8.4):

$$f_{01} = (C \cdot h/a^2) K_M K_{PЭ} \cdot 10^5, \quad (8.5)$$

где $C = (k_{\alpha}/2\pi)(D/m_0)^{0,5}$ – частотная постоянная;

h – толщина платы, мм;

a – большая сторона платы, мм;

$K_M = (E \cdot \rho_c / E_c \cdot \rho)^{0,5}$ – поправочный коэффициент на материал платы;
 E, E_c – модули упругости материала платы и стали;
 ρ, ρ_c – плотности материала платы и стали.

Значения частотной постоянной C для некоторых вариантов закрепления платы приведены в [1, стр. 146].

Пример 8.3. Определить расхождение результатов расчета СЧК основного тона ПУ по формулам (8.2) и (8.5). Исходные данные:

- расчетная модель соответствует варианту 9 в таблице К.4 приложения (жесткое защемление всех сторон платы);
- размер платы 100×100 мм;
- материал платы СФ-2-50-1,5 с параметрами: плотность $\rho = 1,85$ г/см³, модуль упругости $E = 32 \cdot 10^9$ Н/м², коэффициент Пуассона $\varepsilon = 0,22$. На плате установлены радиоэлементы общей массой $m_{РЭ} = 25$ г.

Расчет.

По таблице К.4 приложения находим коэффициенты: $k = 22,37$;
 $\alpha = \gamma = 1$; $\beta = 0,61$.

Для соотношения сторон платы $a/b=1$ по формуле (8.3) находим коэффициент закрепления

$$k_\alpha = 22,37(1 + 0,61 \cdot 1^2 + 1 \cdot 1^4)^{0,5} = 36,14.$$

Цилиндрическая жесткость платы

$$D = Eh^3/12(1 - \varepsilon^2) = 32 \cdot 10^9 \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^3 / 12(1 - 0,22^2) = 9,45 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Масса печатной платы

$$m_\Pi = \rho V_\Pi = 1,85 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 27,75 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

$$\text{Масса ПУ } m = m_{РЭ} + m_\Pi = 25 \cdot 10^{-3} + 27,75 \cdot 10^{-3} = 52,75 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

$$\text{Площадь платы } S_\Pi = 0,1 \cdot 0,1 = 0,01 \text{ м}^2.$$

$$\text{Приведенная к площади масса платы } m_0 = m/S_\Pi = 52,75 \cdot 10^{-3} / 10^{-2} = 5,275 \text{ кг/м}^2.$$

Частота основного тона по формуле Рэлея

$$f_{0_1} = \frac{1}{2\pi} \frac{k_\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{D}{m_0}} = \frac{1}{2\pi} \frac{36,14}{0,01} \sqrt{\frac{9,45}{5,275}} = 770,25 \text{ Гц}.$$

Чтобы рассчитать СЧК по формуле (8.5), определяем поправочные коэффициенты на материал платы

$$K_M = (E \cdot \rho_c / E_c \cdot \rho)^{0,5} = (32 \cdot 10^9 \cdot 7,82 \cdot 10^3 / 200 \cdot 10^9 \cdot 1,85 \cdot 10^3) = 0,82$$

и на нагрузку платы радиоэлементами

$$K_{РЭ} = 1/(1 + m_{РЭ}/m_\Pi)^{0,5} = 1/(1 + 25 \cdot 10^{-3} / 27,75 \cdot 10^{-3})^{0,5} = 0,73.$$

Из таблицы 4.5 [1, стр. 146] для соотношения сторон $a/b=1$ находим частотную постоянную $C = 83,8$. Частота свободных колебаний

$$f_{01} = (C \cdot h/a^2) K_M K_{PE} \cdot 10^5 = (83,8 \cdot 1,5 \cdot 0,82 \cdot 0,73 / 10^4) \cdot 10^5 = 752,44 \text{ Гц}$$

Таким образом, расхождение результатов расчета СЧК основного тона платы в абсолютных единицах составило почти 18 Гц, а в относительных единицах – 2,3%.

Формула для точечного закрепления плат

Для некоторых случаев точечного закрепления плат, схемы которых изображены на рис. 8.4, получена универсальная формула [3]:

$$f_{01} = 1,57 \left(A + \frac{1}{b^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{D}{m_0}} \quad (8.6)$$

где n – количество точек крепления;

$A=1/a^2$, при $n=4$;

$A=4/(a^2 + b^2)$, при $n=5$;

$A=0,25/a^2$, при $n=6$.

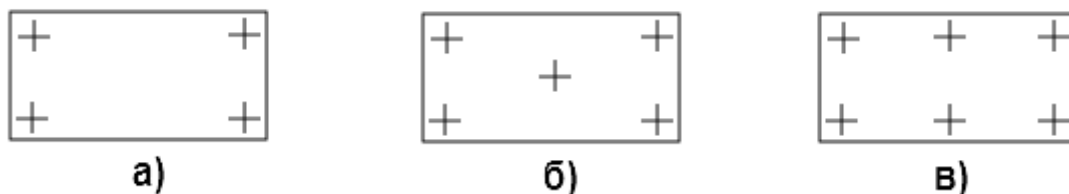


Рис. 8.4. Схемы точечного закрепления платы при $n=4, 5, 6$.

Формула для плат круглой формы

В некоторых конструкциях ЭС используются платы в виде колец или в сплошных дисках. В общем виде такую форму можно представить в виде сектора кольца – рис. 8.5.

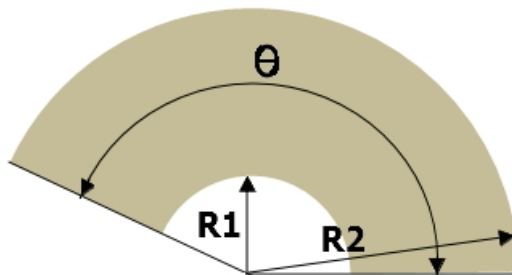


Рис. 8.5. Плата кольцевой формы

Для определения СЧК первого тона пластины кольцевой формы, края которой оперты или защемлены, получена формула:

$$f_{0_1} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi\sqrt{R_1^4 + R_2^4}} \left(\frac{\pi}{\theta} \right)^2 \sqrt{\frac{D}{\rho \cdot h}}, \quad (8.7)$$

где R_1, R_2 – меньший и больший радиусы кольца, м;

θ – угол сектора кольца, град;

ρ – плотность материала платы, кг/м³.

Формула (8.7) легко преобразуется к виду для расчета СЧК сплошного диска. Ее недостатком является то, что она не учитывает массу радиоэлементов на плате. В [4] приведена формула для расчета СЧК основного тона сплошного диска лишенная этого недостатка:

$$f_{0_1} = \frac{(3,19)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{R^4} \left(\frac{1}{\rho h} + \frac{\pi R^2}{m_{РЭ}} \right)}, \quad (8.8)$$

где R – радиус кольца, м;

ρh – распределенная масса печатной платы, кг/м²;

$m_{РЭ}/\pi R^2$ – распределенная масса радиоэлементов на плате, кг/м².

8.4. Рекомендуемая литература

1. **Борисов, В.Ф.** Конструирование радиоэлектронных средств / В.Ф. Борисов, О.П. Лавренов, А.С. Назаров, А.Н. Чекмарев; Под ред. А. С. Назарова – М.: изд. МАИ, 1996.

2. **Шимкович, А.А.** Проектирование несущих конструкций электронных устройств: учеб. пособие / А.А. Шимкович. – Мн.: Адукация и выхаванне, 2003. – 307 с.

3. **Талицкий, Е.Н.** Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы: учеб. пособие / Владим. гос. ун-т. Владимир, 2001. – 256 с.

4. **Каленкович, Н.И.** Механические воздействия и защита радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов / Н.И. Каленкович, Е.П. Фастовец, Ю.В. Шамгин. – Мн.: Выш. шк., 1989. – 244 с.

ТЕМА 9. РАСЧЕТ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ПЕЧАТНОГО УЗЛА СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ

9.1. Краткие теоретические сведения

Для обеспечения стойкости ЭС к механическим воздействиям широко используется способ частотной отстройки, который заключается в повышении жесткости элементов конструкции с целью смещения спектра собственных частот колебаний в более высокочастотную область [1]. В практике конструирования печатных узлов для реализации этого способа изменяют способы крепления, площади и толщины плат, платы устанавливают на рамки или используют накладные ребра жесткости.

Для расчета СЧК модели в виде прямоугольной пластины, свободно опертой по контуру, имеющей n_x ребер жесткости, параллельных оси X, и n_y ребер жесткости, параллельных оси Y получена формула:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi^4}{b^3 m_y} \cdot \frac{1 + \frac{n_x + 1}{n_y + 1} \cdot \frac{b^3 B_x}{a^3 B_y} + \frac{a \cdot D_{\text{пл}}}{B_y (n_y + 1)} \left(\frac{b^2}{a^2} + 1 \right)^2}{1 + \frac{n_x + 1}{n_y + 1} \cdot \frac{m_x}{m_y} + \frac{m_{\text{пл}} + m_{\text{эпрэ}}}{(n_y + 1) m_y}}} \quad (9.1)$$

где m_x, m_y – масса (кг) ребер, параллельных осям X и Y;

B_x, B_y – жесткости ребер, параллельных осям X и Y, Н·м;

$D_{\text{пл}} = \frac{E_p b_p h_p^3}{12}$ – жесткость платы, Н·м;

b_p, h_p, E_p – ширина (м), высота (м) и модуль упругости материала (Н/м²) соответствующих ребер жесткости.

Формула (9.1) имеет ограниченное применение, т.к. свободное опирание по контуру редко встречается на практике (для более сложных способов крепления расчетные формулы отсутствуют).

Рассмотрим рамочную конструкцию функциональной ячейки, выполненную на бескорпусных микросборках (рис. 9.1). Подобные конструкции широко используются в бортовых электронных средствах и в другой аппаратуре специального назначения. Рама в ней, изготовленная из легкого металлического сплава, выполняет одновременно две функции: повышения жесткости ячейки и эффективного теплоотвода от микросборок. С обратной стороны к раме приклеена печатная плата, которая осуществляет все основные электрические соединения в ячейке.

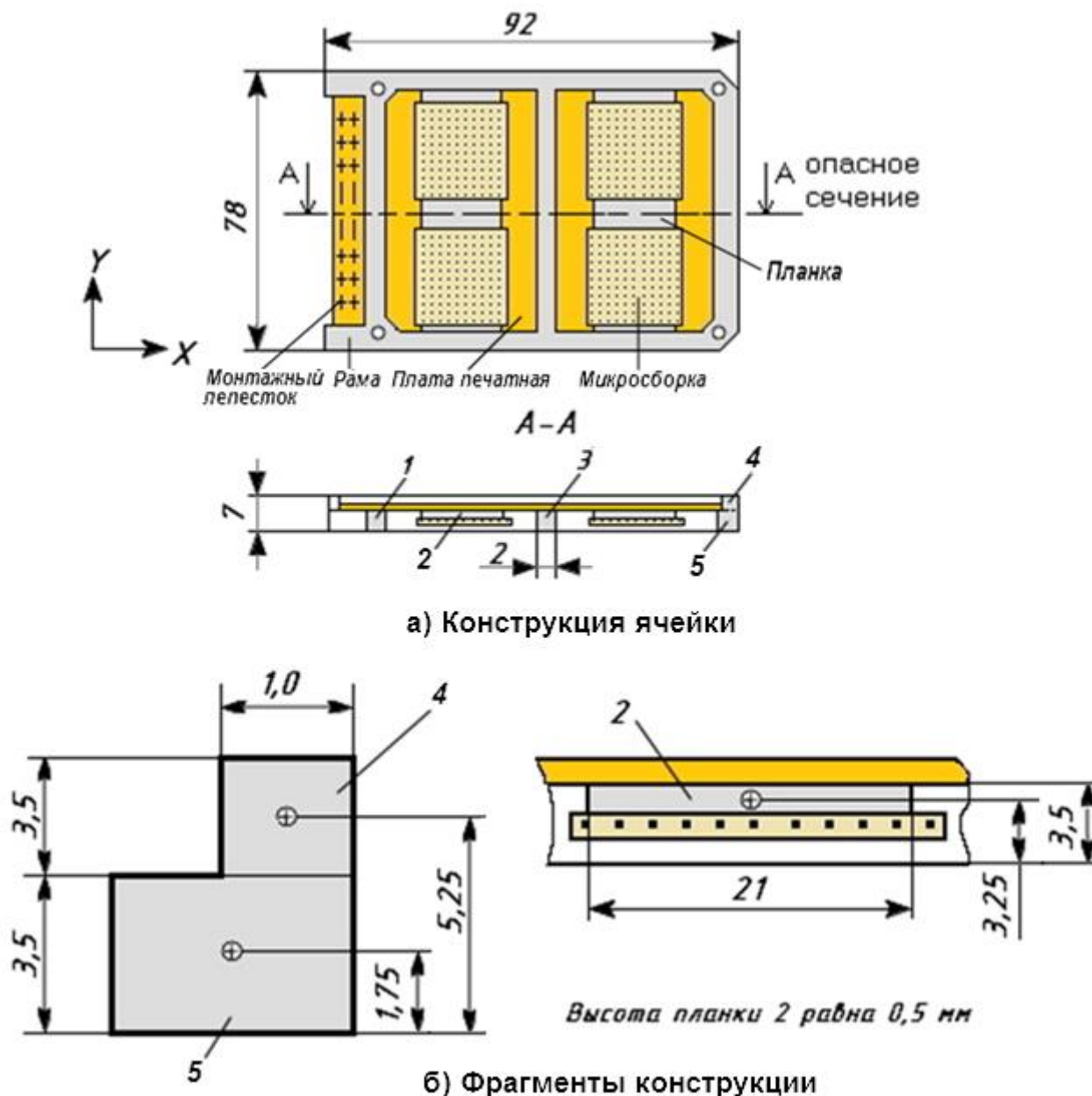


Рис. 9.1. Функциональная ячейка рамочной конструкции на бескорпусных микросборках

Конструкция на рис. 9.1 является сложной многослойной системой микросборка–клей–рамка–клей–печатная плата. Кроме этого рамка имеет непростую конфигурацию сечений. В этом состоит сложность расчета собственной частоты ячейки, т.к. ее нельзя как печатную плату считать пластиной. Однако существует приближенный способ, который заключается в переходе от сложной многослойной конструкции к модели эквивалентной прямоугольной пластины, собственную частоту которой затем определяют по одной из формул, например, по формуле Релея.

Для расчета собственной частоты сначала определяют жесткость эквивалентной пластины. Достаточную точность результата дает формула:

$$D_{\text{ФЯ}} = D_{\text{ПП}} + D_{\text{Р}}, \quad (9.2)$$

где $D_{\text{ФЯ}}$, $D_{\text{ПП}}$, $D_{\text{Р}}$ – жесткости всей ячейки, платы и рамки, соответственно.

Для расчета цилиндрической жесткости платы используют формулу, полученную следующим преобразованием:

$$D_{\text{ПП}} = \frac{Eh^3}{12(1-\varepsilon^2)} = \frac{Eh^3 \cdot b}{12(1-\varepsilon^2) \cdot b} = \frac{EJ}{b(1-\varepsilon^2)} \approx \frac{EJ}{b}, \quad (9.3)$$

где J – момент инерции платы.

Погрешность вычисления по формуле (9.3) в результате замены величины $(1-\varepsilon^2)$ на 1 не превысит 5%.

Для расчета жесткости рамы $D_{\text{Р}}$ необходимо сначала выбрать самое слабое ее сечение – это сечение с наименьшей жесткостью на изгиб. Если заранее оно неизвестно, то необходимо выполнить несколько сечений, рассчитать их жесткости и среди них взять сечение с наименьшей жесткостью. Для конструкции, изображенной на рис. 9.1, таким сечением является сечение А-А, которое отдельно представлено на рисунке 2.

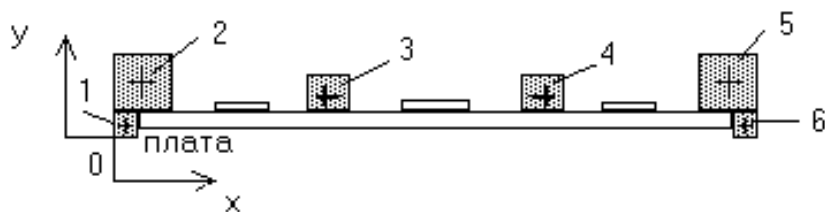


Рис. 9.2. Сечение конструкции с наименьшей жесткостью

В сечении рамки выделяются элементарные сечения правильной геометрической формы (в данном случае их шесть). Далее определяется координата $y_{\text{сл}}$ – средней линии рамки, не испытывающей деформаций при ее изгибе:

$$y_{\text{сл}} = \frac{\sum y_{\text{сл}i} \cdot S_i}{\sum S_i}, \quad (9.4)$$

где $y_{\text{сл}i}$, S – координата средней линии (на ней находится центр тяжести ячейки) элементарного сечения и площадь его сечения.

Определяется полный момент инерции рамки по следующей формуле:

$$J_{cl} = \sum_{i=1}^n J_i + \sum_{i=1}^n (y_{cl} - y_{cl_i})^2 \cdot S_i \quad (9.5)$$

Далее определяют жесткость рамки по формуле:

$$D_p = \frac{E_p J_{\Sigma}}{b_p}, \quad (9.6)$$

где b_p – полная ширина пластины.

Затем определяют приведенную массу ФЯ:

$$m_0 = \frac{m_p + m_{nl} + \sum m_{МСБ}}{ab}.$$

И, наконец, по формуле (8.2) или (8.4) – частоту f_{01} .

9.2. Пример расчета собственной частоты ячейки

Исходные данные:

Конструкция ячейки на рисунке 9.1.

Вес ячейки $P=0,4$ Н, материал рамки – алюминиевый сплав с параметрами: модуль упругости $E_p = 0,72 \cdot 10^7$ Н/см², коэффициент Пуассона $\varepsilon_{п} = 0,35$. Печатная плата выполнена из стеклотекстолита СФ-2Н-50-0,8 с параметрами: $E_{п} = 1,3 \cdot 10^6$ Н/см², $\varepsilon_{п} = 0,22$. Плата приклеена к рамке клеем по всей поверхности прилегания.

Расчет

1) Определяем координату условной линии $y_{сл.}$, на которой находится центр тяжести рамки. Для этого разбиваем сечение рамки на простейшие элементы 1, 2, 3 – рис. 9.3. Определяем величину $y_{сл.}$ по формуле (9.4)

$$y_{сл.} = (0,1 \cdot 0,35 \cdot 0,525 + 2 \cdot 0,05 \cdot 2,1 \cdot 0,325 + 3 \cdot 0,2 \cdot 0,35 \cdot 0,175) / (0,1 \cdot 0,35 + 2 \cdot 0,05 \cdot 2,1 + 3 \cdot 0,2 \cdot 0,35) = 0,271 \text{ см}$$

2) Определяем расстояния между центрами тяжести элементов и центром тяжести сечения рамки по формуле $\ell_i = |y_{сл.} - y_i|$ согласно рис. 9.3

$$\ell_1 = |0,525 - 0,271| = 0,254 \text{ см}, \quad \ell_2 = |0,325 - 0,271| = 0,054 \text{ см}, \\ \ell_3 = |0,271 - 0,175| = 0,096 \text{ см}.$$

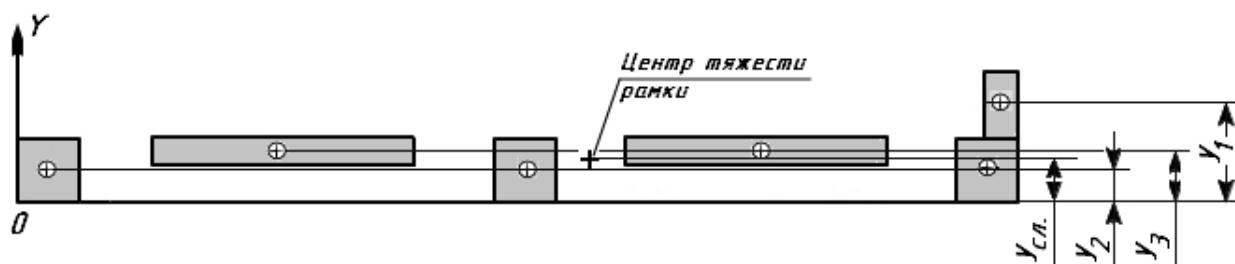


Рис. 9.3.

3) Определяем момент инерции сечения рамки по формуле (9.5)

$$J_p = (0,1 \cdot 0,35^3)/12 + 0,254^2 \cdot 0,1 \cdot 0,35 + (2 \cdot 2,1 \cdot 0,05^3)/12 + 2 \cdot 0,054^2 \cdot 0,05 \cdot 2,1 + (3 \cdot 0,2 \cdot 0,35^3)/12 + 3 \cdot 0,096^2 \cdot 0,2 \cdot 0,35 = 0,0074 \text{ см}^4.$$

4) Определяем жесткость ячейки $D_{\text{ФЯ}}$, считая, что слой клея не работает на сдвиг, а жесткость микросборок можно не учитывать. В этом случае жесткость ячейки определяется суммой жесткостей рамки D_p и платы $D_{\text{ПП}}$

$$D_{\text{ФЯ}} = E_p \cdot J_p / b(1 - \varepsilon_p^2) + E_{\text{П}} \cdot h^3 / 12(1 - \varepsilon_{\text{П}}^2) = 0,72 \cdot 10^7 \cdot 0,0074 / 9,2(1 - 0,35^2) + 1,3 \cdot 10^6 \cdot 0,08^3 / 12(1 - 0,22^2) = 6658 \text{ Н} \cdot \text{см}$$

5) Определяем массу единицы площади ячейки

$$m_0 = P / (a \cdot b \cdot g) = 0,4 / 9,2 \cdot 7,8 \cdot 981 = 5,68 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{см}^3$$

6) Считая, что все четыре стороны ячейки свободно оперты, определяем коэффициент закрепления α_{01} по формуле, приведенной в [2].

$$\alpha_{01} = \pi^2 \cdot (1 + b^2/a^2) = 3,14^2 \cdot (1 + 9,2^2/7,8^2) = 23,58$$

7) Определяем собственную частоту ячейки по формуле Рэлея

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi} \frac{23,58}{9,2^2} \sqrt{\frac{6658}{5,68 \cdot 10^{-6}}} = 1517 \text{ Гц.}$$

9.3 Рекомендуемая литература

1. **Талицкий, Е.Н.** Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы: Учеб. пособие/Е.Н. Талицкий – Владимир: Владим. гос. ун-т, 2001. 256 с.

2. Конструирование радиоэлектронных средств / В. Ф. Борисов, О. П. Лавренов, А. С. Назаров А. Н. Чекмарев; Под ред. **А. С. Назарова** – М.: изд. МАИ, 1996.

ТЕМА 10. ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВЫВОДОВ РАДИОЭЛЕМЕНТА

10.1 Краткие теоретические сведения

При длительном действии знакопеременных напряжений в металлах происходит накопление усталостных повреждений, которые, в конечном счете, приводят к их разрушению. Данное явление весьма характерно для проволочных выводов радиоэлементов (РЭ).

Переменные напряжения в выводах РЭ могут возникнуть при любом виде механического воздействия (МВ). Однако к усталостным разрушениям приводят именно те воздействия, которые могут быть приложены длительное время. Такими МВ являются гармоническая и случайная вибрации, акустический шум. По сравнению с ними кратковременные воздействия – удары и линейные ускорения, как правило, не приводят к накоплению усталостных повреждений в выводах.

Основным показателем усталостной долговечности является **время до усталостного разрушения**. Это время при гармонической вибрации определяется по формуле:

$$t_p = N_p / f \quad (10.1)$$

где N_p – количество циклов напряжений до разрушения;
 f – текущая частота колебаний, Гц.

Для определения величины N_p обычно используются кривые усталости материала, так называемые кривые Велера. Они выражают зависимость амплитуды напряжения в симметричном цикле от числа N_p циклов до разрушения. На рис. 10.1 приведены полученные экспериментально кривые усталости для металлов и сплавов.

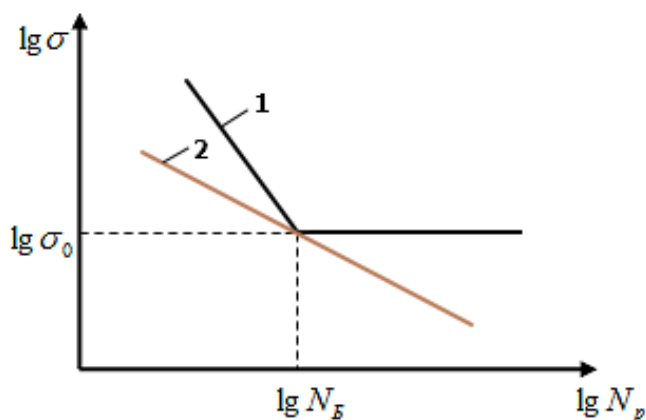


Рис. 10.1. Кривые усталости для металлов и сплавов

Кривая 1 характерна для сталей малой и средней прочности, а также для титановых сплавов. Она имеет резкий перелом при величине $N_p \approx 10^6$. Физически это означает, что если амплитуда переменного напряжения будет меньше напряжения σ_0 , соответствующего точке перелома, то усталостное разрушение не наступает при неограниченном числе циклов. Величина σ_0 для таких металлов называется **пределом усталости**. При испытании их образцов обычно задается базовое число циклов $N_B = 10^7$.

Кривая 2 характерна для цветных металлов и высокопрочных легированных сталей. Как мы видим, она не имеет выраженного предела усталости: с увеличением числа циклов N_p прочность продолжает падать. Для таких материалов обычно нормируется величина напряжения, при которой образец способен выдержать некоторое базовое число циклов нагружения. За базу, как правило, принимают величину $N_B = 5 \cdot 10^7$ циклов [1]. Это в полной мере относится к выводам РЭ, так как они обычно изготавливаются из меди.

Для расчетов может использоваться кривая усталости снятая экспериментально для марки материала, который использовался при изготовлении выводов моделируемого РЭ. Для медной и алюминиевой проволоки кривые Велера приведены в приложении на рисунке Л.1.

Другой путь, который является более точным, состоит в испытании такого же РЭ и определении параметров аппроксимирующего выражения, которое имеет вид

$$N_p = N_B (\sigma_0 / \sigma_{\max})^\beta, \quad (10.2)$$

где N_B – базовое число циклов нагружения;

σ_0 – предел усталости материала вывода;

$\sigma_{\max}$ – максимальное механическое напряжение в выводе РЭ;

β – параметр, зависящий от материала, размеров и формы вывода (характеризует угол наклона кривой усталости).

Напряжение $\sigma_{\max}$ значительно возрастает, а время t_p сокращается при наступлении резонансных колебаний РЭ или резонансных колебаний платы, на которой он установлен. Первый случай относится к условиям силового возбуждения механической системы, второй – к условиям кинематического возбуждения.

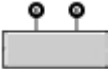
10.2 Определение времени до усталостного разрушения вывода радиоэлемента

Время до усталостного разрушения вывода на резонансной частоте РЭ определяют в следующем порядке:

- определяют собственную частоту РЭ f_{01} ;
- рассчитывают максимальное механическое напряжение в выводах на резонансной частоте σ_{max} ;
- определяют время до отказа.

Для определения собственной частоты радиоэлемента сначала для него выбирают расчетную модель. Вид модели определяется вариантом установки и крепления РЭ на плате. Для использования на данном практическом занятии предлагаются варианты, представленные в таблице 10.1.

Табл. 10.1. Варианты установки РЭ на плате

Вид сверху	Вид сбоку	Условный номер варианта
		1
		2
		3 – приклеивание, 4 – жесткое крепление
		5 – приклеивание, 6 – жесткое крепление
		7 – приклеивание, 8 – жесткое крепление

У радиоэлементов масса корпуса, как правило, много больше массы выводов, поэтому последней из двух этих величин можно пренебречь. В то же время жесткость выводов на изгиб много меньше жесткости корпуса радиоэлемента на изгиб. Учитывая это, расчетную модель радиоэлементов, установленных по вариантам 1 и 2 (табл. 10.1) представляют в виде П-образной рамы с заземленными краями и сосредоточенной посередине массой m (рис. 10.2, а).

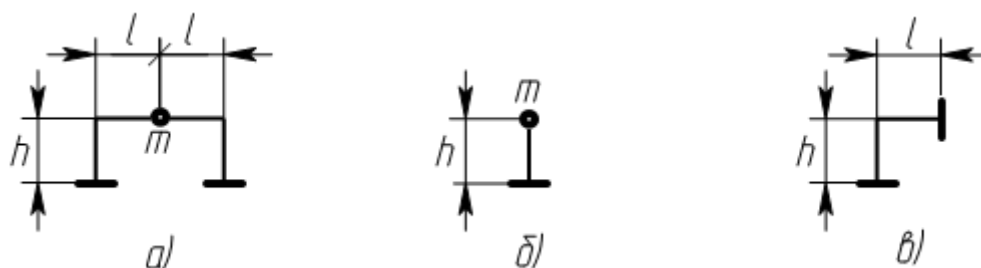
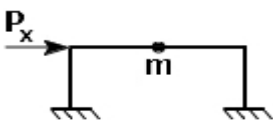
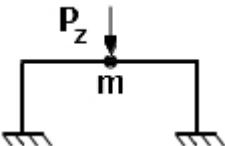
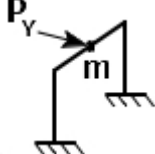


Рис. 10.2. Варианты расчетных моделей радиоэлементов

У радиоэлементов, установленных по вариантам 3...8 корпуса либо приклеены к плате, либо жестко скреплены с платой и не влияют на колебания выводов при механических воздействиях. В этом случае модель для расчета напряжений в выводах РЭ представляется рамой, изображенной на рисунке 10.2, в. На практике может использоваться и модель в виде сосредоточенной массы, установленной на стержне (рис. 10.2, б).

Частота свободных колебаний рамы зависит как от параметров модели, так и от направления действия инерционной силы P_u . Если ее направление не совпадает с направлением осей координат, то она может быть разложена на составляющие P_x, P_y, P_z [2]. В таблице 10.2 приведены формулы для расчета собственной частоты в зависимости от направления действующей силы.

Табл. 10.2

Вариант приложения силы	Формула для расчета собственной частоты	Номер формулы
	$f_{01} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{48EJ}{ml^3 [1 - 9/4 \cdot (2\kappa + 4)]} \right\}^{0,5}$	10.3
	$f_{01} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{24EJ}{ml^3 [1 + 3/(6\kappa + 1)]} \right\}^{0,5}$	10.4
	$f_{01} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{2}{m} \left[\frac{l^3}{24EJ} + \frac{h^3}{3EJ} - \frac{l^4 GJ}{32EJ(2hEJ + lGJ)} \right] \right\}^{0,5}$	10.5

В приведенных в таблице 10.2 формулах обозначены величины:

E – модуль упругости материала вывода элемента, Н/м²;

J – момент сечения вывода радиоэлемента;

m – масса элемента, кг;

ℓ – расстояние от корпуса элемента до изгиба вывода, м;

h – высота установки РЭ над поверхностью платы, м;

$k = h/l$ – коэффициент;

$G = E/2(1 + \varepsilon)$ – модуль упругости второго рода (модуль сдвига)

материала рамы,

Для вариантов установки 3...8 (табл. 10.1) характерно отсутствие резонансов выводов РЭ в диапазоне частот воздействующих МВ (их собственные частоты сравнительно большие). Однако при резонансе самой платы в выводах также могут иметь место напряжения, способные привести к усталостным разрушениям. Этот случай (кинематическое возбуждение системы) на данном практическом занятии не рассматривается. Методика расчета времени до разрушения при резонансе платы приведена в [2].

Механические напряжения следует определять в опасных местах (сечениях) выводов, в которых они максимальны и вероятность поломки наибольшая. Как правило, это места крепления выводов к корпусу РЭ и к плате, а также точки изгиба. Для модели в виде рамы на рис. 10.3 они обозначены буквами А, В, С и D. Ввиду симметрии конструкции $\sigma_A = \sigma_D$ и $\sigma_B = \sigma_C$, поэтому достаточно рассчитать только два механических напряжения и выбрать среди них наибольшую величину.

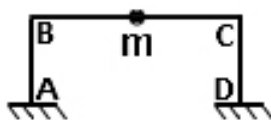


Рис. 10.3. Места наибольших напряжений в раме

Расчет механических напряжений в выводах при колебаниях на резонансной частоте РЭ выполняется в следующем порядке [2].

1) Определяют инерционную силу по формуле

$$P_u = \mu_0 m g n_\varepsilon, \quad (10.6)$$

где $\mu_0 = \frac{\pi}{\Lambda}$ – коэффициент динамичности на резонансной частоте РЭ,

Λ – логарифмический декремент затухания;

n_ε – заданная величина перегрузки.

Величину Λ можно найти через частоту свободных колебаний системы f_{01} или коэффициент затухания δ_0 по следующим формулам:

$$\Lambda = \pi / \sqrt{f_{01}}; \quad \Lambda = 2\pi\delta_0.$$

Величина коэффициента затухания для некоторых распространенных материалов приводится в таблице К.1 приложения К, обычно его значение находится в пределах 0,02...0,25 [2].

2) Рассчитывают изгибающие моменты в слабых сечениях рамы по формулам, приводимым в таблице 10.3.

3) Определяют механические напряжения в этих сечениях. Так как колебания выводов РЭ являются изгибными, для расчета времени до усталостного разрушения выводов необходимы только нормальные механические напряжения. Нормальные напряжения в выводах определяются по формуле

$$\sigma = M_{\text{и}}/W_{\text{и}} = M_{\text{и}}d/2J, \quad (10.7)$$

где $M_{\text{и}}$ – изгибающий момент в сечении вывода, в котором рассчитывается напряжение;

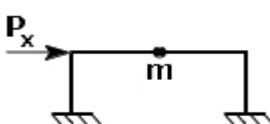
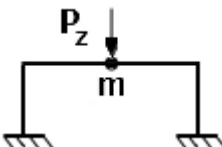
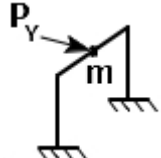
$W_{\text{и}}$ – момент сопротивления изгибу вывода;

d – сторона поперечного сечения вывода, параллельная плоскости изгиба (для круглого сечения – диаметр);

J – момент инерции поперечного сечения вывода.

4) После того, как определена величина максимального напряжения в выводах σ_{max} , по таблице приложения Л.1 определяют параметры кривой усталости σ_0 и β , а затем по формулам (10.1) и (10.2) рассчитывают величины N_p и t_p .

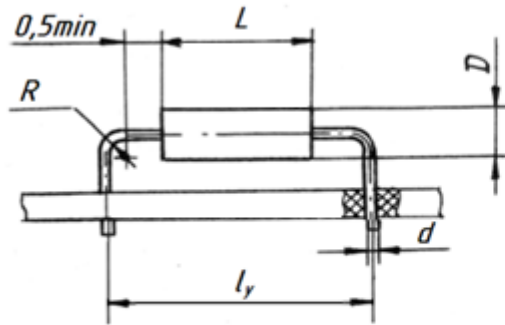
Табл. 10.3. Формулы для расчета изгибающих моментов

Вариант модели	Формулы для расчета изгибающих моментов
	$M_A = M_D = (1 + 3k) \cdot hP / 2(1 + 6k);$ $M_B = M_C = 1,5 \cdot khP / (1 + 6k).$ $k = h / l$
	$M_A = M_D = Pl / 8 \cdot (2 + k);$ $M_B = M_C = Pl / 4 \cdot (2 + k).$
	$M_A = M_D = Ph / 2;$ $M_B = M_C = (Pl / 4) \cdot \{1 - l / [4EJ(h / GJ + l / 2EJ)]\}.$

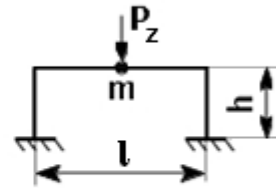
10.3. Пример расчета времени до отказа вывода РЭ

Исходные данные:

– Резистор С2-33Н-0,5Вт, установлен на печатную плату по ГОСТ29137-91, вариант 140.00.0602.08.00 (рис. 10.4, а), его расчетная модель – рама (рис. 10.4, б);



а) Установка резистора



б) Расчетная модель

Рис. 10.4.

- геометрические размеры: $D = 4,0$ мм, $L = 10,8$ мм, $l_y = 15$ мм, $d = 0,8$ мм;
- масса резистора $m = 1,0$ г;
- сила действует вдоль оси Z, перегрузка $n = 20$ g;
- выводы выполнены из медной проволоки с параметрами: $E = 1,23 \cdot 10^{11}$ Н/м², $\rho = 8,96$ г/см³.

Расчет.

Определяем параметры расчетной модели:

- размер горизонтального звена рамы $\ell = l_y - L = (15 - 10,8) \cdot 10^{-3} = 4,2 \cdot 10^{-3}$ м;
- зазор между резистором и платой $l_3 = 1$ мм, поэтому высота рамы $h = (0,5D + 1) \cdot 10^{-3} = (0,5 \cdot 4 + 1) \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3}$ м;
- отношение высоты рамы к ее длине $k = h/\ell = 3 \cdot 10^{-3} / 4,2 \cdot 10^{-3} = 0,71$.

Выполняем расчет собственной частоты f_{01} :

$$f_{01} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \left\{ \frac{24 \cdot 1,23 \cdot 10^{11} \cdot 2,05 \cdot 10^{-14}}{1 \cdot 10^{-3} (3 \cdot 10^{-3})^3 [1 + 3/(6 \cdot 0,71 + 1)]} \right\}^{0,5} = 6015,4 \text{ Гц}$$

Определяем логарифмический декремент затухания

$$\Lambda = \pi / (f_{01})^{0,5} = 3,14 / (6015,4)^{0,5} = 0,0405$$

Коэффициент динамичности при резонансе

$$\mu_0 = \pi / \Lambda = 3,14 / 0,0405 = 77,53;$$

Инерционная сила, действующая на резистор

$$P_u = \mu_0 \cdot m \cdot g \cdot n_g = 77,53 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 20 = 15,196 \text{ Н}$$

Определяем изгибающие моменты для характерных точек

$$M_A = M_D = P_u l / 8(2 + K) = 15,196 \cdot 4,2 \cdot 10^{-3} / 8 \cdot (2 + 0,71) = 2,944 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_B = M_C = P_u l / 4(2 + K) = 15,196 \cdot 4,2 \cdot 10^{-3} / 4 \cdot (2 + 0,71) = 5,89 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Момент сопротивления изгибу выводов*

$$W_u = I / (0,5d) = 2,05 \cdot 10^{-14} / 0,5 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} = 5,13 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3;$$

Изгибные напряжения в характерных точках:

$$\sigma_A = \sigma_D = \frac{M_A}{W_u} = \frac{2,944 \cdot 10^{-3}}{5,13 \cdot 10^{-11}} = 57,39 \cdot 10^6 \text{ Н} / \text{м}^2;$$

$$\sigma_B = \sigma_C = \frac{M_B}{W_u} = \frac{5,89 \cdot 10^{-3}}{5,13 \cdot 10^{-11}} = 114,81 \cdot 10^6 \text{ Н} / \text{м}^2.$$

Таким образом, максимальная величина изгибных напряжений $\sigma_{\max} = 114,81 \cdot 10^6 \text{ Н} / \text{м}^2$.

По кривой усталости, приведенной в приложении Л на рис. Л.1, для максимального напряжения $\sigma_{\max}$ находим число циклов нагружения до разрушения $N_p \approx 10^7$. Время работы резистора до отказа

$$t_p = N_p / f_{01} = 3 \cdot 10^6 / 6015,4 = 499 \text{ с} \approx 8,3 \text{ мин.}$$

*Для расчета использовалась стандартная формула для элементов круглого сечения $I = 0,05 \cdot d^4 = 2,05 \cdot 10^{-14} \text{ м}^4$.

10.4. Рекомендуемая литература

1. **Кофанов Ю.Н. и др.** Информационная технология моделирования механических процессов в конструкциях радиоэлектронных средств – М.: Радио и связь, 2000. – 160 с.

2. **Белоусов, О.А.** Основные конструкторские расчеты в РЭС: учебное пособие/О.А. Белоусов, Н.А. Кольтюков, А.Н. Грибков. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 84 с.

ТЕМА 11. ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЕЧАТНОГО УЗЛА

11.1. Краткие теоретические сведения

При длительных воздействиях вибрации могут происходить усталостные отказы не только выводов РЭ, но и элементов конструкции печатной платы (обрывы печатных проводников, разрушения паяных соединений, нарушение контактов в электрических соединителях и др.). Время до такого отказа значительно сокращается, если печатная плата совершает колебания на частоте собственного резонанса. Методика расчета характеристик таких отказов приведена в [2]. Существует также способ оценки усталостной прочности печатных узлов, основанный на многолетнем опыте их испытаний [1].

Если плата ПУ выдерживает не менее 10 млн. циклов нагружения знакопеременным воздействием, то ее усталостная прочность считается достаточно высокой. Автором [1] получено эмпирическое соотношение, при выполнении которого это условие также выполняется:

$$f_0 \geq \sqrt[3]{\left(\frac{\gamma(f_0) \cdot g \cdot n_g}{0,003 \cdot b} \right)^2}, \quad (11.1)$$

где f_0 – собственная частота платы;
 n_g – величина виброперегрузки;
 b – размер короткой стороны платы, мм;
 $\gamma(f_0)$ – безразмерная постоянная, значение которой зависит от f_0 и n_g .

Величина $\gamma(f_0)$ при перегрузках $n_g=3...10$ определяется по таблице 11.1.

Табл. 11.1 Значения коэффициента $\gamma(f_0)$

Собственная частота f_0 , Гц	50-100	100-400	400-700
$\gamma(f_0)$	17,5	25,0	35,0

11.2. Пример оценки усталостной долговечности ПУ

Исходные данные:

- размеры печатной платы $160 \times 148 \times 1,5$ мм;
- параметры материала платы: $\rho = 2,28 \cdot 10^3$ кг/м³, $E = 30,2 \cdot 10^9$ н/м², $\varepsilon = 0,22$;
- масса компонентов на плате $m_k = 73,1$ г;

- диапазон частот гармонической вибрации 80...120 Гц;
- допустимая по ТЗ перегрузка $n_b = 3$.

Расчет.

Для расчета собственной частоты ПУ используем формулу:

$$f_{01} = 1/2\pi \cdot \alpha/a^2 \sqrt{Dab/(m_n + m_k)}, \quad (11.2)$$

где a, b – размеры платы ($a \geq b$), м;

α – коэффициент, зависящий от формы и способа закрепления платы.

m_n, m_k – масса платы и компонентов соответственно, кг;

$D = Eh^3/12(1-\epsilon^2)$ – цилиндрическая жесткость платы, Н·м;

E – модуль упругости, н/м²;

ϵ_n – коэффициент Пуассона;

h – толщина платы, м;

α – коэффициент, зависящий от формы и способа закрепления платы.

Цилиндрическая жесткость платы:

$$D = 30,2 \cdot 10^9 (1,5 \cdot 10^{-3})^3 / 12(1-0,22^2) = 8,93 \text{ Н·м.}$$

Масса печатной платы:

$$m_n = \rho(a \cdot b \cdot h) = 2,28 \cdot 10^3 (0,16 \cdot 0,148 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}) = 0,081 \text{ кг}$$

На одной из сторон платы установлены две соединительные колодки, поэтому ее мы считаем жестко закрепленной. Остальные три стороны считаем свободно опертыми.

По таблице К.4 приложения К определяем коэффициенты для выбранной модели платы: $\kappa = 9,87$; $\alpha = 1$; $\beta = 2,33$; $\gamma = 2,44$.

Находим значение коэффициента закрепления α , по формуле

$$\alpha = \kappa (\alpha + \kappa a^2/b^2 + \gamma a^4/b^4)^{0,5} = 9,87(1 + 2,33 + 2,44)^{0,5} = 23,7$$

Определяем собственную частоту печатного узла по формуле (11.2)

$$f_0 = 1/2\pi \cdot 23,7/0,0256 \sqrt{\frac{8,93 \cdot 0,02368}{0,081 + 0,073}} = 173 \text{ Гц}$$

Собственная частота ПУ превышает наибольшую частоту внешних вибрационных воздействий, поэтому резонанса в ней не будет. Однако при длительных воздействиях вибраций может произойти отказ из-за усталостных разрушений платы. Для обеспечения усталостной долговечности должно выполняться условие (11.1).

По таблице 11.1 находим $\gamma(f_0) = 25$, тогда

$$f_{0 \min} \geq \sqrt[3]{\left(\frac{25 \cdot 3 \cdot 9,8}{0,003 \cdot 148} \right)^2} = 139,9 \text{ Гц}$$

Собственная частота колебаний модуля блока питания превышает $f_{0\min}$, поэтому условие усталостной долговечности для него соблюдается.

11.3. Рекомендуемая литература

1. **Steinberg, D.S.** Countering the effects of vibration on board-and-chassis systems/ D.S. Steinberg: Electronics, №16, 1977, pp. 100-102.
2. Токарев М.Ф., Талицкий Е.Н., Фролов В.А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Уч. пособие / Под ред. В.А. Фролова. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Понятия и определения

А.1. Прочность, устойчивость и стойкость аппаратуры

По ГОСТ16019-2001:

Прочность аппаратуры – способность аппаратуры сохранять свои параметры в пределах установленных допусков после воздействия механических и климатических факторов.

Устойчивость аппаратуры – способность аппаратуры сохранять свои параметры в пределах установленных допусков во время воздействия механических и климатических факторов.

Стойкость аппаратуры – способность аппаратуры сохранять свои параметры в пределах установленных допусков, измеренные во время и после воздействия механических и климатических факторов

А.2. Модернизация, модифицирование и совершенствование изделий – виды разработки изделий, состоящие в ограниченном изменении структуры и (или) состава выпускаемых изделий, при котором сохраняется основная часть технической документации, и используются основные результаты выполненной разработки исходной продукции и постановки ее на производство.

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

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

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

А.3. Рабочая и предельная температуры

Рабочая температура – температура, при которой электронное средство (ЭС) должно выполнять свои функции, при этом параметры должны оставаться в пределах норм, установленных в стандартах и ТУ на ЭС.

Предельная температура – тепловой параметр, после воздействия которого радиоэлектронное средство (ЭС) должно выполнять свои функции, при этом параметры должны оставаться в пределах норм, установленных в стандартах и ТУ на ЭС.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Пример технического задания на модернизацию конструкции

Б.1. Наименование, назначение, класс и группа изделия

Полное наименование: "Коммутатор линий связи модернизированный".

Сокращенное наименование: "Коммутатор".

Обозначение в документации – КЛС-01М.

Изделие предназначено для применения в измерительных системах по учету расхода тепла на предприятиях и в организациях.

По месту размещения и условиям эксплуатации КЛС-01М относится к классу В, группе С1 по ГОСТ Р МЭК 611921-210.

Б.2. Основание и исходные данные для выполнения проекта

Основанием для выполнения проекта является задание, выданное на кафедре КиТ ЭС Арзамасского политехнического института _____ (число, месяц, год выдачи задания).

Б.3. Прототип изделия

Прототипом КЛС-01М является не модернизированный вариант коммутатора линий связи КЛС-01 АБВГ.421419.010 ТУ.

Б.4. Цели и задачи модернизации изделия

Цель – повышение конкурентоспособности изделия на внутреннем и внешнем рынках (страны СНГ).

Основные задачи модернизации:

- уменьшение габаритной высоты корпуса, которая не должна превышать 100 мм;
- повышение морозостойкости изделия при длительном хранении до минус 50 °С;
- улучшение внешнего вида изделия путем разработки более выразительной и эргонометричной передней панели;
- увеличение срока службы изделия до 12 лет.

Б.5. Технические требования

Б.5.1. Состав изделия и требования к его конструкции

В состав изделия при поставке должны входить: блок КЛС-01М; сетевой кабель питания; паспорт; инструкция по применению, комплект для настенного крепления блока.

Б.5.2. Показатели назначения

Б.5.2.1. Изделие предназначено для подсоединения нескольких теплосчетчиков типа ТС-06, ТС-07 к персональному или промышленному компьютеру через стандартный интерфейс RS-232.

Б.5.2.2. Питание КЛС-01М осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В (+10 %, минус 20 %) частотой 50 Гц (± 1 Гц).

Б.5.2.3. Потребляемая мощность блока не превышает 3 Вт.

Б.5.2.4. Режим работы блока – непрерывный.

Б.5.2.5. Время готовности к работе после включения питания не более трех секунд.

Б.5.2.6. Обмен информацией с компьютером производится в последовательном коде по интерфейсу RS-232 с присвоением номера абонента каждому теплосчётчику.

Б.5.2.7. Количество подключаемых к коммутатору линий связи абонентов – до четырех.

Б.5.3. Требования к конструкции

Б.5.3.1. Коммутатор линий связи должен быть выполнен в удобном для переноски корпусе.

Б.5.3.2. Масса изделия не должна превышать 0,8 кг.

Б.5.3.3. Объем изделия не должен превышать 4,8 дм³, при этом его высота не должна превышать 100 мм.

Б.5.3.4. Корпус изделия должен отвечать требованиям группы IP54 ГОСТ 14254 (МЭК 529-89 СЕI70-1 EN60529).

Б.5.3.5. Требования к установке и креплению на объекте

В отличие от прототипа конструкция КЛС-01М должна допускать два варианта установки и крепления:

- на ровной горизонтальной поверхности;
- на вертикальной стенке (крепление навесное).

Б.5.3.6. Корпус КЛС-01М должен пломбироваться заводом-изготовителем или сервисной службой. Свободный доступ при эксплуатации допускается только к коммутационному полю изделия.

Б.6. Требования по надежности

Б.6.1. Показатели безотказности

Средняя наработка на отказ должна быть не менее 20000 часов с учетом технического обслуживания.

Б.6.2. Средний срок службы не менее 12 лет.

Б.7. Условия эксплуатации

Б.7.1. Изделие при эксплуатации должно быть стойким и устойчивым к внешним климатическим факторам установленным ГОСТ Р МЭК 611921-210 для ЭС группы С1 с уточнениями, приведенными в таблице Б.1.

Б.7.2. Изделие должно быть прочным к воздействию синусоидальной вибрации в соответствии с требованиями группы N1 по ГОСТ 12997-84.

Таблица Б.1 – Климатические условия эксплуатации коммутатора

Климатический фактор (КФ)	Характеристика КФ	Предельное значение КФ	Примечание
Атмосферное пониженное давление	Рабочее минимальное, мм рт. ст.	630	устойчивость
Повышенная температура среды	Рабочая, °С Предельная, °С	+40 +55	устойчивость стойкость
Пониженная температура среды	Рабочая, °С Предельная, °С	+1 минус 50	устойчивость стойкость
Относительная влажность при температуре окружающей среды не выше +35 °С	Рабочая, % Предельная, %	80 98	устойчивость стойкость
Воздействие конденсированных осадков (иней, роса)	Температура, °С давление, мм рт. ст.	минус 20 630	прочность

Б.8. Требования к ЭМС изделия

Изделие КЛС-01М должно быть устойчивым к воздействию внешнего переменного электромагнитного поля сетевой частоты напряженностью до 80 А/м. Данное требование проверяется испытанием опытного образца КЛС-01М.

Б.9. Требование к ремонтпригодности

Блок КЛС-01М относится к восстанавливаемым и ремонтируемым изделиям. Ремонт допускается проводить на предприятии-изготовителе или в лицензированной организации сервисного обслуживания.

Б.10. Требования к комплектующим изделиям

Б.10.1. Изделие должно быть разработано с максимальным использованием деталей, узлов и конструктивных элементов, использованных в прототипе.

Б.10.2. В обоснованных случаях в изделии допускается использовать элементную базу, материалы и метизы иностранного производства.

Б.11. Требования к транспортировке и хранению

Изделие, упакованное в транспортную тару, должно сохранять работоспособность после транспортирования любым видом транспорта без ограничения расстояния и скорости.

Б.12. Производственно-технологические требования

Б.12.1. Освоение производства модернизированного изделия должно быть осуществлено с минимальными затратами и в срок не более 8 месяцев с начала его разработки.

Б.12.2. Планируемый объем выпуска модернизированного изделия в первый год – 100 шт.

Б.13. Требования охраны окружающей среды

Б.13.1. Изделие КЛС-01М при испытаниях, транспортировании, хранении и эксплуатации не должно наносить вреда окружающей среде и здоровью человека.

Б.13.2. В целях электробезопасности корпус коммутатора выполнить из электроизоляционного материала.

Допускается опытные экземпляры изготовить из электропроводящего материала с соблюдением всех норм электробезопасности применительно к изделию.

Б.14. Эстетические и эргонометрические требования

Б.14.1. Поверхность корпуса должна быть матовой, основной цвет внешней поверхности светло-серый или черный.

Б.14.2. Все надписи на лицевой панели блока должны быть легко читаемы в условиях искусственного освещения с расстояния до 1 м.

Б.15. Этапы выполнения проекта

Этапы выполнения проекта определяются календарным учебным планом.

Б.16. Приложения

В приложении X приводятся электрические схемы изделия КЛС-01М.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Пример выполнения анализа ТЗ из приложения Б

Изделие КЛС-01 является блоком стационарного типа с длительным сроком службы и возможностью непрерывной работы (класс В, ГОСТ Р МЭК 611921-2010), предназначенным для эксплуатации в отапливаемых наземных и подземных сооружениях (группа С1, ГОСТ Р МЭК 611921-2010).

Сроки и стоимость разработки и освоения производства изделия должны быть минимальными. Для выполнения этого требования целесообразно использовать частичное заимствование элементов конструкции от прототипа, максимальное применение в нем унифицированных деталей и узлов, а также заложить технологические процессы, хорошо освоенные на предприятии.

На основании анализа ТЗ и документации на прототип можно сделать ряд конкретных выводов по конструкции изделия.

1) Корпус необходимо выполнить из пластмассы. С целью унификации используемых материалов целесообразно использовать пластик марки АБС 2020 ТУ 6-05-1587-79, который применяется во многих других изделиях предприятия. Этот материал по своим механическим, технологическим, стоимостным и эстетическим свойствам вполне удовлетворяет требованиям перспективной разработки. Для выполнения п. 14 ТЗ пресс-форма должна обеспечивать получение шероховатой фактуры наружных лицевых поверхностей деталей корпуса.

2) Высота блока, как следует из сборочного чертежа прототипа, определяется только высотой сетевого трансформатора, сердечник которого имеет броневую конструкцию. В модернизированной электрической принципиальной схеме блока вместо аналогового источника питания (АИП) используется импульсный преобразователь напряжения с рабочей частотой переключения 132 кГц. В связи с этим по своим габаритам импульсный трансформатор будет значительно меньше сетевого трансформатора. Следовательно, задача уменьшения высоты блока является выполнимой.

3) Уменьшение размеров блока может привести к нарушению нормального теплового режима. Учитывая значительно более высокий КПД импульсного преобразователя (80% против 45–50% у блока-прототипа) можно предположить, что тепловой режим модернизированного изделия возможно даже улучшится, а значит, и повысится его надежность без применения каких-либо дополнительных

мер. Тепловой режим КЛС-01М можно будет проанализировать только после выполнения окончательного варианта компоновки. При этом очень желательно сохранение естественного воздушного охлаждения блока, как у прототипа.

Для коммутатора в ТЗ задан длительный непрерывный режим работы, следовательно, моделирование его теплового режима необходимо выполнить для стационарных условий, при этом за температуру окружающей среды следует принимать повышенную рабочую температуру (таблица 1 в ТЗ).

4) Согласно п.4 ТЗ при модернизации необходимо повысить морозостойкость конструкции. При разработке электрической принципиальной схемы КЛС-01М это требование учтено путем замены конденсаторов К50-63 на более морозостойкие изделия. Задача конструирования в связи с этим – учесть изменение установочных размеров оксидных конденсаторов.

5) Время готовности к работе изделия после включения питания не более 3 с. Наличие этого периода работы обусловлено необходимостью завершения всех переходных процессов в схеме, прогрева ЭРЭ и стабилизации их рабочих режимов. В связи с этим необходимо отметить, что схема КС-01М чисто цифровая, и она не содержит прецизионные элементы, для которых обычно требуется значительное время для выхода на заданный режим работы. Поэтому это требование ТЗ выполнимо без принятия дополнительных мер.

6) Выполняя анализ прилагаемой к ТЗ электрической принципиальной схемы можно предположить, что при работе с изделием трудно будет определить включено питание или нет. Для устранения этого недостатка в схему целесообразно добавить световой индикатор включения сети.

7) Изучение сборочного чертежа прототипа приводит к выводу, что верхнюю крышку корпуса и крышку заднего люка можно использовать от прототипа с минимальными изменениями. При этом требование п. 4, 14.2 можно выполнить путем разработки новой декоративной наклейки, которая в основном определяет внешний вид блока со стороны передней панели. Сам корпус блока необходимо разработать заново, при этом его высоту необходимо уменьшить не менее чем на 22 мм.

8) Несмотря на применение в корпусе уплотнителей влага все равно будет в каком-то количестве проникать внутрь, поэтому целесообразно использовать покрытие печатных плат защитным лаком. В результате этого ремонт изделия будет сильно затруднен, поэтому необходимо принять компромиссное решение – покрывать локально только чувствительные к влаге элементы. Необходимо также рассмотреть вопрос о замене используемого на предприятии лака

УР231 на материал более пригодный для ремонтных работ, например, на полимерную композицию СИМ-01.

9) В подпункте 7.2 указано, что по вибропрочности изделие должно отвечать требованиям группы N1 по ГОСТ 12997-84. Указанной группе соответствует синусоидальная вибрация с частотой от 10 до 55 Гц, амплитудой до 0,15 мм и ускорением $19,6 \text{ м/с}^2$. Из стандарта следует, что такое воздействие при эксплуатации изделия может возникнуть из-за работающих вблизи машин и механизмов.

По своему уровню указанное воздействие является относительно мягким, поэтому вибропрочность проектируемого изделия можно реализовать простым способом – обеспечить необходимые жесткости печатных плат, деталей корпуса и др. тонкостенных элементов конструкции. Дополнительно выполнению требований к механической стойкости будет способствовать уменьшение размеров и масс многих деталей и узлов в результате модернизации конструкции коммутатора.

10) Для выполнения требования п.8 ТЗ необходимо рассмотреть вопрос о целесообразности нанесения на внутренние поверхности пластмассового корпуса (см. п. 1 настоящего анализа) экранирующей фольги и специальной краски.

11) Цифровой принцип работы коммутатора должен быть учтен при конструировании печатных узлов, т.к. цифровые микросхемы способны создавать в шинах питания импульсные помехи.

Самые сильные помехи в разрабатываемом блоке будет создавать преобразователь напряжения, т.к. он представляет собой мощное импульсное устройство. Для обеспечения ЭМС в этом случае необходимо максимально удалить этот узел от других элементов блока и, возможно, произвести его экранирование.

12) В блоке прототипа внутри блочные соединения выполнены объемным жгутом. Заменять его более прогрессивным ленточным кабелем нецелесообразно ввиду большой разветвленности этих соединений.

Между проводниками в жгутах могут возникнуть помехи, обусловленные электромагнитными связями между ними. В связи с этим при разработке внутриблочных соединений КЛС-01М целесообразно использовать метод группирования. Целью группирования проводов в жгуте является исключение наличия в одном жгуте чувствительных рецепторов и мощных источников помех.

Заключение: анализ ТЗ говорит о возможности разработки конструкции коммутатора КЛС-01М, отвечающей всем его требованиям.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г (справочное)

Основные способы и требования к питанию ЭС

Стационарные ЭС чаще всего питаются от электрической сети общего назначения (ЭСОН) переменного тока с номинальной частотой 50 Гц (в некоторых зарубежных странах – 60 Гц). Стандарт **ГОСТ 13109-97** устанавливает показатели и нормы качества электрической энергии в ЭСОН переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц. Показателями качества ЭСОН являются: отклонение и колебания напряжения, отклонение частоты, несинусоидальность и несимметрия напряжения, провал напряжения, импульс напряжения, временное перенапряжение. При соблюдении указанных в **ГОСТ 13109-97** норм обеспечивается электромагнитная совместимость ЭСОН и электрических сетей потребителей электрической энергии (приемников электрической энергии) в части кондуктивных помех.

На борту самолета (вертолета) используются два типа сети энергоснабжения: сеть переменного тока (однофазная либо трехфазная напряжением 115/200 В, 400 Гц), которая обычно используется для питания энергоемких устройств, и сеть постоянного тока напряжением 27 В – для питания большинства бортовых ЭС. Согласно **ГОСТ 19705-89** бортовая сеть постоянного тока имеет номинальное напряжение $27 \text{ В} \pm 7,4\%$. При этом допускается появление в сети кратковременных импульсов с амплитудой $\pm 50 \text{ В}$ и длительностью не более 5 мкс. Также в сети возможен перерыв в подаче напряжения длительностью не более 80 мс или его снижение: до 10 В не более чем на 1 с; до 14 В на время не более 5 с; до 15 В не более чем на 40 с. Указанные особенности бортовой сети постоянного напряжения связаны с работой и запуском авиадвигателей.

Носимые ЭС работают от автономных источников питания (АИП) – батарей или аккумуляторов. Для данного типа ЭС в документации (ТЗ, ТУ и др.) обязательно указывается общая емкость АИП или время работы изделия до их замены.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(справочное)

Значения относительных показателей качества ЭС

Табл. Д.1. Значения относительных показателей качества

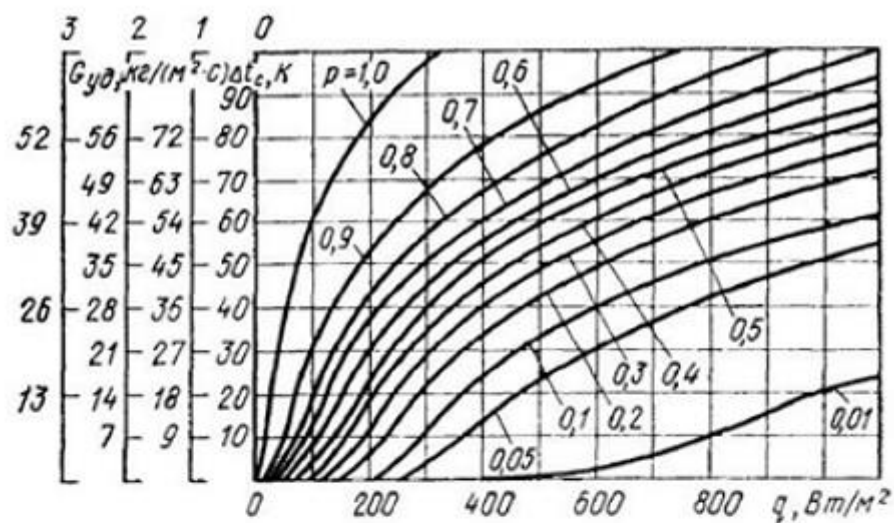
Показатель	Значение показателей для ЭС			
	Передачики	Устройства питания	Устройства индикации	Вычислительные устройства
m_0 , кг/м ³	600-800	700-900	500-700	400-600
K_v	0,3-0,4	0,5-0,7	0,2-0,4	0,3-0,5

Табл. Д.2. Значения относительных показателей качества для функциональных ячеек (печатных узлов) на корпусированных ИС

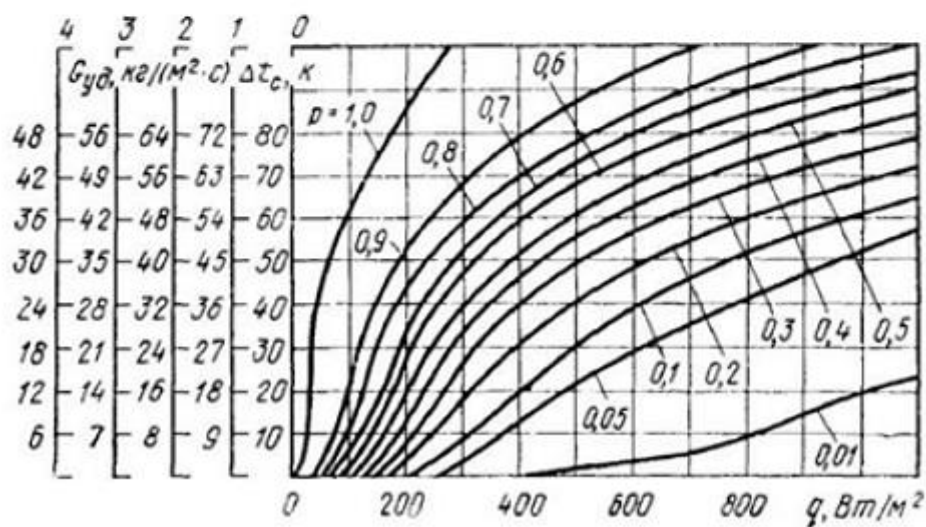
Границы показателей	Значения относительных показателей				
	m_0 , г/см ³	γ , эл/см ³	q_m	q_v	q_s
Минимальное	0,139	1,54	1,33	3,67	2,51
Среднее	0,6	4,6	2,8	14,3	6,3
Максимальное	1,827	10,2	8,7	24,6	16,2

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Вероятностные кривые для выбора способа охлаждения



а)



б)

- а) – при свободном воздушном охлаждении и внутреннем перемешивании;
 б) – при свободном воздушном охлаждении с наружным обдувом корпуса

Рис. Е.1. Вероятностные кривые для выбора системы охлаждения в герметичном корпусе:

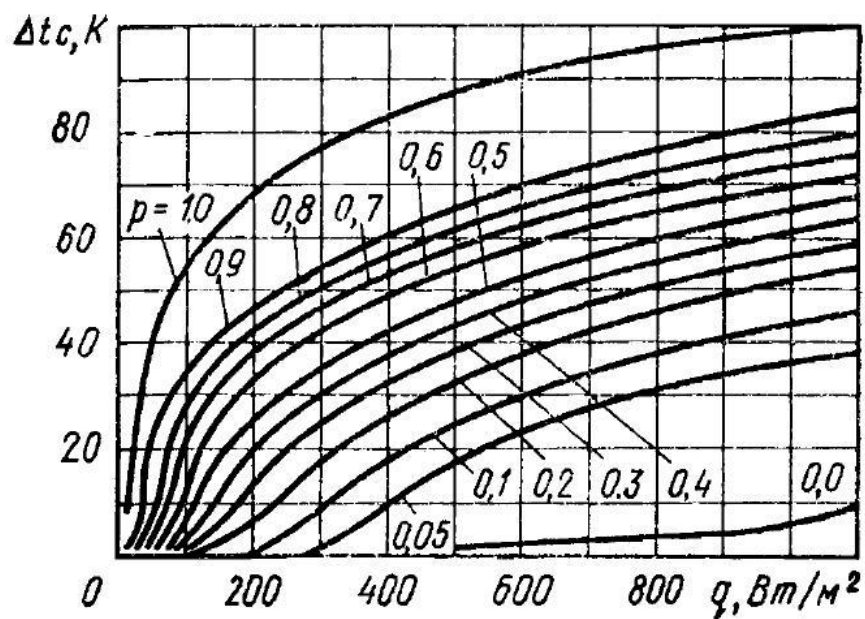


Рис. Е.2. Вероятностные кривые для блоков в перфорированном корпусе при свободной конвекции

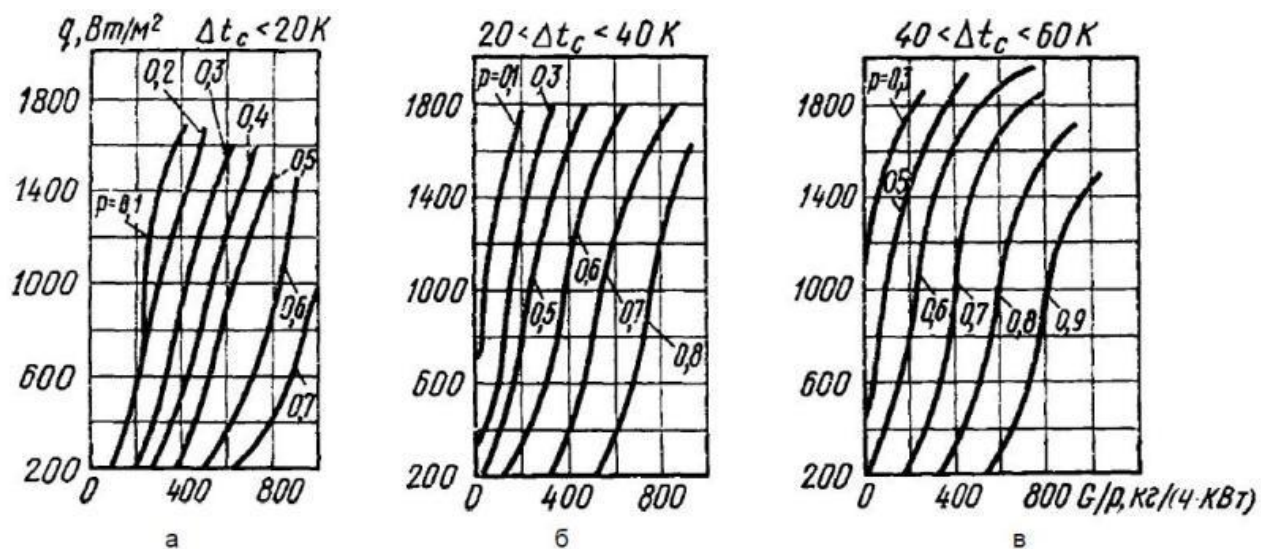


Рис. Е.3. Вероятностные кривые для блоков с принудительным продувом воздуха

ПРИЛОЖЕНИЕ К
(справочное)

**Справочные данные для расчета механических характеристик
электронных средств**

Таблица К.1 – Физико-механические свойства материалов

Материал	Параметры материалов				
	Плотность ρ , г/см ³	Модуль упругости $E \cdot 10^{-9}$, Па	Коэффициент Пуассона ξ	Предел прочности при изгибе $\sigma \cdot 10^{-6}$, Па	Коэффициент демпфирования δ_0
Сплавы алюминия:					
Д1	2,8	71	0,29	410	0,05...0,013
Д16	2,76	71	0,29	520	
В95	2,85	71	0,29	560	
АМц	2,73	71	0,29	520	
АЛ2	2,65	71	0,29	180	
АЛ9	2,65	72	0,29	200	
АД1	2,71	69,6		58	
Сплавы титана:					
ВТ6, ВТ3	4,4...4,9	105	0,25...0,33	950	
Сплавы магниевые:					
МА18	1,48	45		180	0,0063..0,0125
МА2-1	1,8	46		280	
29НК (ковар)	8,35	145		480	
Сталь 20	7,82	200	0,25	420...610	
Сталь 45	7,82	200	0,25	420...610	
30ХГСА	7,85	198	0,36	1080	
Бронза	8,27	75...141	0,31	200...1350	
Латунь	8,5	106...110	0,41	320...700	0,03...0,06
Ситалл СТ50-1	2,65	180	0,26	176	
Керамика 22ХС	3,86	255	0,26	85	
Брокерит-9	2,83	320		100	
Поликор	3,98	392	0,26	200	
Фторопласт-4	2,25	0,47...0,85	22		
Стеклотекстолит:					
СФ	1,85	30,2	0,22	75	0,02...0,1
СТЭФ	2,47	32	0,279	75	0,02...0,1
Гетинакс	1,4				0,03...0,08

Табл. К.2. Коэффициенты механических потерь материалов η , при деформациях чистого изгиба

Материал	Напряжение $\sigma \cdot 10^7$, Н/м ²	$\eta \cdot 10^{-2}$
<i>Алюминиевые сплавы</i>		
АЛ-9	2 – 10	0,06 – 0,14
Д16	2 – 8	0,08 – 0,22
Магниевый сплав АМцАМ	1,5 – 6	0,12 – 0,22
Магниевый сплав АМг	2 – 8	0,1 – 0,13
Магниевый сплав Мл5	1,5 – 6	0,05 – 0,12
<i>Другие материалы</i>		
Красная медь	2 – 16	0,15 – 4
Латунь ЛС59-1	5 – 15	0,05 – 0,1
Гетинакс	1 – 4	0,05 – 0,3
Стеклотекстоит	0,5 – 4	0,3 – 1,3

Табл. К.4. Коэффициенты закрепления платы

№	Эскиз закрепления	Коэффициенты					Эскиз закрепления	Коэффициенты			
		k	α	β	γ			k	α	β	γ
1		9,87	1	2	1	18		22,37	1	0	0
2		9,87	1	2,33	2,44	19		22,37	0	0	1
3		15,42	1	0,95	0,41	20		3,52	1	0	0
4		9,87	1	2,57	5,14	21		3,52	0	0	1
5		22,37	1	0,48	0,19	22		15,42	1	0	0
6		15,42	1	1,11	1	23		15,42	0	0	1
7		22,37	1	0,57	0,47	24		3,52	1	5,56	19,2
8		15,42	1	1,19	2,1	25		15,42	1	0,29	0,05
9		22,37	1	0,61	1	26		3,52	1	1,58	0
10		3,52	0	1	0	27		3,52	0	1,58	1
11		9,87	0	0	1	28		22,37	0	0,1	1
12		9,87	1	0	0	29		22,37	1	0,1	0
13		9,87	0	0,43	1	30		15,42	0	0,34	1
14		9,87	1	0,43	0	31		15,42	1	0,34	0
15		3,52	1	5,97	40,5	32		9,87	1,26	0,6	1
16		22,37	1	0,14	0,02	33		9,87	1	0,6	1,26
17		3,52	1	2,48	1	а - длинная сторона; b - короткая					

ПРИЛОЖЕНИЕ Л (справочное)

Справочные данные для расчета усталостной долговечности элементов и узлов

Табл. Л.1. Параметры кривых усталости для выводов радиоэлементов

Тип радиоэлемента	Вариант установки по табл. 10.1	$\sigma_0 \cdot 10^{-7}$, Н/м ²	β
C2-29-0,125	3	$7,7^{+0,9}_{-1,2}$	$7,54 \pm 1,27$
C2-29-0,25	3	$7,5^{+0,9}_{-1,4}$	$7,47 \pm 1,34$
C2-29-0,5	3	$7,3^{+1,0}_{-1,1}$	$7,40 \pm 1,30$
C2-29-1	3	$7,2^{+0,8}_{-1,2}$	$7,34 \pm 1,35$
C2-29-2	3	$7,1^{+1,0}_{-1,1}$	$7,28 \pm 1,25$
C2-29-0,125	1	$7,5^{+1,0}_{-0,8}$	$7,45 \pm 1,14$
C2-29-0,25	1	$7,3^{+1,0}_{-0,8}$	$7,30 \pm 1,20$
C2-29-0,5	1	$7,2^{+1,0}_{-0,8}$	$7,28 \pm 1,14$
C2-29-1	1	$7,0^{+1,1}_{-0,9}$	$7,16 \pm 1,03$
C2-29-2	1	$6,9^{+1,0}_{-0,9}$	$7,11 \pm 0,95$
K53-18-16В-10мкФ	3	$9,3^{+1,1}_{-1,0}$	$10,87 \pm 1,32$
K53-18-16В-220мкФ	3	$9,1^{+1,2}_{-1,1}$	$10,12 \pm 1,55$
K53-18-16В-10мкФ	1	$8,9^{+0,7}_{-0,5}$	$10,10 \pm 1,21$
K53-18-16В-220мкФ	1	$8,7^{+0,8}_{-0,9}$	$9,90 \pm 1,11$
2Д522Б	3	$3,8^{+0,6}_{-0,4}$	$6,46 \pm 1,13$
2С191С	3	$3,7^{+0,7}_{-0,5}$	$6,82 \pm 1,10$
2Д552Б	1	$3,6^{+0,9}_{-1,1}$	$6,37 \pm 1,25$
2С191С	1	$7,7^{+1,1}_{-0,8}$	$6,66 \pm 1,07$
ИС в корпусе 201.14-2	4	$4,2^{+0,5}_{-0,3}$	$6,97 \pm 1,15$
ИС в корпусе 401.14-4	4	$5,1^{+0,9}_{-0,8}$	$7,12 \pm 1,01$
ИС в корпусе 401.16-1	4	$4,7^{+0,6}_{-0,5}$	$7,10 \pm 1,12$
ИС в корпусе 201.14-2	2	$4,1^{+0,9}_{-0,7}$	$6,85 \pm 1,17$
ИС в корпусе 401.14-4	2	$4,8^{+0,9}_{-1,0}$	$7,05 \pm 0,98$
ИС в корпусе 401.16-1	2	$4,6^{+1,1}_{-1,1}$	$6,98 \pm 0,95$

Табл. Л.2. Массогабаритные показатели радиоэлементов

Тип радиоэлемента	Диаметр корпуса РЭ D_K или размеры ($B_K \times H_K$), мм	Длина корпуса РЭ L_K , мм	Диаметр вывода РЭ ($b_B \times h_B$) d_B , мм	Масса РЭ $m_{РЭ}$, г
<i>Резисторы</i>				
C2-29-0,125	3,5	8,0	0,6	0,3
C2-29-0,25	4,5	11,0	0,8	1,0
C2-29-0,5	7,5	14,0	0,8	2,0
C2-29-1	9,8	20,0	1,0	3,5
C2-29-2	9,8	28,0	1,0	5,0
<i>Конденсаторы</i>				
K53-18-16В-10мкФ	4,0	10,0	0,6	1,2
K53-18-16В-220мкФ	9,0	21	0,8	11
<i>Диоды</i>				
2Д522Б	1,9	3,8	0,55	0,15
2С191С	5,0	9,0	0,5	1,0
<i>Микросхемы в корпусах:</i>				
201.14-2				
401.14-4				
401.16-1				

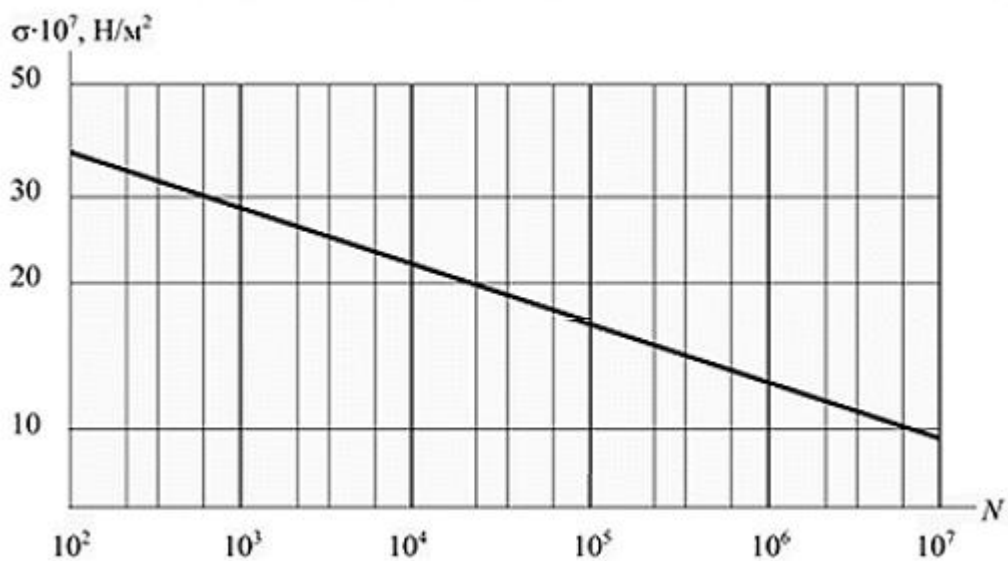


Рис. Л.1. Кривая усталости холоднокатаной медной проволоки при комнатной температуре