

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

На правах рукописи



**Аль-Араджи Зайнаб Хуссам Моса**

**МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА МЕХАНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ  
МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

Специальность: 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы  
и устройства телевидения

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
доцент Башкиров А.В.

ВОРОНЕЖ - 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 4  |
| Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ<br>ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ<br>МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ПРИМЕНЕНИЕМ<br>СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО<br>ПРОЕКТИРОВАНИЯ..... | 10 |
| 1.1. Особенности конструкции многослойных печатных плат в составе<br>радиоэлектронных средств спецназначения.....  | 10 |
| 1.2. Основные задачи и процедуры механического проектирования<br>конструкций многослойных печатных плат.....   | 19 |
| 1.3. Методы и средства комплексного анализа механических<br>характеристик многослойных печатных плат, основанные на<br>использовании современных средств автоматизированного<br>проектирования.....              | 30 |
| 1.4. Выводы по главе.....  | 34 |
| Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ<br>ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.....   | 39 |
| 2.1. Математические модели механических сил, действующих на<br>многослойные печатные платы.....  | 39 |
| 2.2. Математические модели собственных частот многослойных<br>печатных плат.....   | 47 |
| 2.3. Использование ребер на печатных платах.....   | 60 |
| 2.4. Математические модели оценки усталостной долговечности.....   | 62 |
| 2.5. Выводы по главе.....  | 67 |
| Глава 3. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА МЕХАНИЧЕСКИХ<br>ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ<br>ПЛАТ.....  | 68 |
| 3.1. Методика выбора вида анализа при проектировании<br>многослойных печатных плат.....  | 68 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.2. Алгоритм проектирования многослойных печатных плат с учетом предварительного размещения компонентов.....     | 72  |
| 3.3. Алгоритм увеличения жесткости конструкции многослойной печатной платы.....                                   | 75  |
| 3.4. Алгоритм оценки усталостного ресурса печатной платы при различных граничных условиях.....                    | 78  |
| 3.5. Алгоритм проектирования многослойных печатных плат блоков «кассетной» конструкции.....                       | 80  |
| 3.6. Выводы по главе.....   | 83  |
| Глава 4. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.....      | 84  |
| 4.1. Экспериментальная проверка точности моделирования механических характеристик многослойных печатных плат..... | 84  |
| 4.2. Моделирование многослойных печатных плат «кассетной» конструкции с несколькими способами закрепления.....    | 94  |
| 4.3. Определение оптимального способа закрепления многослойных печатных плат.....                                 | 99  |
| 4.4. Выводы по главе.....   | 105 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....   | 107 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....   | 109 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....  | 110 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. Модальные характеристики МПП «кассетной» конструкции с разными схемами закрепления.....             | 120 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Экспериментальные данные вибрационного анализа МПП.....   | 125 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В. Свидетельство о государственной регистрации результатов интеллектуальной деятельности.....          | 132 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акты о внедрении результатов диссертации.....   | 133 |

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современные радиоэлектронные средства (РЭС) представляют собой сложные программно-аппаратные устройства, обеспечивающие широкие функциональные возможности и хорошие технические характеристики. При этом постоянно увеличивается количество отдельных элементов и компонентов в изделиях, а также уменьшаются габариты. Увеличение сложности РЭС приводит также к усложнению печатной платы – основного несущего компонента, который обеспечивает как механическое закрепление отдельных электрорадиоэлементов, так и их электрическую коммутацию. При проектировании платы приходится учитывать влияние различных факторов: действие электромагнитных помех, тепла, а также внешних механических воздействий. Последний фактор особенно значим в носимой, возимой и бортовой аппаратуре.

Современные печатные платы имеют, как правило, многослойную конструкцию, в которую могут быть интегрированы различные как пассивные (конденсаторы, резисторы, микроиндуктивности, микротрансформаторы), так и активные (бескорпусные микросхемы) компоненты. Модули на многослойных печатных платах (МПП) в силу сложности содержат микросхемы большой площади, такие как BGA, QFP, QFN, PLCC и др., паяные соединения которых при деформациях испытывают повышенные нагрузки, и координатам их расположения на поверхности следует также уделять внимание.

Тяжелые условия эксплуатации современных РЭС влияют на работоспособность и надежность. Вибрации и удары могут привести к изменению геометрических размеров частотозависимых компонентов, таких как конденсаторы и катушки индуктивности, что может вызвать нарушение работоспособности радиоприемного тракта. Микротрещины в паяных соединениях приводят к росту величины паразитного переходного сопротивления. Кроме того, этот дефект может не проявляться постоянно, что усложняет его диагностику.

При традиционном подходе к процессу проектирования отказы РЭС, связанные с действием внешних механических нагрузок, выявляются на завершающих этапах создания изделия, что приводит к длительным процессам доработки конструкции. Поэтому применение процесса компьютерного моделирования ускоряет этот процесс и позволяет его перевести в «виртуальную» плоскость. Используемые при этом программные пакеты позволяют их применять для решения широкого круга задач в машиностроении, авиастроении и других отраслях промышленности. Однако универсальность средств моделирования вызывает необходимость создания методик их применения для проектирования и доработки конструкций РЭС.

В РЭС спецназначения, к которым предъявляются повышенные требования по надежности и малому времени восстановления работоспособности, часто используется «кассетная» компоновка. Такой подход облегчает доступ к отдельным модулям для диагностики и быстрой замены. Однако такая конструкция радиоэлектронного модуля, а также МПП из которой он состоит, имеет ограничение на расположение отверстий для фиксации, что сказывается на координатах установки микросхем большой площади.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью разработки математических моделей, алгоритмов и методик процесса проектирования радиоэлектронных модулей на основе МПП, в том числе «кассетной» конструкции, которые работают в условиях действия внешних механических нагрузок. Предложенные методики и средства позволяют серьезно повысить эффективность процесса проектирования МПП РЭС, что в конечном итоге скажется на снижении сроков проектирования и повышении качества выпускаемой новой продукции.

Работа выполнена в рамках одного из основных научных направлений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» ГБ НИР 2019.17 «Исследование и разработка методов комплексного анализа и оптимального синтеза на этапах функционального и конструкторского проектирования РЭС».

**Степень разработанности темы.** Вопросам моделирования и проектирования РЭС в условиях механических воздействий посвящены ряд работ таких отечественных авторов, как Ю.Н. Кофанов, А.С. Шалумов, а также зарубежных, таких как Balakumar Balachandran, Tony Serksnis and Edward B. Magrab. Однако в исследованиях указанных авторов не предложена универсальная методика проектирования МПП, в том числе блоков «кассетной» конструкции с определением опасных областей для установки компонентов большой площади.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка методик, математических моделей и алгоритмов, повышающих эффективность проектирования радиоэлектронных модулей на основе МПП, работающих при действии внешних механических нагрузок.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

исследовать виды конструкций, материалы и области применения МПП, способы фиксации в радиоэлектронных блоках, в том числе «кассетной» конструкции, определить граничные условия, используемые для моделирования характеристик электронных средств при действии на них внешних механических нагрузок;

провести анализ видов механических нагрузок, действующих на радиоэлектронные модули в составе МПП, а также особенностей поведения отдельных компонентов при действии внешних деформаций, исследовать математические модели механических сил, действующих на МПП;

разработать математические модели определения прогиба участков МПП «кассетной» конструкции, позволяющие оценить механические нагрузки на паяные выводы компонентов и тем самым выявить опасные места для установки;

разработать методику проектирования радиоэлектронных модулей на основе МПП, охватывающую этапы от топологического проектирования до испытаний, позволяющую сократить временные затраты на проектирование и включающую структуру обмена проектными данными;

предложить методику топологического проектирования МПП, в том числе «кассетной» конструкции, основанную на предварительном размещении

компонентов на плате и моделировании вибрационных свойств, выявлении наиболее опасных мест для микросхем с корпусами большой площади, позволяющую определять оптимальные схемы закрепления и координаты точек закрепления, а также возможность применения ребер для увеличения жесткости;

провести экспериментальную оценку точности моделирования механических характеристик радиоэлектронных модулей на основе МПП.

### **Научная новизна исследования состоит в следующем:**

- предложена комплексная методика проектирования радиоэлектронных модулей на основе МПП, охватывающая этапы от разработки топологии до испытаний, позволяющая сократить временные затраты на проектирование, отличающаяся использованием созданной базы данных прочности и надежности паяных соединений компонентов, а также системы обмена проектными данными;

- представлены математические модели определения прогиба участков МПП «кассетной» конструкции, позволяющие оценить механические нагрузки на паяные выводы компонентов и тем самым выявить опасные области для установки компонентов большой площади с учетом координат установки компонентов;

- разработана методика топологического проектирования МПП, в том числе «кассетной» конструкции, основанная на предварительном размещении компонентов и моделировании механических характеристик до этапа трассировки, выявлении наиболее опасных мест для компонентов с корпусами большой площади, отличающаяся определением рациональных схем крепления и координат точек крепления, а также возможностью применения ребер для увеличения жесткости.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая часть работы заключается в разработке и совершенствовании методик анализа и оптимизации механических характеристик МПП радиоэлектронных модулей в процессе проектирования.

Практическая значимость исследования состоит в том, что использование разработанных методов и средств позволяет повысить эффективность процесса проектирования конструкций радиоэлектронных модулей на основе МПП путем

уменьшения количества доработок при достижении необходимых показателей надежности, что положительно сказывается на сроках выхода готовых изделий на рынок. Основные теоретические и практические результаты работы в виде методик комплексного анализа механических характеристик конструкций радиоэлектронных модулей на основе МПП внедрены на предприятии АО НВП «Протек» (г. Воронеж), что позволило на этапе топологического проектирования уменьшить количество доработок МПП, сократив при этом затраты на изготовление выпускаемой продукции при заданном уровне надежности и качества. Также результаты работы внедрены в учебный процесс ФГБОУВО «Воронежский государственный технический университет» по дисциплине «Современные РЭС спецназначения: особенности проектирования и эксплуатации» образовательной программы подготовки магистров по направлению 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств».

**Методология и методы исследования.** При выполнении работы использованы основные положения и методы прикладной механики, вычислительной математики, математического моделирования, теории сопротивления материалов, элементов теории статистических вычислений.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Применение комплексной методики проектирования МПП позволяет сократить временные затраты на проектирование путем уменьшения количества доработок конструкции.

2. Применение методики, включающей предварительное размещение компонентов на МПП и моделирование вибрационных свойств с выявлением наиболее опасных мест для расположения микросхем с корпусами большой площади, позволяет получить рациональную конструкцию МПП до этапа трассировки, что позволяет значительно сократить сроки проектирования.

3. Применение методики проектирования МПП блоков «кассетной» конструкции позволяет выбрать рациональную схему закрепления платы и определить координаты размещения компонентов большой площади на ней, а



также при необходимости использовать ребра жесткости, что позволяет избежать резонансных явлений в процессе эксплуатации и возможной поломки аппаратуры.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов обеспечивается использованием экспериментальных данных, применением методов моделирования, хорошей сходимостью результатов моделирования и экспериментов. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, совещаниях и семинарах: Международном симпозиуме «Надежность и качество», (Пенза, 2018-2021), 2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE) (Jaipur, India, 2020), 2021 4th International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet) (Rabat, Morocco, 2021), ежегодных научно-технических конференциях ФГБОУВО «Воронежский государственный технический университет» и научно-методических семинарах кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры (2018-2021).

### **Публикации**

По теме диссертационного исследования было опубликовано 19 научных работ, в том числе 7 – в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, три статьи в изданиях, индексированных в международной базе данных Scopus, получено одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения, списка используемых сокращений, списка литературы из 82 наименований и четырёх приложений. Работа изложена на 138 страницах, содержит 61 рисунок, 15 таблиц, 4 приложения.

# **Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

1.1. Особенности конструкции многослойных печатных плат в составе радиоэлектронных средств спецназначения

Печатная плата, в том числе и МПП, используется в подавляющем большинстве радиоэлектронной аппаратуры как основной несущий и коммутационный компонент [1-3]. Печатные платы используются в связной, телекоммуникационной аппаратуре, телевидении и многих других областях [4]. В настоящее время все высокотехнологичные устройства содержат МПП, подчас довольно сложной конструкции. Их размеры, формы, свойства и срок службы зависят от того, какие у них условия эксплуатации.

Стандарты, разработанные ассоциацией IPC (институт межкомпонентных и упаковочных электронных схем), определяют следующие три класса электронных продуктов, в которых используются сборки печатных плат [5]:

- Класс 1: товары общего назначения, включая потребительские товары, компьютеры, периферийные устройства и некоторые военные системы.
- Класс 2: специализированные сервисные продукты, включая коммуникационное оборудование, торговое оборудование, промышленные средства управления, приборы и военные системы, для которых требуется увеличенный срок службы и надежное обслуживание.
- Класс 3: изделия с высокой надежностью, включая оборудование и системы, для которых важна непрерывная работа или производительность по запросу.

В России радиоэлектронные средства делятся на классы в зависимости от места расположения:

- наземные;
- морские;
- бортовые.

Внутри классов в зависимости от объекта установки РЭС делятся на группы.

Например, наземные включают в себя следующие группы:

- стационарные;
- подвижные;
- носимые.

Морские:

- судовые;
- буйковые;
- береговые.

Бортовые:

- самолетные;
- ракетные;
- спутниковые.

Платы, используемые в аппаратуре второго и третьего классов по международной классификации и отдельные группы российской классификации, испытывают повышенные воздействия внешней среды, в том числе и механические. Таким образом, разработка моделей и методов проектирования многослойных печатных плат при действии повышенных механических нагрузок является важной задачей.

Современная МПП представляет собой довольно сложную композитную конструкцию. Доступны многие типы материалов с медным покрытием, но чаще всего для печатных плат используются FR-4 (стеклотекстолит), FR-2, FR-3, СЕМ-1, СЕМ-3, GI и GT. В таблице 1.1 приведены основные характеристики различных композитных материалов.

Таблица 1.1 - Материалы для изготовления печатных плат и общие области применения [7]

| Обозначение   | Состав  | Применение  |
|---|---|---|
| FR-4<br>(СФ)  | Слоистый эпоксидный материал из стекловолокна<br>Tg> 130°C  | Широко используется в компьютерах, промышленных системах управления, телекоммуникациях, военных и космических системах.   |
| FR4 High Tg,<br>FR5<br>(СТФ, СТАП)                        | Материал со сшитой сеткой, повышенной термостойкостью (RoHS-совместимый).<br>Tg> 160°C<br>“Tg — температура стеклования (разрушения структуры)” | В устройствах, где требуется повышенная термостойкость конструкций  |
| FR-3  | Бумага и эпоксидная смола   | Встречается в потребительских товарах, таких как компьютеры, телевизоры и аудиооборудование.  |
| FR-2  | Фольгированные гетинаксы (основа из целлюлозной бумаги, пропитанной фенольной смолой)   | В основном используется в бытовой электронике, такой как радиоприемники, калькуляторы и другая бытовая техника.   |
| CEM-1   | Слоистый материал на основе композиции целлюлозной бумаги и стеклоткани с эпоксидной смолой. Хорошо штампуются.                                 | Широко используется в промышленной электронике повышенной надежности (детекторы дыма, автомобильная электроника).   |
| CEM-3   | Стеклоткань с пропиткой эпоксидной смолой   | Используется в бытовой технике, автомобилях и коммерческом коммуникационном оборудовании.   |
| Алюминий<br>1100 (АД);<br>5052<br>(АМг2.5);<br>6061(АД33) | Материалы для плат с повышенной теплоотдачей на алюминиевой основе  | Применяется для обеспечения хорошего теплоотвода, помимо этого обладает повышенной механической и коррозионной прочностью. Мощные блоки питания, светодиодная светотехника. |
| Rogers<br>RO5603,<br>RO4350                               | Листы с керамическим наполнителем, армированные стекловолокном  | Микроволновая point to point (P2P) связь, автомобильные радары и сенсоры, радиочастотные идентификационные метки (RFID), приемники спутникового вещания                     |

В зависимости от сложности и габаритов устройства используются несколько типов печатных плат [6]:

- односторонняя печатная плата;
- двухсторонняя печатная плата;
- многослойная печатная плата;
- печатная плата на гибком основании;
- печатная плата с алюминиевым покрытием;
- печатная плата на алюминиевом основании.

Современная аппаратура обладает повышенной сложностью, а также зачастую значительным тепловыделением, поэтому трудности вызывает проектирование многослойных печатных плат и плат на алюминиевом основании.

Радиоэлектронный модуль на основе МПП обычно состоит из следующего набора основных элементов [8]:

- электронные компоненты, выполняющие обработку сигнала, предусмотренную схемой;
- печатное основание, обеспечивающее электрическую коммутацию и механическое закрепление, в том числе МПП;
- один или несколько электрических соединителей, обеспечивающих связь модуля с другими устройствами;
- дополнительные детали для механического крепления элементов и компонентов к плате, крепления самой печатной платы к шасси или корпусу, обеспечения транспортировки тепла, увеличения жесткости радиоэлектронного модуля.

Многослойная печатная плата имеет более двух слоев, соответственно, содержит как минимум три проводящих слоя меди, как показано на рисунке 1.1. [9]. Одна из наиболее распространенных технологий изготовления МПП – метод попарного прессования. Плата тогда имеет четное число слоев. Получается достаточно сложная конструкция из нескольких проводящих слоев, сквозных и глухих металлизированных отверстий. Потеря контакта во внутренних слоях

приводит к потере работоспособности устройства. Кроме того, внутренние слои недоступны для ремонта. Все это налагает повышенные требования к обеспечению работоспособности платы при действии внешних механических нагрузок.

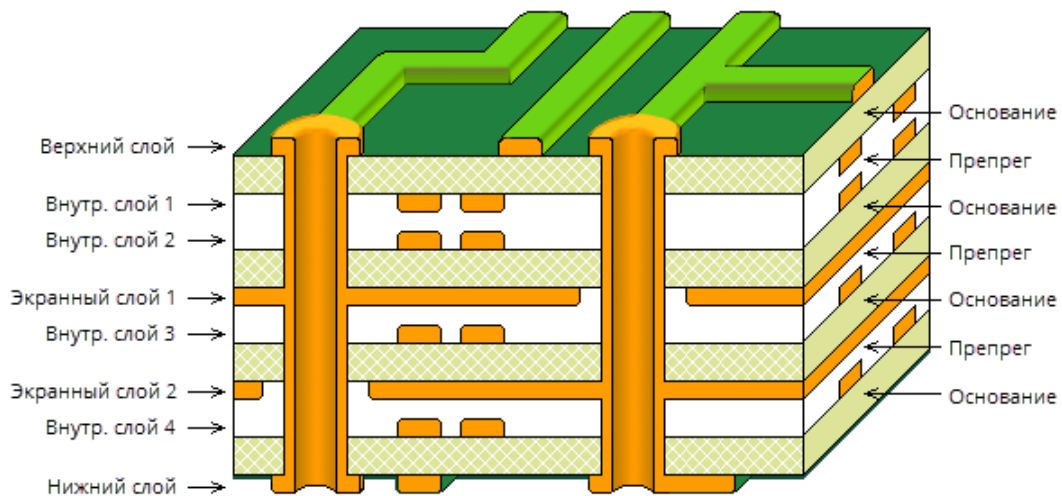


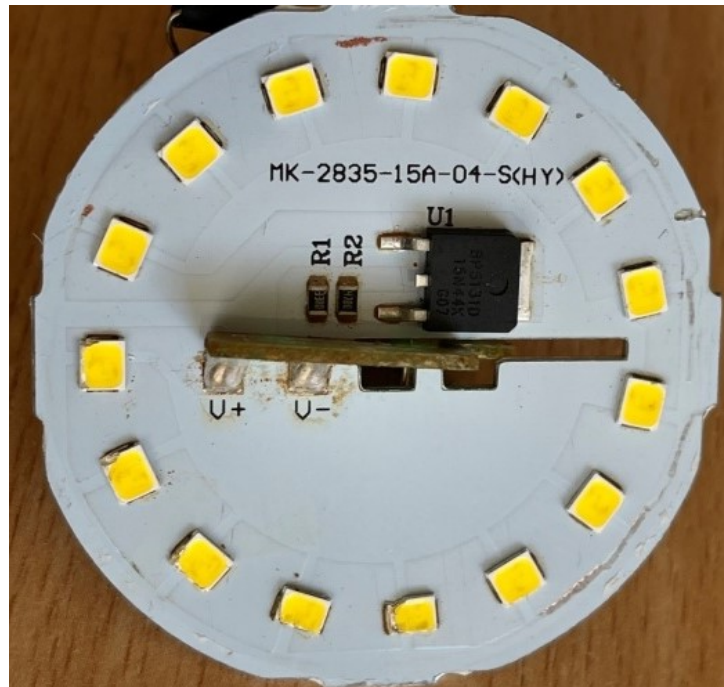
Рисунок 1.1 – Схема расположения слоев многослойной печатной платы [10]

Алюминиевая печатная плата [11], также называемая печатной платой на металлическом основании, представляет собой тип печатной платы, которая состоит из металлического листа, плакированного медью, и тонкого диэлектрического теплопроводящего и электроизоляционного слоя, который расположен между медной фольгой и металлической основой [12] (рисунок 1.2). Медная фольга обеспечивает коммутацию компонентов схемы, в то время как металлическое основание позволяет рассеивать и транспортировать тепло. Основным материалом основания - алюминий, имеющий хорошую теплопроводность и невысокую цену, кроме того такие платы по сравнению со стеклотекстолитами обладают повышенной прочностью.

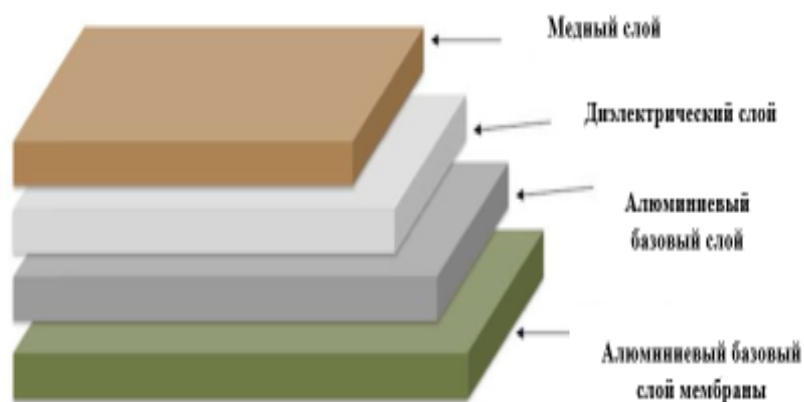
ПП очень чувствительны к условиям окружающей среды [13]. В зависимости от типа устройства, в котором используется печатная плата, возникают различные требования, такие как механическая целостность системы, устойчивость к тепловым нагрузкам и предотвращение электромагнитных помех. Чтобы

соответствовать таким требованиям, печатные платы монтируются на шасси или в корпусах блоков.

Блоки электронных устройств обычно состоят из одной или нескольких деталей (крышек и корпуса), на которых установлены печатные платы [14]. Примеры электронных блоков приведены на рисунке 1.3.



(a)



(б)

Рисунок 1.2 – Печатная плата на алюминиевом основании [15] (а), слои алюминиевой печатной платы (б)



Рисунок 1.3 – Конструкция электронных блоков [16]

Существует также множество конструктивных решений для повышения жесткости печатной платы, закрепленной винтами. Эти дополнительные механические детали предназначены для поглощения механических нагрузок, прикладываемых к точкам подключения печатных плат (ребра жесткости, демпферы, заливка наполнителями на эпоксидной основе и вспененными наполнителями). Однако заливка компаундами наряду с улучшением механических характеристик и электроизоляционных свойств также ухудшает теплопроводность. Поэтому при заданных ограничениях необходимо найти наиболее оптимальное решение.

В электронных системах спецназначения, в которых требуется обеспечить малое время восстановления работоспособности в случае неисправности, широко используются съемные печатные платы, поскольку они очень просты в обслуживании. Такая компоновка получила название «кассетная» [17]. Пример подобных блоков представлен на рисунке 1.3.

Печатные платы бывают достаточно сложными по конфигурации. Поскольку в большинстве электронного оборудования электронные компоненты размещаются на каждом доступном сантиметре внутреннего объема, форма печатной платы часто определяется геометрией доступного пространства. Можно найти множество различных форм, от маленьких квадратов до больших круглых пластин и



треугольников, в зависимости от формы электронного блока, используемого для монтажа печатных плат.

Однако прямоугольная печатная плата является наиболее распространенной формой, используемой в электронной промышленности, поскольку эта форма легко адаптируется к популярному модульному типу сборки, в котором используется электрический разъем вдоль нижнего края печатной платы [18]. Такие же платы у «кассетной» конструкции блоков.

На рисунке 1.4 представлено схематическое расположение основных элементов печатной платы «кассетной» конструкции. С одной стороны располагается электрический соединитель, обеспечивающий подключение к блоку, с другой стороны - органы управления и индикации. Особенностью такой конструкции является закрепление по периметру платы. Для этого в плату впрессовываются или на винтах крепятся специальные направляющие. При действии вибраций также может использоваться рамка из металла по периметру, к которой крепится плата. А рамка в свою очередь жестко соединяется с корпусом блока. Соединение с рамкой в другом месте, кроме периметра в «кассетной» конструкции, проблематично, так как там располагаются соседние платы. Эта особенность налагает особые требования к проектированию таких плат из-за отсутствия возможности свободного выбора места фиксирующих винтов.

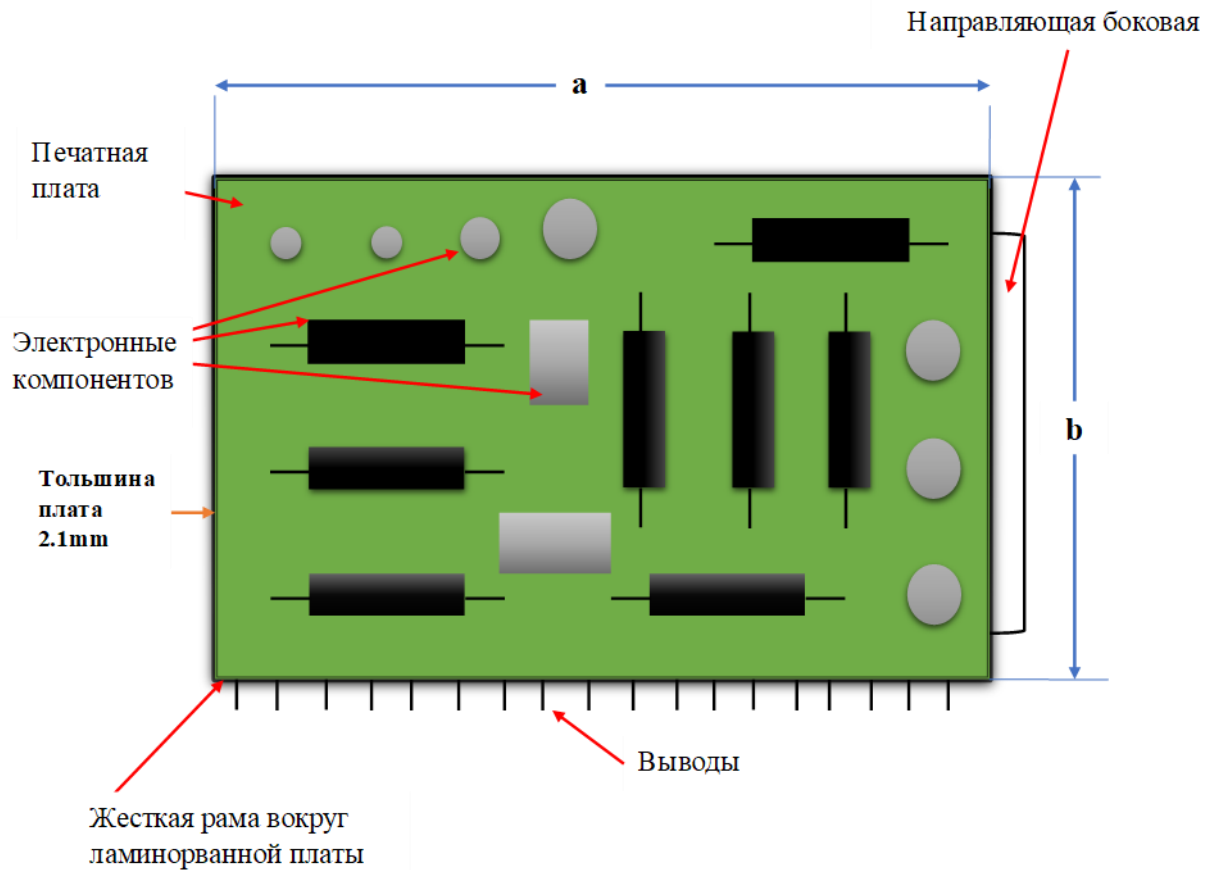


Рисунок 1.4 - Печатная плата усиленная каркасом жесткости

Для увеличения жесткости печатных плат также используются ребра [19]. Ребра увеличивают жесткость печатной платы, что, в свою очередь, увеличивает резонансную частоту. Это уменьшит прогиб платы в условиях нагрузок, тем самым уменьшив напряжения, возникающие в электронных компонентах, установленных на печатной плате. Ребра могут быть изготовлены из стали, алюминия или стекловолокна. Если используются металлические ребра, необходимо соблюдать осторожность, чтобы не допустить короткого замыкания на открытых электрических печатных платах. Ребра могут быть скреплены винтами, заклепками, припаяны, приварены или отлиты как единое целое с пластинами радиатора.

Печатные платы могут фиксироваться в электронном блоке разными способами в зависимости от таких факторов, как окружающая среда, вес, ремонтпригодность, доступность и стоимость. Например, в вакуумной среде

(космическая аппаратура), где нет воздуха, чтобы обеспечить конвекционную теплопередачу, тепло необходимо передавать от печатной платы к стенкам блока и затем к теплообменнику.

Края печатных плат должны жестко зажиматься в рамке «кассеты», особенно если будут подвергаться действию сильной вибрации или ударам. Есть конструкции с краевыми направляющими, которые подходят для самых разных печатных плат. Эти направляющие обычно изготавливаются из бериллиевой меди, используются также черные металлы и пластмасса в более дешевом варианте. Конструкция направляющей должна плотно захватывать край печатной платы. Это значительно уменьшает прогибы из-за вращения и перемещения кромки, что увеличивает собственную частоту печатной платы. Также прочный захват будет иметь тенденцию рассеивать больше энергии во время вибрации из-за трения и относительного движения между краями платы и краевой направляющей.

## 1.2. Основные задачи и процедуры механического проектирования конструкций многослойных печатных плат

По способу монтажа на МПП современные электронные компоненты можно разделить на две группы:

- компоненты, монтируемые в отверстия (КМО, рисунок 1.5, а);
- поверхностно-монтируемые компоненты (КПМ, рисунок 1.5, б).

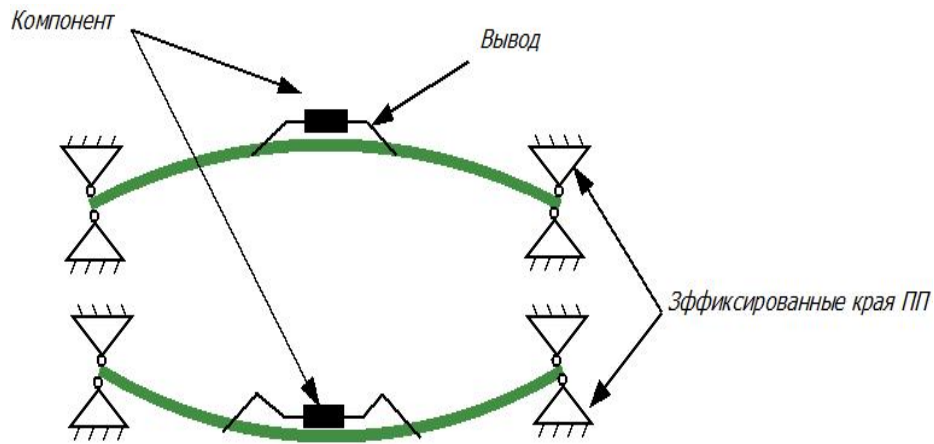
При монтаже в отверстия, особенно если они металлизированные, наблюдается высокая механическая прочность, так как припой затекает вовнутрь отверстия, образуя надежное соединение [20]. Намного хуже дело обстоит с поверхностно-монтируемыми компонентами, где механическая прочность паяного соединения достигается, в основном, за счет клея, которым приклеена медная фольга проводящего слоя. В некоторых случаях жесткость может быть увеличена за счет металлизированных сквозных отверстий возле контактных площадок.

Российский ГОСТ Р 55492-2013/IEC/PAS 62137-3:2008 [21] регламентирует процесс испытания компонентов на печатной плате на отрыв путем сдвига, проворота и линейного перемещения перпендикулярно и под углом к плате.

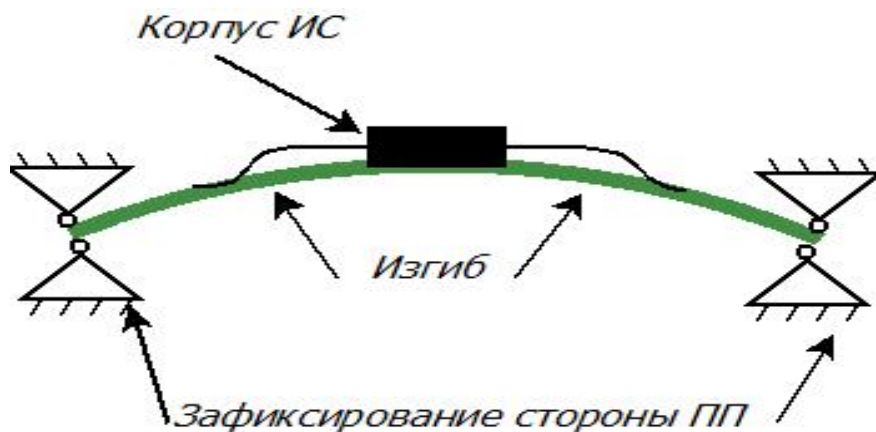
Во время вибрации по оси, перпендикулярной плоскости печатной платы, силы ускорения вызывают отклонения печатной платы. По мере того как печатная плата изгибается, в выводах возникают изгибающие напряжения [22] (рисунок 1.5, а).

У поверхностно-монтируемых компонентов, особенно большого размера, таких, например, как BGA, QFP, QFN, PLCC, при изгибах крайние выводы испытывают повышенную нагрузку, которая может привести к образованию микротрещин и увеличению переходного сопротивления. Такая же ситуация наблюдается при нагреве устройства. Вследствие теплового расширения материалов паяные соединения также подвергаются повышенным механическим нагрузкам.

Стандарт ГОСТ Р 55492-2013/IEC/PAS 62137-3:2008 для ускорения процесса испытания аппаратуры предусматривает термоциклирование - нагрев до определенной температуры, выдержку и остывание. В процессе термоциклирования механические напряжения и негативные последствия накапливаются, что способствует выявлению ненадежных конструкций. Кроме того, количество термоциклов косвенно свидетельствует о сроке службы изделия и условиях эксплуатации [23].



а)



б)

Рисунок 1.5 – Сгибание выводных проводов компонентов на деформированной плате (а); механические напряжения сдвига, вызванные изгибом печатной платы из-за вибрационной нагрузки больших корпусов типа BGA, QFP, QFN, PLCC (б)

Способность компонентов выдерживать сильную вибрацию также зависит от множества различных факторов [24], таких как:

- размер компонента;
- резонансная частота печатной платы;
- перегрузка  $g$ ;
- степень натяжения выводов;
- направление и продолжительность вибрации.

Механические напряжения в выводах компонентов можно определить, исследуя геометрию электронного компонента, собственную частоту печатной платы и силы ускорения  $g$ . Например, учитывая геометрию, такие компоненты, как резисторы, конденсаторы, диоды и плоские субмодули, имеют небольшие электрические выводы по сравнению с большим корпусом компонента. Таким образом, почти весь относительный прогиб между печатной платой и компонентом будет происходить в электрических выводах. При моделировании, для ускорения расчетов можно игнорировать корпус компонента и исследовать только наиболее чувствительную часть: прогибы электрических выводов [25].

Относительный наклон электрических выводов в местах, где они припаяны к печатной плате, не изменится при колебаниях в направлении, перпендикулярном плоскости платы. Выводы всегда будут оставаться перпендикулярными плате. Кроме того, каждый электрический вывод всегда будет оставаться перпендикулярным корпусу компонента, где вывод соединяется с корпусом, потому что корпус намного жестче, чем вывод. Поэтому, когда печатная плата изгибается во время вибрации, электрические выводы будут изгибаться, как показано на рисунке 1.6.

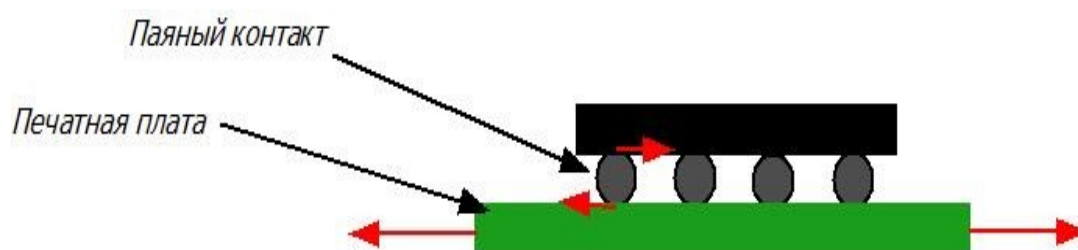


Рисунок 1.6 – Векторы сил, действующих на паяный контакт корпуса BGA

Большинство отказов компонентов в условиях сильной вибрации происходит из-за трещин в паяных соединениях, трещин в уплотнениях или обрывов электрических выводов [26].

Эти неисправности обычно возникают из-за динамических напряжений, возникающих из-за относительного движения между корпусом электронного компонента, электрическими выводами и печатной платой. Это относительное движение, как правило, наиболее сильно проявляется во время резонансных явлений, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации. Поэтому появление резонанса в электронных блоках недопустимо.

Резонанс также может возникать в компонентной части, когда тело компонента действует как масса, а электрические выводы как пружины [27]. Эти резонансы обычно не слишком сильны, если корпус компонента соприкасается с печатной платой, так как этот контакт резко уменьшает относительное движение компонента. Если резонансы такого типа действительно проявляются, то необходимо закрепить составную часть компонента к печатной плате [28]. Особенно это касается тяжелых компонентов, таких как трансформаторы, радиаторы и конденсаторы большой емкости.

Если механические напряжения достаточно высоки и если количество циклов усталости велико (большой срок службы), то наблюдаются усталостные отказы в паяных соединениях и электрических выводах [29].

Существует ряд факторов, которые следует учитывать при оценке передачи механической энергии при вибрациях. Все эти факторы связаны с характеристиками демпфирования платы, которые определяют количество энергии, теряемой во время вибрации. Чем больше энергии теряется или преобразуется в тепло, тем меньше остается энергии, которая передается плате, следовательно, снижаются динамические нагрузки и механические напряжения.

Наибольшие потери энергии связаны с гистерезисом и трением. Потери на гистерезис обычно возникают из-за внутренних деформаций, которые появляются во время изгиба в печатной плате. Потери на трение обычно возникают из-за относительного движения между наиболее деформируемыми элементами, такими как монтажные поверхности, ребра жесткости и краевые направляющие. Эти потери энергии максимальны, когда прогибы самые большие, и минимальны при

небольших прогибах. Поскольку более высокие частоты имеют меньшие отклонения, они также будут иметь меньшее демпфирование. Это означает, что более высокие частоты обычно имеют более высокую проницаемость в резонансных условиях. Такие термины, как «низкая» резонансная частота печатной платы и «высокая» резонансная частота, являются относительными. Однако в целом термин «низкий» применяется к резонансным частотам ниже примерно 100 Гц [30].

Термин «высокая резонансная частота» применяется к частотам выше примерно 400 Гц. Большинство печатных плат имеют свои основные резонансные частоты от 200 до 300 Гц при использовании в устройствах спецназначения [31].

Данные испытаний показывают, что проникновение вибрации конструкции печатной платы обычно может быть связано с квадратным корнем из собственной частоты. Для прямоугольных плат коэффициент передачи обычно составляет от 0,50 до 2,0, помноженный на квадратный корень из собственной частоты, в зависимости от многих факторов. Небольшая печатная плата с небольшими электронными деталями и без ребер жесткости с резонансной частотой около 400 Гц может иметь коэффициент передачи в 2 корня квадратного из собственной частоты для низкой входной  $g$ -силы, которая ниже пика  $2g$ . Тогда проницаемость для этого случая будет около 40.

Большая печатная плата с крупными электронными компонентами и несколькими ребрами жесткости с резонансной частотой около 100 Гц может иметь коэффициент передачи всего лишь в 0,50 квадратного корня из собственной частоты для высокой входной силы  $g$  выше пика  $10g$ . Тогда проницаемость для этого случая будет около 5 [32].

В диапазонах средних частот (200–300 Гц) коэффициент передачи часто примерно равен квадратному корню из собственной частоты для пикового синусоидального вибрационного входа  $5g$ . Опять же есть много других факторов, которые будут влиять на проницаемость механической энергии печатной платы.



Если нет доступных экспериментальных данных по конкретному типу анализируемой печатной платы, то в качестве отправной точки могут быть предложены изложенные приближения.

В таблице 1.2 представлены факторы и параметры конструкции, которые влияют на коэффициент передачи МПП.

Таблица 1.2 - Факторы, которые следует учитывать при оценке коэффициента передачи печатной платы [33]

| № | Факторы  |
|---|--|
| 1 | Высокая собственная частота вызывает малые смещения и небольшие деформации, поэтому коэффициент передачи обычно выше. И наоборот, низкая собственная частота вызывает большие смещения и высокие деформации, поэтому коэффициент передачи обычно ниже.   |
| 2 | Более низкая входная сила вызывает малые смещения и небольшие деформации, поэтому передаточная способность обычно выше. Высокая входная сила вызывает большие смещения и большие деформации, поэтому передаточная способность обычно ниже.   |
| 3 | Ребра. Ребра с заклепками и винтами в большинстве случаев допускают некоторое относительное движение на границе раздела под высокой нагрузкой между ребрами и печатной платой, что будет рассеивать энергию и уменьшать проницаемость при резонансе. Сварные, литые и паяные ребра обычно жестче, чем ребра с заклепками и винтами, поэтому они больше повышают резонансную частоту, но не обеспечивают такого сильного демпфирования. |
| 4 | Направляющие по краям печатной платы, которые плотно захватывают края платы, создают жестко заземленную систему, которая рассеивает энергию и снижает проводимость вибрации.<br>Если для крепления платы используются монтажные винты, участки высокого давления в винтовых зонах будут иметь тенденцию рассеивать энергию. Большее количество крепежных винтов рассеивает больше энергии и увеличивает при этом жесткость.            |

|   |   |
|---|---|
| 5 | Разъемы на печатной плате, такие как краевые или штыревые, будут обеспечивать некоторое демпфирование, которое, как правило, снижает проницаемость. Более длинный разъем обеспечит большую фиксацию с краю печатной платы, обеспечивая при этом дополнительное демпфирование.   |
| 6 | Крупные электронные компоненты, находящиеся в тесном контакте с печатной платой, будут рассеивать больше энергии, чем мелкие электронные компоненты. Это связано с тем, что более крупные компоненты покрывают большую площадь на печатной плате, что приводит к большим относительным отклонениям на стыке печатной платы, поэтому демпфирование немного больше. |
| 7 | Конструкцию радиатора часто крепят винтами или приклеивают к плате для отвода тепла от электронных компонентов. Эти элементы будут рассеивать механическую энергию за счет относительных сдвиговых отклонений поверхности раздела. На высоких частотах, где смещения небольшие, демпфирование невелико, поэтому проницаемость не сильно снижается.                |
| 8 | Многие печатные платы имеют достаточно большое количество слоев. Эти дополнительные слои немного увеличат демпфирование и, таким образом, уменьшат проницаемость. На высоких частотах, где отклонения малы, проницаемость не сильно снижается.  |
| 9 | Защитные покрытия в виде лаков и компаундов также оказывают влияние на демпфирование.   |

Основными задачами анализа механических характеристик МПП радиоэлектронных модулей можно назвать следующие:

- выполнение статического анализа МПП, находящейся под постоянной механической силой для выявления наиболее нагруженных областей, определением величин перемещений и напряжений;
- частотный анализ с определением величины собственных частот конструкции МПП, а также локализация наиболее опасных участков;

- выполнение анализа конструкции на действие вибраций синусоидальной формы для получения значений перемещения и ускорения в заданном интервале частот;
- выявление отклика конструкции на случайные вибрации с получением значений векторов перемещений;
- определение отклика конструкции при действии ударов, определение наиболее опасных участков МПП при ударных воздействиях;
- выявление усталостной долговечности конструкции, определение запаса прочности.

При выполнении статического прочностного анализа выявляются перемещения, деформации, усилия и напряжения, которые возникают в областях МПП вследствие действия внешних механических сил. Как правило, использование статического анализа наблюдается в задачах, где значения действующих сил не оказывают существенного влияния на поведение конструкции. Он используется для локализации механических нагруженных областей МПП.

Динамический анализ используется для определения отклика конструкции или ее составных частей на действие зависящих от времени нагрузок. В данном анализе обеспечивается учет рассеяния энергии и эффектов, связанных с инерционностью конструкции нагрузок, которые зависят от времени [34].

Среди таких нагрузок можно выделить:

- переменные циклические нагрузки, связанные с вращением механизмов;
- внешние нагрузки с высоким импульсом, такие как удары или взрывы;
- внешние случайные нагрузки (землетрясения);
- другие нагрузки, имеющие переменный характер.

Частотный анализ применяется тогда, когда необходимо определение собственных частот колебаний областей МПП и вида их формы [35].

Частотный анализ позволяет определить частоты и формы колебаний, проявляющихся в неустановившемся режиме, что может быть полезно для анализа

динамического поведения системы. Результаты этого вида анализа могут быть использованы для последующих расчетов.

В случае внешнего синусоидального силового возбуждения может быть использован анализ, целью которого является определение параметров установившегося движения линейной системы при гармоническом воздействии. Нагрузки в этом виде анализа могут в виде сил как приложенных к узловым точкам с начальными перемещениями, так и в виде распределения по конструкции МПП [36].

Целью анализа при ударном воздействии является определение спектра отклика конструкции МПП. Затем для уже известного спектра вычисляются значения величины напряжений и перемещений в областях МПП при условиях резонанса [37].

В результате выполнения спектрального анализа получают значения функций отклика, зависящие от частоты конструкции МПП. При указании в ряде точек модели одной функции отклика получают однофакторный анализ. При использовании нескольких типов функций в разных точках получают многофакторный анализ [38].

Одним из видов спектрального частотного анализа является анализ случайных колебаний, который применяется для выявления отклика системы на силы, не детерминированные функциями времени, например таких, которые проявляются при вибрациях от ракетных или реактивных двигателей.

Исследование частоты отказов электронного оборудования используемых систем спецназначения показывает, что причиной 40% отказов являются электрические разъемы, 30% - кабели и жгуты, 20% связаны с электронными компонентами и 10% - с другими факторами [39].

Другое исследование, основанное на частоте отказов из-за негативного действия окружающей среды, показывает, что тепловые, вибрационные, влажные и пыльные среды являются основными причинами отказов электронного оборудования. Распределение этих отказов показано на рисунке 1.7 .



Рисунок 1.7 – Распределение режимов отказов РЭС

Известно, что вибрация является одним из важнейших условий нагрузки электронных устройств [40]. Жизненный цикл систем спецназначения включает в себя вибрационную нагрузку на различных этапах жизненного цикла, таких как транспортировка, процесс эксплуатации и испытания.

Анализ вибрации электронной системы обычно выполняется на трех основных уровнях:

- электронный блок,
- печатная плата,
- электронные компоненты.

Необходимо проанализировать динамику всей конструкции устройства и взаимодействия между каждым уровнем, чтобы получить полную модель системы, которая затем приводит к получению устойчивой к вибрациям конструкции.

Динамический анализ электронных систем при вибрационной нагрузке может выполняться тремя различными подходами:

- аналитическими методами;
- анализом конечных элементов;
- экспериментальными исследованиями.

Однако обычной практикой в промышленности является использование метода конечных элементов. Эта тенденция объясняется сложностью современных электронных узлов. Сложная структура систем делает аналитическое моделирование трудным процессом, а иногда и невозможным. Поэтому инженеры предпочитают анализ универсальным методом конечных элементов вместо работы со сложными формулами. Безусловно, проведение экспериментов необходимо и для подтверждения результатов вычислений. Они также приводят к совершенствованию методов конечных элементов.

1.3. Методы и средства комплексного анализа механических характеристик многослойных печатных плат, основанные на использовании современных средств автоматизированного проектирования

Конечно-элементное моделирование или анализ - это вычислительный подход к решению задач инженерной и математической физики. Вибрационный, структурный и термический анализ можно выполнить с помощью метода МКЭ, который используется большинством ведущих мировых и российских компаний [41].

МКЭ используется для решения задач в области термической, структурной, жидкостной, геомеханической, электромагнитной, гидравлической, вибрационной, биомедицинской и ядерной инженерии.

Известно два основных метода численных методов, используемых для расчётов динамических параметров конструкции: метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных разностей (МКР). Существуют также различные вариационные методы, к которым, в частности, относится энергетический метод [42].

В радиотехнической промышленности наиболее распространены модули инженерного анализа на основе МКЭ, которые являются частью таких систем, как CREO, SolidWorks, ANSYS.

Суть МКЭ состоит в том, что область исследования разбивается на небольшие участки, составляющие сетку. Эти участки называются конечными элементами [43].

Анализ методом конечных элементов содержит следующие этапы:

1. Создание сетки конечных элементов путем разбиения исследуемой области.
2. Осуществление выбора аппроксимирующей функции в виде полинома для каждого конечного элемента.
3. Создание системы алгебраических уравнений путем объединения полученных полиномиальных функций.
4. Решение полученной системы уравнений и определение вектора узловых значений функции (перемещений, ускорений).

МКЭ для моделирования МПП начинается с построения конечно-элементной сетки модели, которая состоит из двух видов: упорядоченного разбиения и свободного разбиения поверхности. Режим упорядоченного разбиения используется для построения конечно-элементной сетки на объектах с относительно простой геометрией, как правило, близких к четырехугольнику в двумерном случае и шестиграннику в трехмерном. При этом сетка получается с четко выраженной регулярной структурой с упорядоченными рядами элементов [44].

Режим свободного разбиения предназначен для получения конечно-элементной сетки на объектах со сложной геометрией. Сетка имеет неупорядоченную структуру и содержит элементы, имеющие различную форму (рисунок 1.8).

Таким образом, для экономии трудозатрат необходимо определить компоненты с формой параллелепипеда и указать их для создания упорядоченной сетки, а для всех остальных компонентов выполнить свободное разбиение [45].

Для примера представлена модель печатной платы на рисунке 1.9 и сетка конечных элементов этой платы на рисунке 1.10

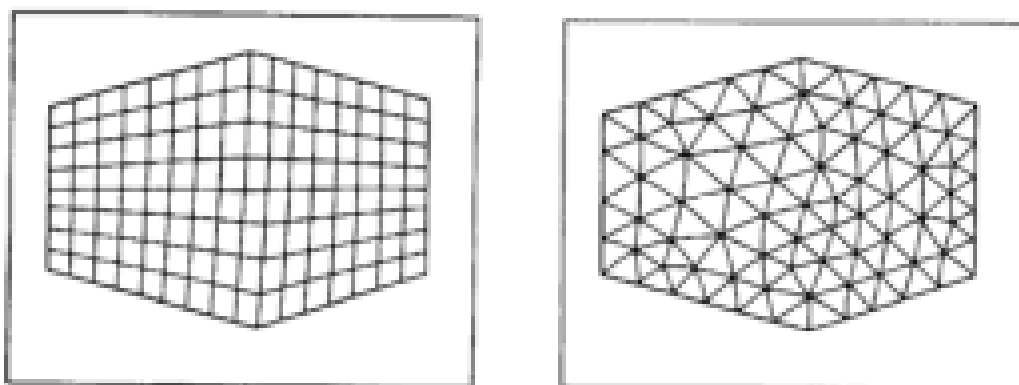


Рисунок 1.8 – Пример упорядоченного (слева) и свободного (справа) разбиений

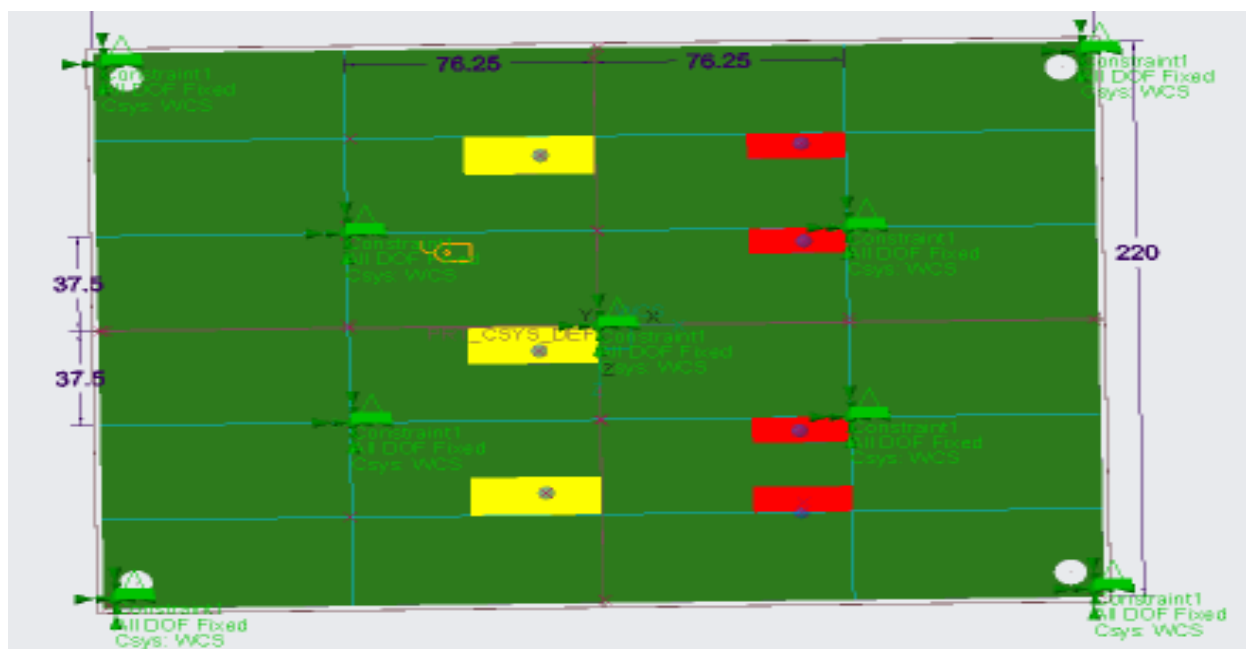


Рисунок 1.9 – Объемная модель печатной платы



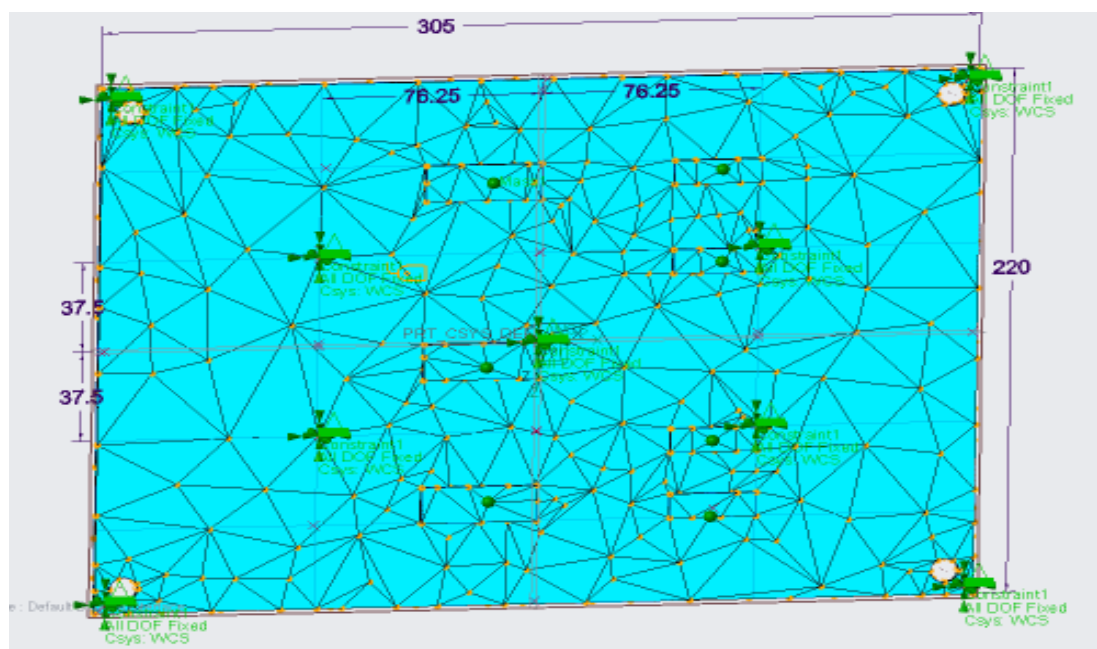


Рисунок 1.10 – Упорядоченная конечно-элементная сетка компонентов модели

Однако, если есть возможность, желательно использовать упорядоченное разбиение, так как оно, как правило, увеличивает точность решения.

Для расчета модели на механические воздействия необходимо произвести ее закрепление, которое должно соответствовать реальному закреплению платы в изделии. Закрепление модели в CREO реализуется заданием нулевых перемещений точек или поверхностей компонентов [46].

Также задается направление закрепления. В конструкциях МПП используются три способа закрепления [47]:

- через резьбовые отверстия в основании;
- через сквозные отверстия через весь корпус;
- через отверстия в приливах основания.

Таким образом, для закрепления МПП конструкций электронных приборов нужно задавать нулевые перемещения внутренних поверхностей крепежных отверстий во всех направлениях. В качестве механической нагрузки можно задавать:

- гармоническую вибрацию;
- широкополосную случайную вибрацию;

- ударный импульс.

В процессе проектирования МПП выполняются несколько задач, среди которых наиболее важной влияющей на надежность и эксплуатационные характеристики всего изделия является обеспечение оптимальной компоновки элементов. Конструктор при этом учитывает несколько взаимосвязанных параметров, таких как устойчивость компонентов к механическим, тепловым воздействиям, а также электромагнитную совместимость. В процессе проектирования МПП в рамках задачи трассировки наработаны проверенные решения, в то время как процесс размещения элементов, который учитывает сложность указанных параметров, еще не имеет сложившихся методик [48]. Задача размещения также осложняется тем, что часть компонентов (электрические соединители, радиаторы, антенные модули, элементы управления и индикации) из-за конструктивных и эргономических соображений устанавливаются на строго определенных местах. Остальные элементы необходимо разместить так, чтобы максимально повысить надежность МПП в составе радиоэлектронных модулей. В результате проведенного анализа было выявлено, что при размещении компонентов на плате необходимо учитывать три группы факторов:

- механические свойства,
- тепловые параметры,
- электромагнитную совместимость.

#### 1.4. Выводы по главе

В данной работе предлагается комплексная методика проектирования радиоэлектронных модулей на основе МПП при действии внешних механических нагрузок, отличающаяся применением процесса предварительного размещения компонентов с учетом механических нагрузок до этапа трассировки. Методика также предусматривает использование постоянно пополняемой базы данных прочности и надежности паяных соединений различных корпусов компонентов, полученных путем испытаний по стандарту ГОСТ Р 55492-2013/IEC/PAS 62137-3:2008. На рисунке 1.11 показан фрагмент базы данных с указанными

максимальными прогибами вдоль плоскости у различных корпусов. При испытаниях могут учитываться как различные виды припоя, так и технология пайки.

Кроме того методика включает в себя:

- алгоритм выбора метода анализа механических характеристик МПП;
- широкое использование моделирования в САЕ-системах (CREO);
- алгоритм проектирования МПП с учетом предварительного размещения компонентов;
- алгоритм методики увеличения жесткости МПП;
- алгоритм оценки усталостного ресурса печатной платы;
- алгоритм методики проектирования МПП кассетной конструкции
- систему обмена проектными данными.

| №  | Компоненты        | Вес (г) | Длина (мм) | Ширина (мм) | Макс. высота (мм) | Максимальная допустимый прогиб, мм |
|----|-------------------|---------|------------|-------------|-------------------|------------------------------------|
| 1  | SOIC28-330        | 2       | 18,2       | 12,6        | 2,2               | 0,1                                |
| 2  | GNP (S-PBGA-N432) | 9       | 40         | 40          | 2                 | 0,3                                |
| 3  | BGA-352P-M01      | 11      | 35         | 35          | 2,58              | 0,26                               |
| 4  | МДМ2-1А 3,3 xH    | 23 г    | 22,3       | 12,1        | 9,8               | 0,22                               |
| 5  | SOIC-20 (DW)      | 0,45    | 12,85      | 10,4        | 0,5               | 0,078                              |
| 6  | SSOP-20 (DB)      | 0,15    | 7,2        | 7,8         | 2                 | 0,058                              |
| 7  | TSSOP-20 (PW)     | 0,1     | 6,5        | 6,5         | 1,2               | 0,048                              |
| 8  | TVSOP-20 (DGV)    | 0,1     | 5          | 6,4         | 1,2               | 0,048                              |
| 9  | QFN-20 (RGY)      | 4,5     | 3,5        | 1           | 0,5               | 0,001                              |
| 10 | BGA-320P-M06      | 2,9     | 27         | 27          | 2,46              | 0,20                               |
| 11 | BGA150FR          | 0,27    | 7          | 5           | 1,5               | 0,037                              |
| 12 | BG 352            | 3       | 35         | 35          | 1,4               | 0,26                               |
| 13 | FG 860            | 7       | 42,5       | 42,5        | 1,95              | 0,31                               |

Рисунок 1.11 – Пример базы данных прочности и надежности паяных соединений различных корпусов компонентов

Структурная схема процесса комплексного анализа механических характеристик РЭС представлена на рисунке 1.12. Методика основана на тесном взаимодействии САД-системы, включающей в себя 3D-модели конструкции как платы, так и остальных конструктивных элементов и электронных компонентов с САЕ-системами, позволяющими оценить механические характеристики конструкции МПП до этапа ее физического создания.

Актуальность темы диссертации состоит в необходимости разработки методик, математических моделей и алгоритмов процесса проектирования МПП с учетом действия на них внешних механических нагрузок. Предложенные методики и средства позволят повысить эффективность процесса проектирования электронных средств путем широкого внедрения САЕ-анализа на всех этапах проектирования, использования комплекса рекомендаций оптимального размещения компонентов до этапа трассировки МПП, а также применения программы электронного документооборота, позволяющего ускорить процесс перехода от одного этапа проектирования к другому [49].

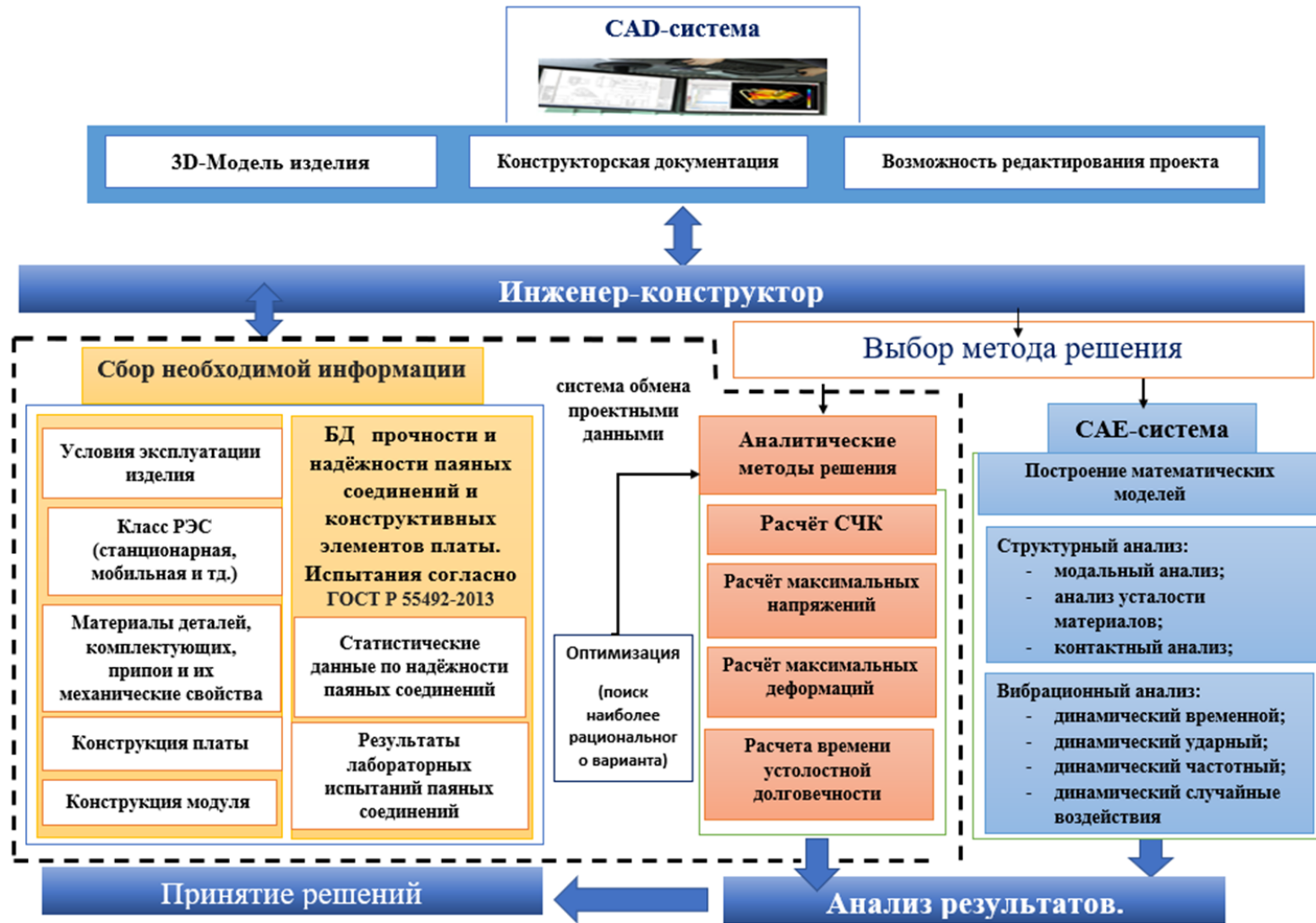


Рисунок 1.12 - Структурная схема процесса комплексного анализа механических характеристик МПП РЭС

Целью работы является разработка методик, математических моделей и алгоритмов, повышающих эффективность проектирования радиоэлектронных модулей на основе МПП, работающих при действии внешних механических нагрузок. Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1) исследовать виды конструкций, материалы и области применения МПП, способы фиксации в радиоэлектронных блоках, в том числе «кассетной» конструкции, определить граничные условия, используемые для моделирования характеристик электронных средств при действии на них внешних механических нагрузок;

2) провести анализ видов механических нагрузок, действующих на радиоэлектронные модули в составе МПП, а также особенности поведения отдельных компонентов при действии внешних деформаций, исследовать математические модели механических сил, действующих на МПП;

3) разработать математические модели определения прогиба участков МПП «кассетной» конструкции, позволяющие оценить механические нагрузки на паяные выводы компонентов и тем самым выявить опасные места для установки;

4) разработать методику проектирования радиоэлектронных модулей на основе МПП, охватывающую этапы от топологического проектирования до испытаний, позволяющую сократить временные затраты на проектирование и включающую структуру обмена проектными данными;

5) предложить методику топологического проектирования МПП, в том числе «кассетной» конструкции, основанную на предварительном размещении компонентов на плате и моделировании вибрационных свойств, выявлении наиболее опасных мест для микросхем с корпусами большой площади, позволяющую определять оптимальные схемы закрепления и координаты точек закрепления, а также возможность применения ребер для увеличения жесткости;

6) провести экспериментальную оценку точности моделирования механических характеристик радиоэлектронных модулей на основе МПП.

## Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

### 2.1. Математические модели механических сил, действующих на многослойные печатные платы

При эксплуатации радиоэлектронные средства испытывают действия внешних механических сил. Природа возникновения, характер и интенсивность механических воздействий в зависимости от источников появления могут быть достаточно разнообразными. Влияет также взаимное расположение источника и отдельных конструкций РЭС. В качестве источников механических сил можно выделить действие факторов окружающей среды, вращающиеся механизмы, имеющие биения у ротора, узлы с возвратно-поступательным движением, взрывы и удары. К отдельным видам механических воздействий относятся линейные ускорения, вибрации, удары [50].

На РЭС часто действуют внешние вибрации. Под вибрацией понимают механические колебания отдельных элементов конструкции. Среди видов вибрации можно выделить периодическую и случайную. Если колебательное движение повторяется, вибрация называется периодической. На рисунке 2.1 представлена классификация вибраций.

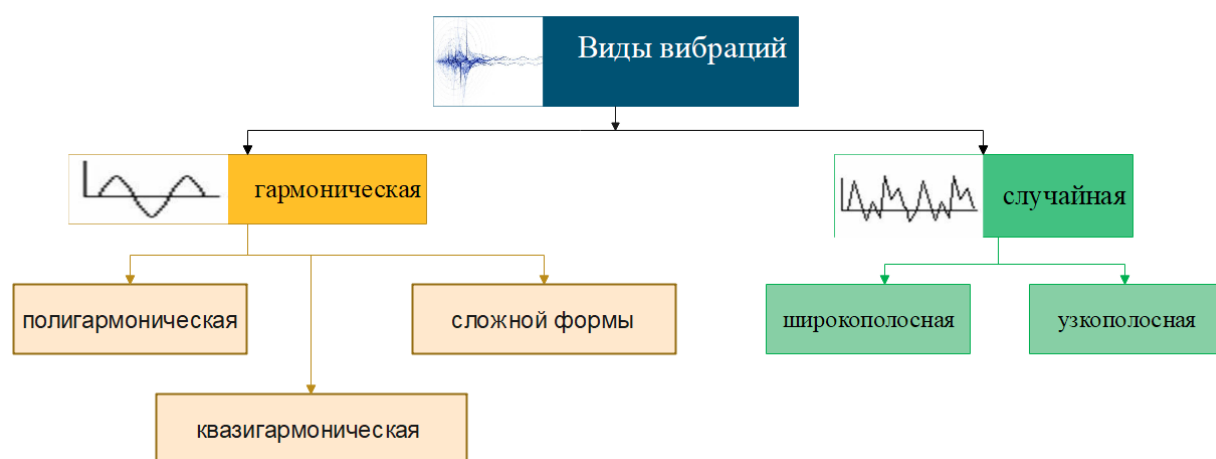


Рисунок 2.1 – Классификация видов вибраций [21]

Вибрации в РЭС в основном вызваны работой двигателей, трансмиссии, а также следствием передачи воздействий от неровности дороги. Колебательное движение таких объектов, как самолет, можно рассматривать как случайную вибрацию, поскольку непрерывное движение не повторяется.

Частотный спектр вибрации в самолете варьируется от 3 Гц до 1000 Гц. Уровни ускорения в вертикальном направлении варьируются от 1g до 5g с диапазоном частот от 100 до 400 Гц. Диапазон частот в горизонтальном направлении такой же, как и в вертикальном, но уровень его ускорения ниже и не превышает 1g.

Простейшее периодическое движение обычно представлено синусоидальной волной (рисунок 2.2), которая редко встречается в реальных условиях. В условиях синусоидальной вибрации виброперемещение может быть получено из следующего выражения:

$$x(t) = S \sin(\omega t + \phi) \quad , \quad (2.1)$$

где  $S$  – амплитуда виброперемещения,  $\omega$  – угловая частота,  $t$  – время,  $\phi$  – начальная фаза колебаний.

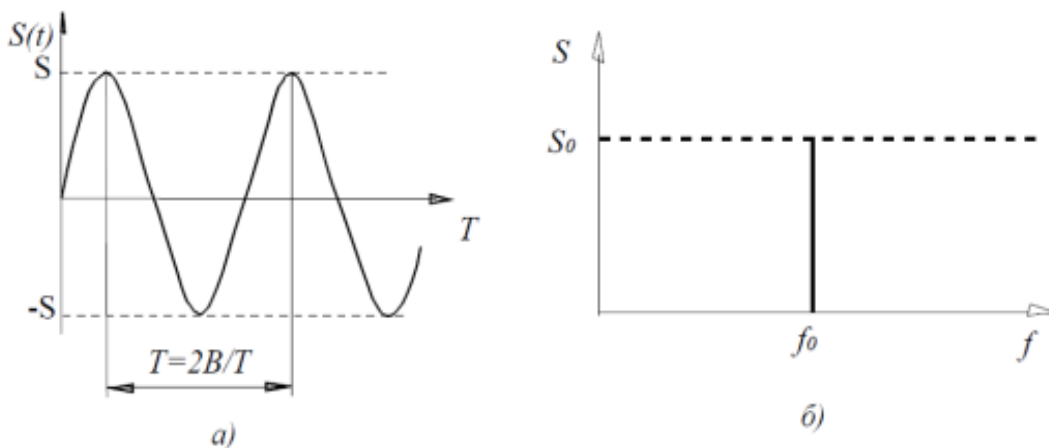


Рисунок 2.2 – Синусоидальная вибрация: а – форма; б – частотный спектр

Чтобы лучше понять физику колебаний, рассмотрим незатухающую систему с одной степенью свободы, состоящую из массы ( $m$ ), подвешенной к жесткому основанию с помощью пружины жесткостью ( $k$ ) (рисунок 2.3) [2].



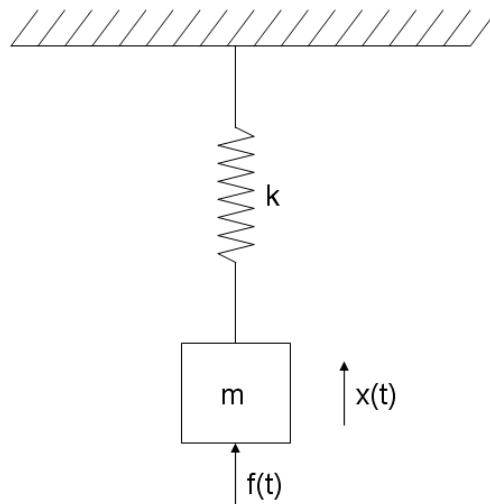


Рисунок 2.3 - Система масса-пружина [2]

Когда масса перемещается в заданное положение ( $x(t)$ ), можно рассчитать силу ( $f(t)$ ), действующую на систему [2]:

$$f(t) = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + kx(t) \quad (2.2)$$

Если сила, действующая на массу, представляет собой простое гармоническое возбуждение с частотой ( $\omega$ ), ее можно описать как [2]:

$$f(t) = F \sin(\omega t) \quad . \quad (2.3)$$

Объединив два уравнения, можно рассчитать смещение массы с заданным шагом времени [2].

$$x(t) = \frac{F \sin(\omega t)}{k - m\omega^2} \quad (2.4)$$

Большие смещения вызовут высокие напряжения в материале, и поэтому очень важно их уменьшить. Изучая уравнение 2.4, можно видеть, что для уменьшения смещения при заданной силе и частоте необходимо увеличить жесткость и уменьшить массу.

Источником полигармонической вибрации являются электромеханические устройства, содержащие быстровращающиеся массы, имеющие биения. Такой вид вибрации можно представить как сумму гармонических составляющих (спектр вибраций), что показано на рисунке 2.5.

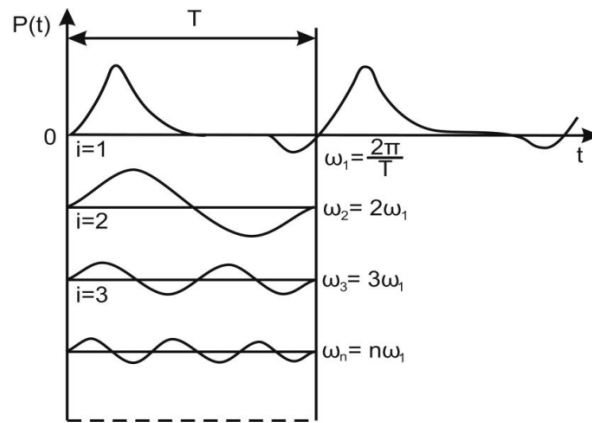


Рисунок 2.4 – Представление полигармонической вибрации в виде суммы синусоидальных вибраций

Полигармоническую вибрацию можно представить в виде ряда Фурье:

$$P(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos \omega_i t + b_i \sin \omega_i t), \quad (2.5)$$

где  $\omega_i = i\omega$ ,  $\omega = 2\pi/T$  – основная частота, соответствующая периоду внешней силы.

Коэффициенты разложения  $a_i$  и  $b_i$  определяются по формулам:

$$a_i = \frac{2}{T} \int_0^T P(t) \cos i\omega_i t dt, \quad b_i = \frac{2}{T} \int_0^T P(t) \sin i\omega_i t dt. \quad (2.6)$$

Они представляют собой амплитуды косинусных и синусных составляющих каждой из гармоник в ряде Фурье. Амплитуду  $S_i$  и начальную фазу  $\phi_i$  каждой  $i$ -й гармоники с частотой  $\omega_i = i\omega$  можно определить по следующей формуле:

$$S_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}, \quad \phi_i = \arctan \frac{b_i}{a_i}. \quad (2.7)$$

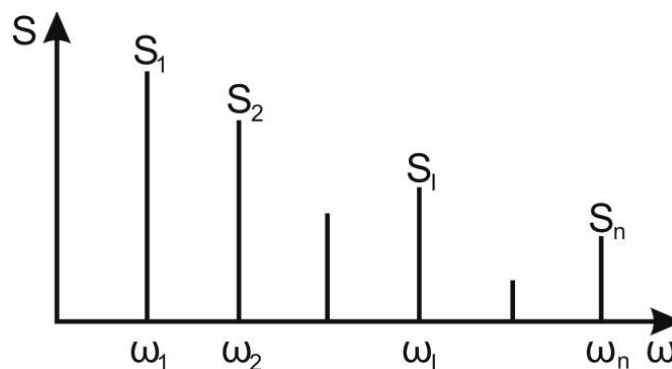


Рисунок 2.5 – Спектр колебаний полигармонической вибрации

Случайные вибрации наблюдаются в аппаратуре, установленной на автомобиле или самолете. У этой вибрации частота, амплитуда, виброперемещения и др. изменяются случайным образом по времени. Такой вид вибрации делится на стационарную и нестационарную [51].

Появление резонанса в конструкциях МПП с установленными компонентами могут привести к следующим последствиям:

- повышенная амплитуда вибрации и виброускорение могут привести к нарушению работоспособности отдельных электрорадиоэлементов, вследствие чего может быть отказ работы аппаратуры;

- резонансные явления приводят к увеличению усталостных напряжений, которые являются следствием появления микротрещин и увеличения переходного сопротивления паяных контактов;

- вследствие резонанса в полупроводниках проявляется тензорезистивный эффект, а также изменяется магнитная проницаемость ферритов, что приводит к изменению параметров работы аппаратуры и искажению сигнала.

Удар можно представить как процесс быстрой передачи энергии механической системе, что приводит к значительному увеличению напряжения, скорости, ускорения или смещения конструкций внутри системы. Время, в течение которого происходит передача энергии, обычно связано с резонансной частотой или с собственным периодом системы.

Удар часто возбуждает многие собственные частоты в сложной структуре, что может привести к четырем основным типам отказов электронных средств.

Эти отказы обусловлены следующими факторами:

- высокие напряжения, которые могут вызвать разрушения или остаточные деформации в конструкции;

- высокие значения ускорения, которые могут вызвать дребезжание реле, проскальзывание потенциометров, изменение индуктивностей катушек и ослабление болтов;

- большие смещения, которые могут вызвать удары между соседними печатными платами, что приводит к растрескиванию компонентов и паяных соединений, разрыв кабелей и жгутов, разрушение корпусных элементов;

- нарушение электрического контакта, возникающего во время удара, но исчезающего при рассеивании энергии удара.

Этот последний эффект может иметь место в кварцевых генераторах, конденсаторах и микросхемах, в том числе типа «система в корпусе». Большая тонкая крышка может сместиться и вызвать временное короткое замыкание внутренних соединительных проводов кристалла. Микросхемы обычно выглядят нормально после ударного воздействия, что затрудняет поиск и устранение неисправности.

Для определения вида ударного воздействия или его последствий использовалось много различных методов. Тремя наиболее популярными методами являются исследование действия ударного импульса, определение ускорения и спектра отклика на удар.

Импульсный удар имеет дело с ускорениями или смещениями в форме хорошо известных форм, таких как прямоугольный импульс, полусинусоидальный импульс и различные типы треугольных импульсов (вертикальный подъем, вертикальный спад и симметричный).

Некоторые типичные импульсные удары показаны на рисунке 2.6. Различные типы ударных импульсов часто используются для воздействия на электронные узлы, для имитации транспортных условий, условий работы на стендах, а также воздействий взрывов, действующих на ракетную и космическую аппаратуру. То, как различные электронные компоненты реагируют на эти удары, будет определять, выйдут ли компоненты из строя.

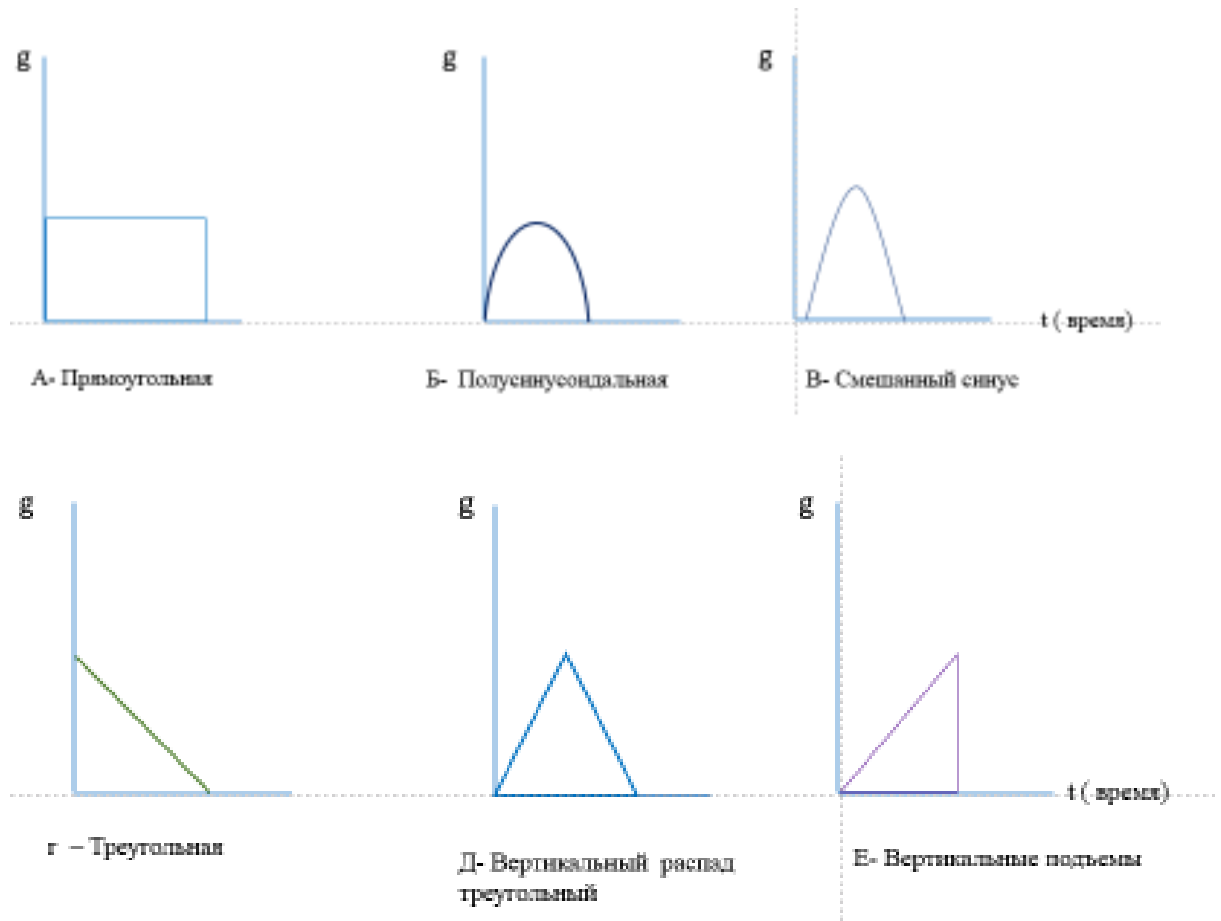


Рисунок 2.6 - Различные типы ударных импульсов

Полусинусоидальный импульс можно описать следующим соотношением:

$$F(t) = A \sin \omega t \text{ при } 0 \ll t < \tau, F(t) = 0 \quad (2.8)$$

при  $t \geq \tau$ ,

- прямоугольного –  $F(t) = A$  при  $0 \ll t < \tau$ ;
- треугольного –  $F(t) = At$  при  $0 \ll t < \tau$ ;

$$F(t) = \frac{A}{\tau - t_\phi} \text{ при } t_\phi \ll t < t_u.$$

Представление удара в виде простого импульса имеет достаточно несложную математику и поэтому его наиболее часто используют в расчетах. Однако такое представление удара далеко от реальности. Настоящий удар редко бывает простым импульсом. Тем не менее простые импульсы часто эффективны для выявления слабых мест во многих типах структур. Если ударный импульс представить в виде

частотного спектра  $F(t)$ , представляющего собой ряд Фурье, то можно получить более точные результаты.

Соотношение для такого спектра имеет вид:

$$F(t) = + \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{j\omega t} dt. \quad (2.9)$$

Если конструкция МПП представляет собой упругую систему, то могут возникнуть колебания, которые могут вызвать резонанс в отдельных электрорадиоэлементах с последующими негативными последствиями. Это также надо учитывать при разработке РЭС.

При ударах печатные платы изгибаются в том же направлении, что и импульс. Когда импульс уменьшается, печатные платы будут резонировать на своих собственных резонансных частотах, из которых основная, или самая низкая, резонансная частота обычно является наиболее значимой по амплитуде.

Необходимо проявлять крайнюю осторожность при определении зазоров для печатных плат, которые должны работать в условиях сильного ударного воздействия. Должны быть предусмотрены достаточные зазоры для учета накопления допусков по толщине печатных плат, размеров компонентов, выступов подводящих проводов компонентов на задней стороне печатных плат, допусков на расположение и возможных амплитуд смещения соседних печатных плат, движущихся в противоположных направлениях одновременно. Важно поддерживать низкие динамические перемещения, чтобы динамические напряжения были низкими, а вероятность столкновения между соседними печатными платами также была низкой. Опыт показал, что высокие уровни ударного ускорения могут привести к растрескиванию паяных соединений и разрыву подводящих проводов на больших или тяжелых электронных компонентах.

Большие компоненты, такие как трансформаторы, преобразователи, конденсаторы и дроссели, должны монтироваться очень надежно, чтобы избежать сбоя в несущей конструкции или в монтажном оборудовании. Когда большие компоненты монтируются на печатных платах, которые показывают большие

амплитуды смещения, относительное перемещение между корпусом компонента и печатной платой часто может создавать большие усилия и напряжения. На рисунке 2.7 показано, как паяные соединения в большом корпусе подвергаются напряжению, когда печатная плата имеет большие прогибы.

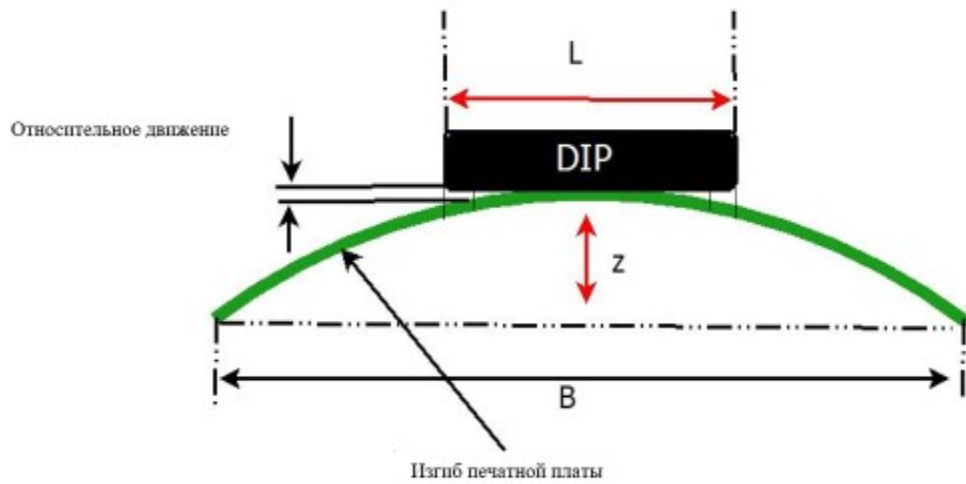


Рисунок 2.7 - Резонанс печатной платы, вызывающий напряжения в выводах из-за относительного движения между корпусом компонента и печатной платой

Наибольший ущерб будет нанесен, когда крупные компоненты будут установлены в центре печатной платы, где изменения кривизны и уровни ускорения являются наибольшими.

## 2.2. Математические модели собственных частот многослойных печатных плат

В большинстве случаев печатная плата имеет прямоугольную форму, поэтому метод Рэлея очень удобен для определения собственных резонансных частот прямоугольных пластин с различными граничными условиями [53].

Все, что требуется - это предположить, что кривая прогиба удовлетворяет геометрическим граничным условиям прогиба и наклона для конкретной пластины.

Рассмотрим случай прямоугольной пластины, закрепленной на всех четырех краях.

- отклонение будет нулевым на всех четырех краях и максимальным в центре;

- наклон также будет равен нулю на четырех краях и нулю в центре.

Кривая отклонения для просто поддерживаемой плиты может быть представлена двойным тригонометрическим рядом

$$Z = \sum_{m=1,3,5}^x \sum_{n=1,3,5}^x A_{mn} \sin \frac{m\pi X}{a} \sin \frac{n\pi Y}{b}, \quad (2.10)$$

где  $m, n$  номер гармоники колебаний  $X, Y$  координата,  $A_m$  амплитуда.

Если для описания этой пластины используется тригонометрическое выражение, оси координат могут быть размещены на краях пластины, как показано на рисунке 2.8.

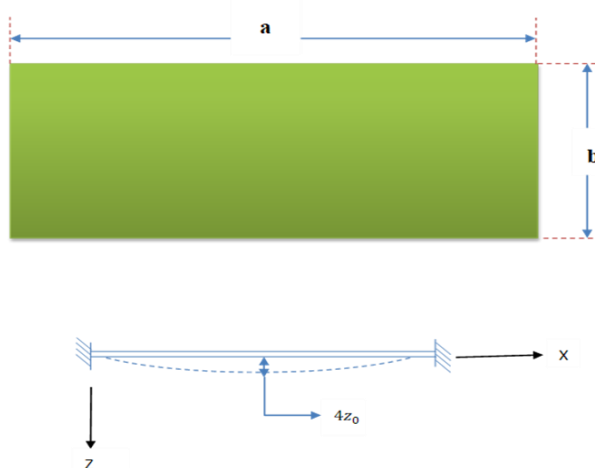


Рисунок 2.8 – Прямоугольная пластина с четырьмя закрепленными сторонами

Тригонометрическое выражение, которое удовлетворяет этим граничным условиям:

$$z = z_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right). \quad (2.11)$$

Эту кривую прогиба можно проверить, чтобы убедиться, что она соответствует геометрическим требованиям к отклонению:

$$\text{при } x=0 \quad \text{и} \quad y=0, \quad z=0,$$

$$\text{при } x=0 \quad y=b, \quad z=0,$$

$$\text{при } x=a \quad y=b, \quad z=0,$$



$$\text{при } x=a/2 \quad y=b/2, \quad Z=4Z_0.$$

Теперь надо проверить эту кривую, чтобы убедиться, что она соответствует требованиям геометрического наклона. Рассмотрим сначала наклон по оси X, который можно определить, взяв частную производную Z по X:

$$z = \frac{\partial Z}{\partial X} = \frac{2\pi}{a} \sin \frac{2\pi x}{a} \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right) \quad (2.12)$$

$$\text{при } x=0 \text{ и } y=b/2, \quad \phi_x=0,$$

$$\text{при } x=a/2, y=b/2, \quad \phi_x=0,$$

$$\text{при } x=a/2, y=b/2, \quad \phi_x=0.$$

Полиномиальное выражение также можно использовать для описания прямоугольной пластины, закрепленной со всех четырех сторон.

$$z = h \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left(1 - \frac{X^2}{c^2}\right) \left(1 - \frac{Y^2}{d^2}\right) \left(\frac{x}{c}\right)^m \left(\frac{y}{d}\right)^n A_{mn} \cos \Omega t$$

Оси координат этой пластины можно смещать к центру (рисунок 2.9).

Полиномиальное выражение, которое удовлетворяет этим граничным условиям:

$$z = z_0 \left(1 - \frac{x^2}{c^2}\right)^2 \left(1 - \frac{y^2}{d^2}\right)^2 \quad (2.13)$$

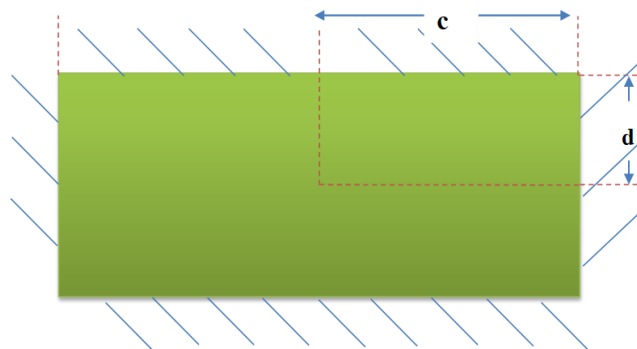


Рисунок 2.9 – Оси в центре пластины с с четырьмя неподвижными краями

Этот полином даст следующую собственную частоту:

$$f_n = \frac{1.96}{\pi} \left[ \frac{D}{\rho} \left( \frac{2.01}{c^4} + \frac{1}{c^2 d^2} + \frac{2.01}{d^4} \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2.14)$$

Собственная частота прямоугольной пластины с тремя опорными краями и одним свободным краем может быть получена с помощью тригонометрической или полиномиальной функций. Эскиз осей координат для каждой пластины вместе с выражением прогиба и результирующими уравнениями собственной частоты для тригонометрической и полиномиальной функций показаны в таблице 2.1.

Можно сравнить уравнение прогиба и полученное уравнение собственной частоты с использованием тригонометрической функции или полиномиальной функции для пластин с комбинациями свободных кромок, поддерживаемых кромок и фиксированных кромок, как показано на рисунках 2.13 и 2.14. Тригонометрические функции также могут быть объединены с полиномиальными в том же уравнении прогиба для описания прогиба однородной прямоугольной пластины.

Например, рассматривая плату, которая просто опирается на две противоположные кромки и закреплена на двух противоположных кромках, оси координат и уравнение прогиба, отвечающее геометрическим граничным условиям, будут такими, как показано в таблице 2.2.

Различные способы закрепления печатных плат и аналитические выражения для нахождения собственных частот приведены в приложении А.

Динамические изгибающие напряжения в равномерно нагруженной печатной плате могут быть определены для случая резонанса путем анализа изменения динамической нагрузки по поверхности платы, когда края платы просто поддерживаются. Анализируя относительные динамические отклонения, получаем, что они будут максимальными в центре платы и равными нулю по краям (рисунок 2.10).

Таблица 2.1 . Уравнения собственных частот для тригонометрической и полиномиальной функций для случая закрепления трех сторон платы

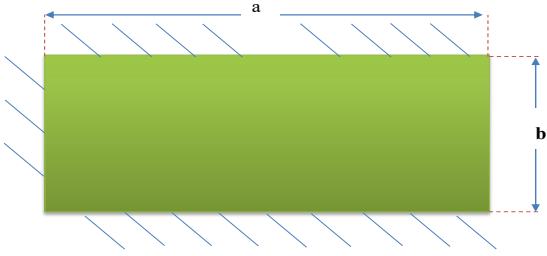
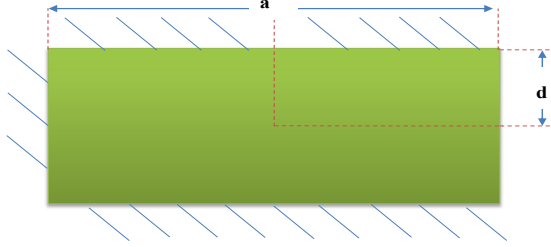
| Тригонометрическая функция   | Полиномиальная функция   |
|--|--|
|   |    |
| $z = z_0 \sin \frac{\pi x}{2a} \sin \frac{\pi y}{b}$ $f_n = \frac{\pi}{2} \left( \frac{D}{\rho} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{4a^2} + \frac{1}{b^2} \right)$ | $z = z_0 x \left( 1 - \frac{y^2}{d^2} \right)$ $f_n = \frac{1.37}{\pi} \left[ \frac{D}{\rho} \left( \frac{1}{d^4} + \frac{1.4}{a^2 d^2} \right) \right]^{1/2}$ |

Таблица 2.2. Уравнения собственных частот для тригонометрической и полиномиальной функций для случая, где два противоположных края свободны и два противоположных края поддерживаются

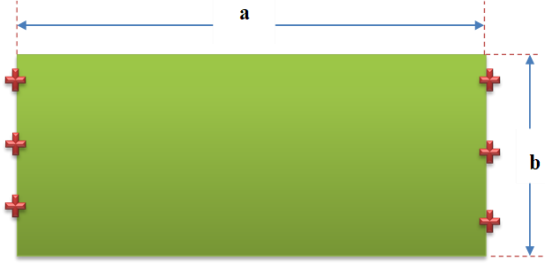
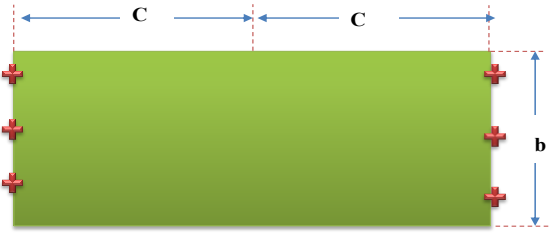
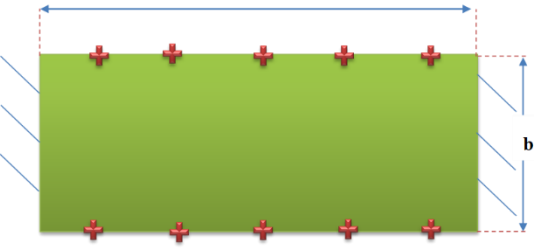
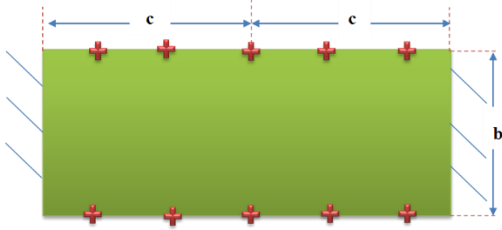
| Тригонометрическая функция  | Полиномиальная функция  |
|---|---|
|          |                             |
| $z = z_0 \sin \frac{\pi X}{Y}$ $f_n = \frac{\pi}{2a^2} \left( \frac{D}{\rho} \right)^{1/2}$ | $z = z_0 x \left( 1 - \frac{X^2}{C^2} \right)$ $f_n = \frac{1.36}{\pi C^2} \left[ \frac{D}{\rho} \right]^{1/2}$ |

Таблица 2.3. Уравнения собственных частот для тригонометрической и полиномиальной функции для случая, где два противоположных ребра закреплены и два противоположных ребра поддерживаются

| Тригонометрическая функция   | Полиномиальная функция  |
|--|---|
|   |   |
| $z = z_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) \sin \frac{\pi y}{b}$ $f_n = \frac{\pi}{3.46} \left[ \frac{D}{\rho} \left( \frac{16}{a^4} + \frac{8}{a^2 b^2} + \frac{3}{b^4} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$ | $z = z_0 \left(1 - \frac{x^2}{c^2}\right)^2 \left(1 - \frac{y^2}{d^2}\right)$ $f_n = \frac{1.36}{\pi} \left[ \frac{D}{\rho} \left( \frac{4.2}{c^4} + \frac{2}{c^2 d^2} + \frac{1}{d^4} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$ |

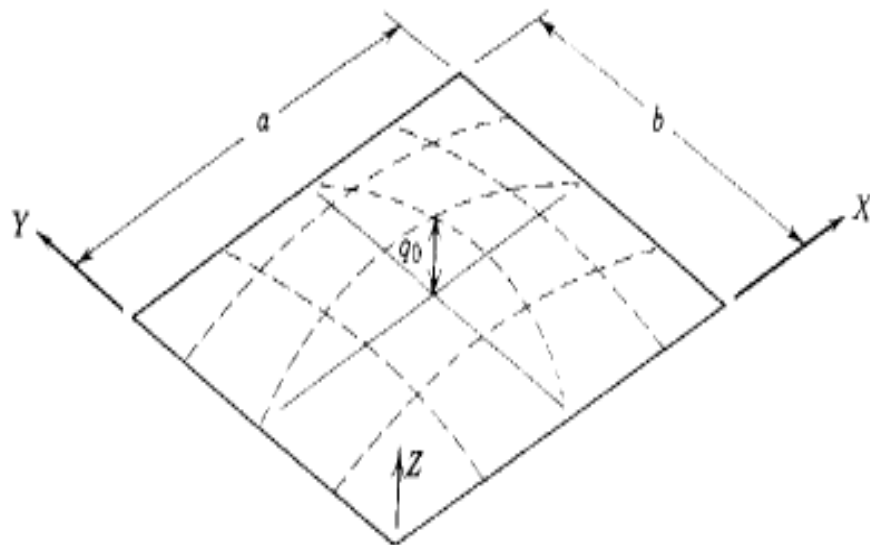


Рисунок 2.10 – Режим динамического прогиба печатной платы [54]

Отклонение печатной платы в любой точке также может быть представлено тригонометрическим выражением, аналогичным показанному в формуле:

$$z = A \sin \frac{\pi x}{a}. \quad (2.15)$$

Выполняя операцию дифференцирования формулы (2.15), получаем [7]:

$$\frac{\partial^4 z}{\partial^4 X^4} = \frac{\pi^4}{a^4} A \sin \frac{\pi X}{a} \sin \frac{\pi Y}{b}, \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial^4 z}{\partial^4 Y^4} = \frac{\pi^4}{b^4} A \sin \frac{\pi X}{a} \sin \frac{\pi Y}{b}, \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial^4 z}{\partial X^2 \partial Y^2} = \frac{\pi^4}{a^2 b^2} A \sin \frac{\pi X}{a} \sin \frac{\pi Y}{b}. \quad (2.18)$$

Коэффициент формы отклонения  $A$  можно определить, подставив уравнения (2.16)-(2.18) в уравнение (2.15), получим:

$$A = \frac{q_0}{\pi^2 D \left( \frac{1}{a^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{1}{b^4} \right)}. \quad (2.19)$$

Подставив уравнение (2.19) в уравнение (2.15), получаем уравнение прогиба в любой точке печатной платы [55]:

$$Z = \frac{q_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}}{\pi^4 D \left( \frac{1}{a^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{1}{b^4} \right)}$$

Максимальный прогиб  $Z$  будет происходить в центре платы, где

$X = a/2$  и  $Y = b/2$ . Подставляя в приведенное выше уравнение, получаем [8]:

$$Z_0 = \frac{q_0}{\pi^4 D \left( \frac{1}{a^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{1}{b^4} \right)}. \quad (2.20)$$

Предполагая, что печатная плата действует как система с одной степенью свободы в своем основном резонансном режиме, максимальное динамическое смещение может быть аппроксимировано следующим образом:

$$Z_0 = \frac{9.8 G_{out}}{f_n^2}. \quad (2.21)$$

Подставив это выражение в формулу (2.20), получаем соотношение для максимальной интенсивности нагрузки  $q_0$ :

$$q_0 = \frac{9.8 GD\pi^4}{f_n^2} \left( \frac{1}{a^4} + \frac{2}{a^2b^2} + \frac{1}{b^4} \right) \quad (2.22)$$

Коэффициент жесткости пластины  $D$  может быть определен из частотного уравнения для однородной прямоугольной пластины с простой опорой с использованием уравнения:

$$D = \frac{4F_n^2 \rho}{\pi^2 \left( \frac{1}{a^4} + \frac{2}{a^2b^2} + \frac{1}{b^4} \right)}. \quad (2.23)$$

Если заменить уравнение (2.23) на уравнение (2.22), то максимальная интенсивность динамической нагрузки в центре пластины упростится до следующего выражения:

$$q_0 = \frac{WG_{out}}{a \cdot b}. \quad (2.24)$$

Максимальный динамический изгибающий момент в прямоугольной печатной плате будет находиться в центре. Изгибающий момент должен быть больше для сечения по более короткому размеру пластины  $b$ , где он имеет значение  $M_y$ , поскольку изгиб происходит по оси  $Y$ . Результаты моделирования с определением максимального прогиба показаны на рисунках 2.11-2.14. Тогда максимальный изгибающий момент становится равным:

$$M_y = \frac{q_0 \left( \frac{\mu}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)}{\pi^2 \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)}. \quad (2.25)$$

Динамическое напряжение изгиба в центре пластины может быть определено из стандартного уравнения пластины.

Поскольку в печатных платах обычно имеются отверстия для выводов и компонентов, следует использовать коэффициент концентрации напряжений:

$$S_b = \frac{2,34 \cdot 10^{-4} k_1 M_y}{h^2} \quad (2.26)$$

где  $M_y$  в кг/м. (см. уравнение 2.25)

$h$  - толщина платы в мм.

$k_1$  - теоретический коэффициент концентрации напряжений для небольшого отверстия в печатной плате)



Рисунок 2.11 – Максимальное динамическое изгибающее перемещение



Рисунок 2.12 – Максимальное динамическое изгибающее перемещение в случае резонанса (первая собственная частота)

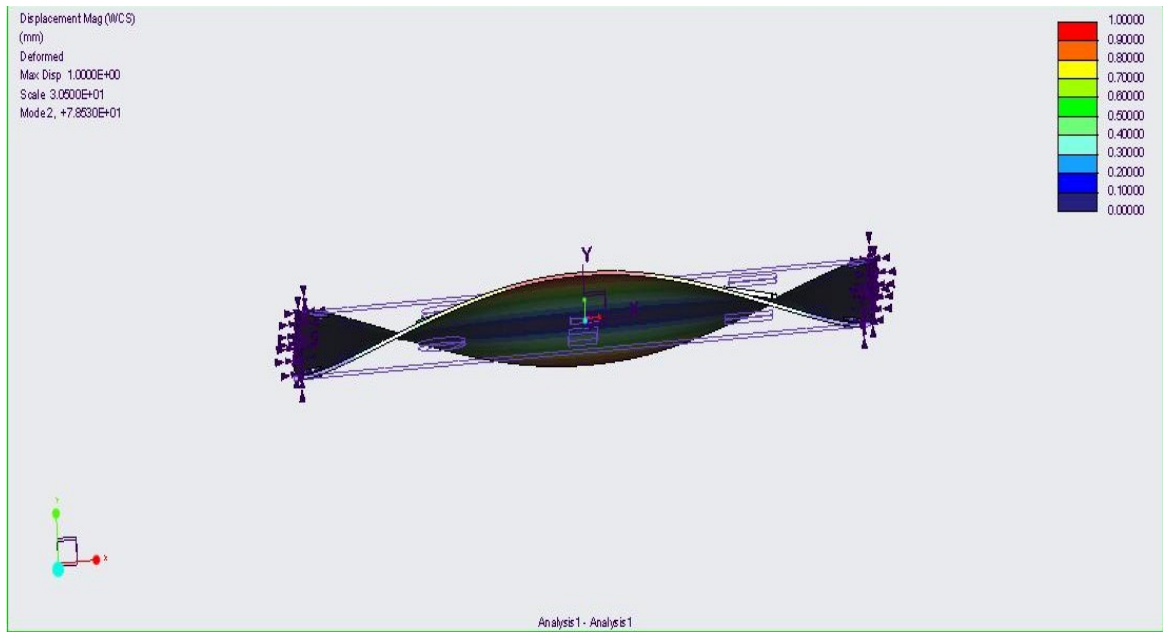


Рисунок 2.13 – Максимальное динамическое изгибающее перемещение в случае резонанса (вторая собственная частота)

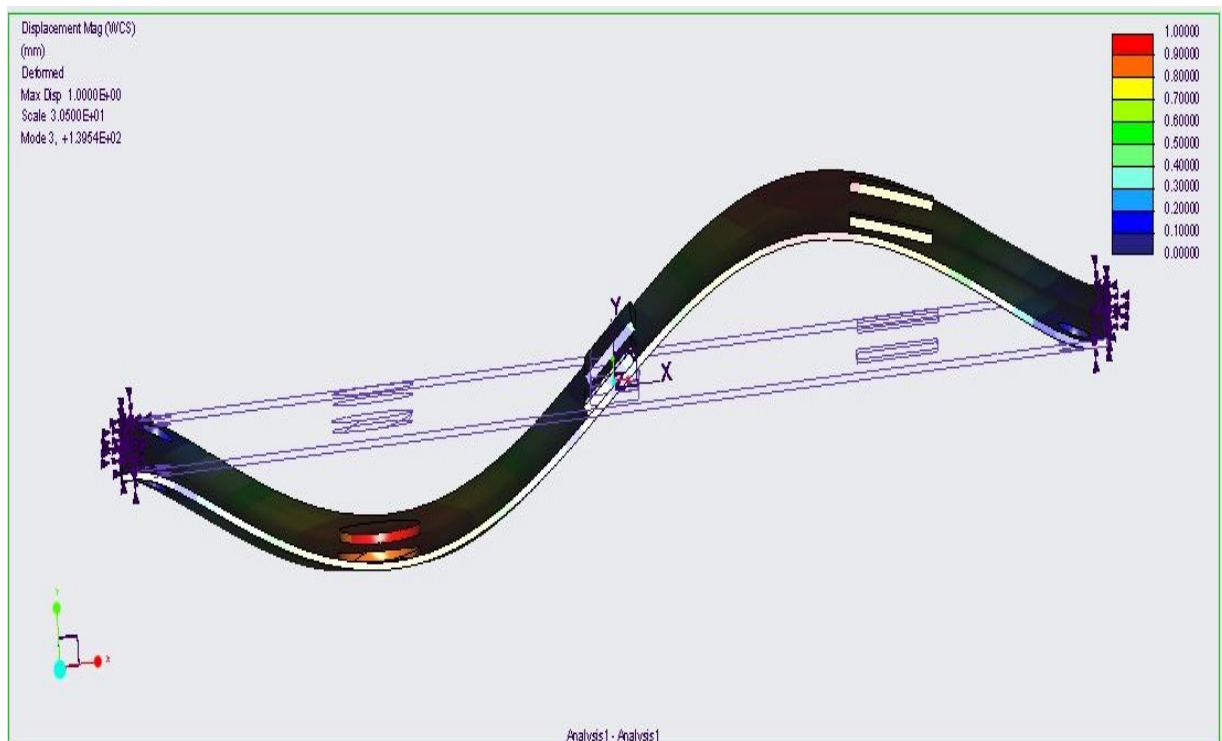


Рисунок 2.14 – Максимальное динамическое изгибающее перемещение в случае резонанса (третья собственная частота)

Также имеет значение расположение компонентов на печатной плате. Прямоугольные компоненты обычно монтируют боковыми сторонами



параллельно сторонам платы. Компоненты меньшего размера, менее 2 сантиметров, очень редко вызывают какие-либо проблемы с вибрацией, если только этот компонент не является очень высоким и тяжелым, например трансформатором или конденсатором большой емкости.

В более крупных компонентах, размером более 2 сантиметров, обычно возникают проблемы с вибрацией в зависимости от типа печатной платы и требований к уровню вибрации. Проблемы с вибрацией становятся очень серьезными, когда размер компонента достигает 5 сантиметров или более.

При оценке сменных плат в случае «кассетной» конструкции наиболее критичным местом для крупных компонентов будет центр печатной платы. Именно здесь происходит наиболее быстрое изменение кривизны на основной резонансной частоте печатной платы с зафиксированными краями.

По мере того, как компонент перемещается от центра, кривизна уменьшается, поэтому относительное движение между печатной платой и корпусом компонента уменьшается, как показано на рисунке 2.15.

Это снижает силы и напряжения в выводных проводах и паяных соединениях, поэтому увеличивается усталостная долговечность [8].

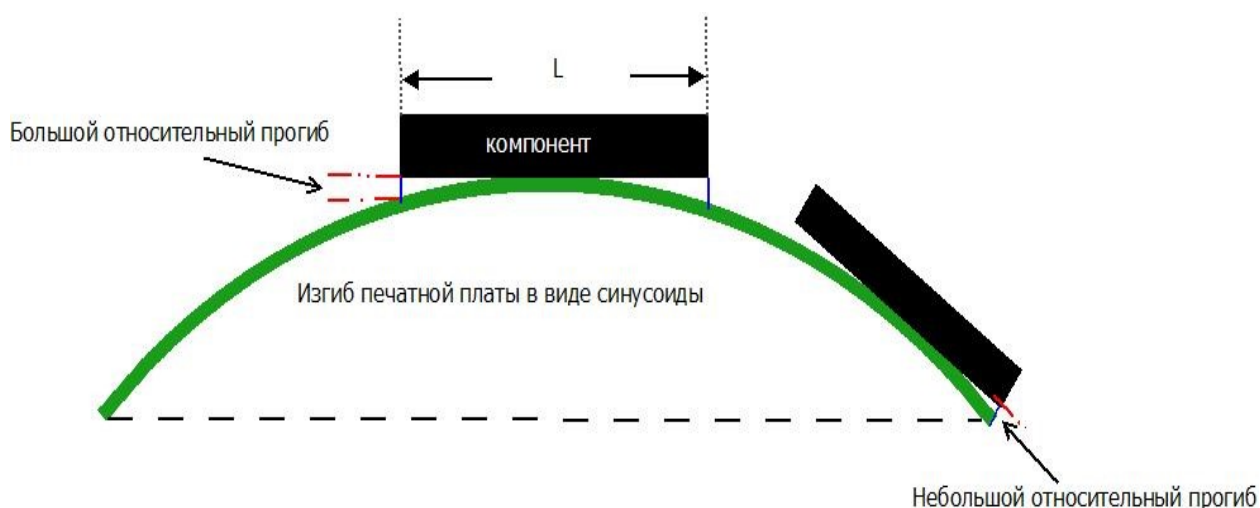


Рисунок 2.15 – Величина относительного прогиба между компонентом и печатной платой при установке компонента в центре и рядом с краем печатной платы

Наиболее опасная ориентация длинного компонента - параллельно короткой стороне прямоугольной печатной платы «кассетной» конструкции. Это связано с более сильным изменением кривизны более короткой стороны печатной платы, чем длинной стороны. Это приводит к большему относительному прогибу между печатной платой и компонентом, что увеличивает нагрузки и напряжения в выводах и паяных соединениях, как показано на рисунке 2.16. Повышенные нагрузки нежелательны, поскольку они сокращают усталостную долговечность системы. Силы и напряжения в выводах и паяных соединениях электронных компонентов, установленных на печатных платах, могут быть связаны с относительной кривизной печатной платы во время ее резонансного состояния.

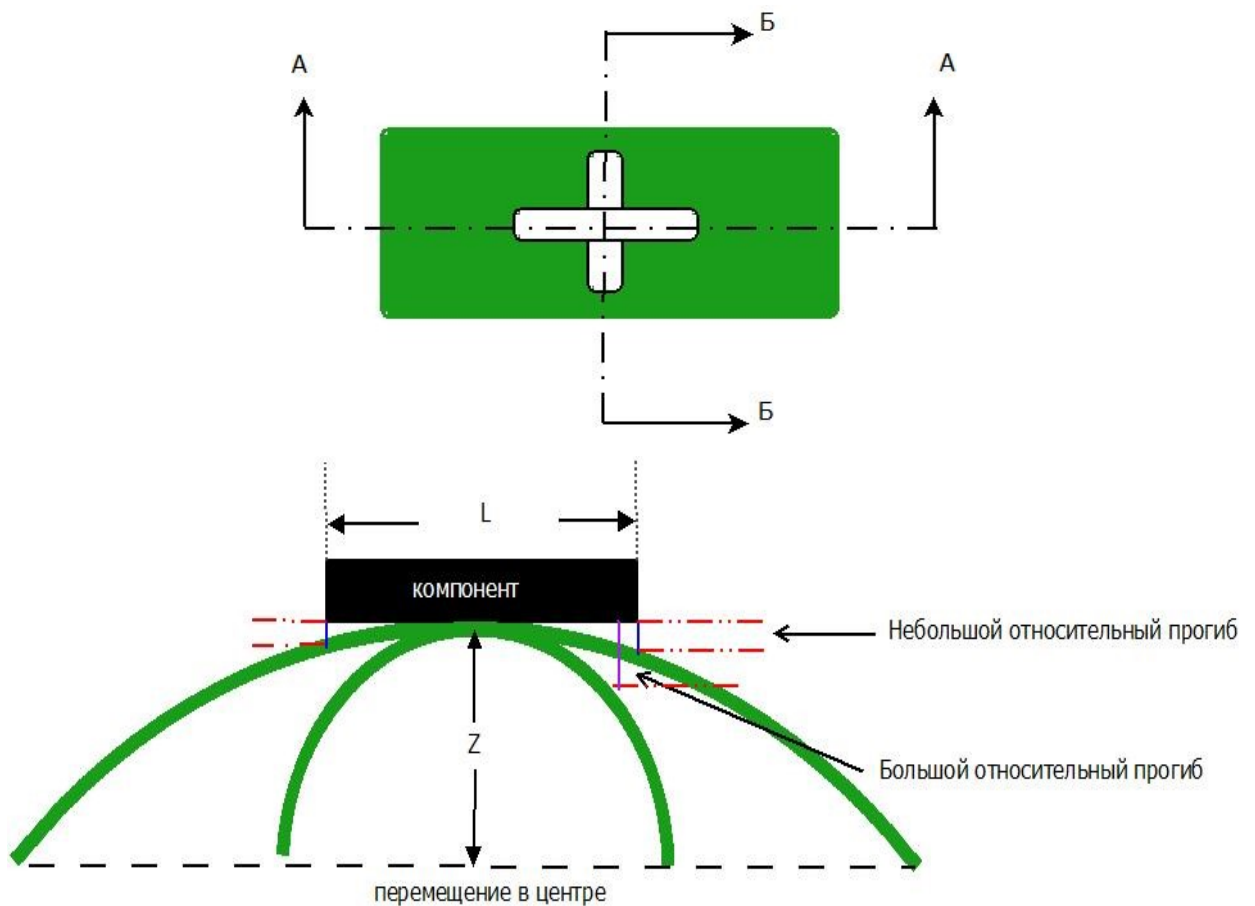


Рисунок 2.16 – Величина относительного прогиба между компонентом и печатной платой в условиях установки параллельно или поперечно длинному краю

Относительная кривизна может быть связана со смещением печатной платы, а смещение может быть связано с расположением компонента на печатной плате. Когда края печатной платы просто поддерживаются (или шарнирно закреплены), то смещение в любом месте печатной платы может быть определено из следующего соотношения:

$$z = z_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} . \quad (2.27)$$

Когда компонент расположен в центре печатной платы, X - это a/2, а Y -b/2. Смещение печатной платы в центре определяется по формуле

$$z = z_0 \sin \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi}{2} = z_0 \quad (2.28)$$

Когда компонент расположен не по центру, в позиции, где X равен a/2, а Y равен b/4, то смещение печатной платы равно:

$$z = z_0 \sin \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi}{4} = 0.707 z_0.$$

Когда компонент расположен в точках крепления четверти, X равен a/4, а Y равен b/4. Смещение печатной платы в этот момент равно

$$z = z_0 \sin \frac{\pi}{4} \sin \frac{\pi}{4} = 0.5 z_0.$$

Эти относительные смещения в различных положениях на печатной плате будут определять силы и напряжения в выводах компонентов и паяных соединениях, что будет иметь прямое влияние на усталостную долговечность контактов. Таким образом, эти относительные смещения можно использовать для определения приблизительного значения усталостной долговечности различных типов компонентов в различных средах в зависимости от расположения компонентов на печатной плате.

### 2.3. Использование ребер на печатных платах

Жесткость печатной платы может быть увеличена без значительного увеличения массы, при этом собственная частота также увеличится и прогиб в центре платы заметно уменьшится. Уменьшение прогиба печатной платы вызывает меньшие напряжения в электрических компонентах и других элементах печатной платы во время вибрации. Одним из простых способов увеличения жесткости печатной платы является использование ребер. Если ребра изготовлены из тонкой стали, меди или латуни, их можно запрессовать или припаять к медной фольге печатной платы. Это образует очень жесткую конструкцию из-за высокого модуля упругости материалов. Эти ребра могут иметь вырезы между опорами, чтобы не вызывать коротких замыканий между проводниками платы. Если два стальных ребра припаяны к плате симметрично по длине, печатная плата будет выглядеть так, как показано на рисунке 2.17. Особенно актуальны ребра жесткости для «кассетной» конструкции. Они позволяют перераспределить нагрузку на рамку, находящуюся по периметру платы.

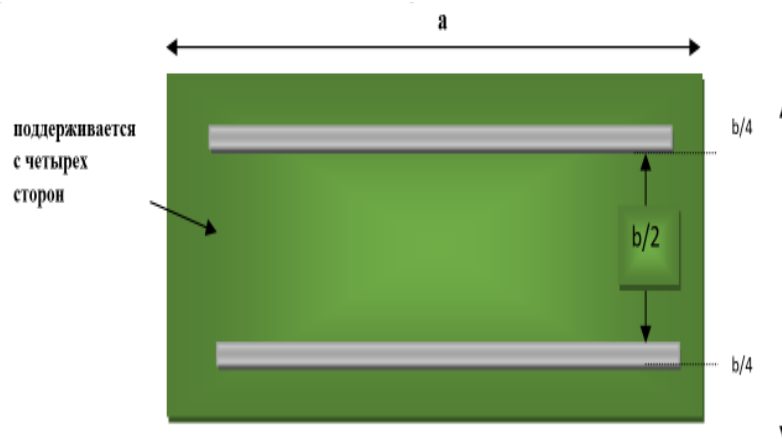


Рисунок 2.17 – Ребра жесткости припаяны к печатной плате

Четыре края платы будут действовать так, как будто они просто поддерживаются. Если используется значительно более высокая перегрузка, например 10g, край соединителя может действовать больше как свободный край. Учитывая четыре свободно поддерживаемых края, собственная частота для

печатной платы с ребрами может быть определена путем внесения небольших изменений в формулу, чтобы учесть различную жесткость по осям X и Y.

Тогда уравнение собственной частоты принимает следующий вид:

$$f_n = \frac{\pi}{2} \left[ \frac{1}{\rho} \left( \frac{D_x}{a^4} + \frac{4 D_x D_y}{a^2 b^2} + \frac{D_y}{b^4} \right) \right]^{1/2}. \quad (2.29)$$

Здесь  $D$  - жесткость на изгиб многослойной платы вдоль оси X, а  $D$  - жесткость на изгиб вдоль оси Y. Поскольку ребра печатной платы параллельны оси X, они увеличат жесткость на изгиб вдоль оси X, но не вдоль оси Y. Жесткость на кручение комбинации пластины и ребра представлена в [55].

Ребра не увеличат жесткость пластины или печатной платы, если они не используются правильным образом. Для того чтобы ребро было эффективным, оно должно нести нагрузку. Поскольку все нагрузки в конечном итоге должны быть перенесены на опоры, ребро наиболее эффективно, когда оно переносит нагрузку непосредственно на опоры.

Например, рассмотрим плоскую квадратную плату, просто опирающуюся на два противоположных края и свободную на двух противоположных краях. Если к плате добавить ребра так, чтобы они соединяли два свободных края, ребра не будут переносить нагрузку непосредственно на опоры, и эти ребра не будут очень эффективными для придания жесткости плате [56].

Если ребра добавить к плате так, чтобы они соединяли две опорные кромки (рисунок 2.17), то эти ребра будут переносить нагрузку непосредственно на опоры и будут очень эффективны для придания жесткости плате.

Если ребра не могут быть перенесены непосредственно в опоры, то должен быть предусмотрен элемент для переноса нагрузки на опоры, чтобы сделать ребра более эффективными. Например, рассмотрим плоскую квадратную плату, просто поддерживаемую с трех сторон и свободную с четвертой стороны. Если к плате необходимо добавить ребра, чтобы они заканчивались на свободном краю, то

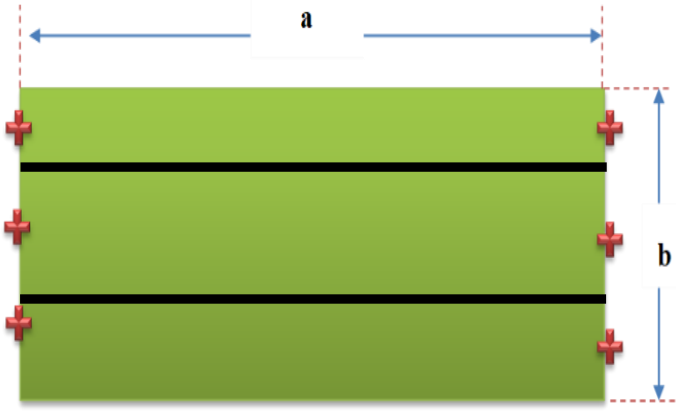

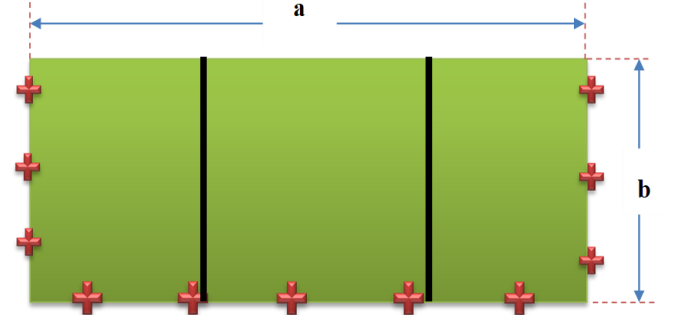
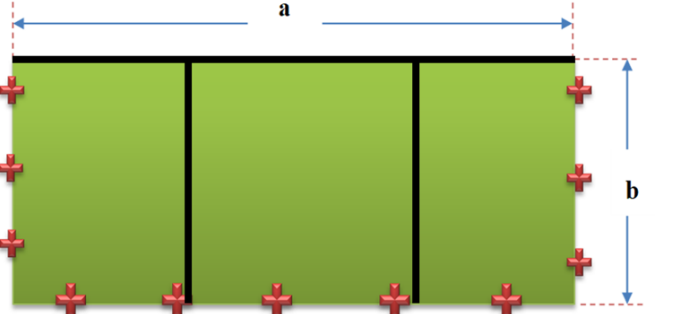
поперек свободного края следует разместить дополнительное ребро, которое будет выполнять роль дополнительного элемента, который будет переносить нагрузку на опоры (таблица 2.4).

#### 2.4. Математические модели оценки усталостной долговечности

Печатные платы в процессе производства и эксплуатации испытывают различные термические и механические нагрузки, в том числе циклический изгиб, падение, вибрацию и т. д. Циклическое повторение этих нагрузок в течение срока службы устройства может привести к трещинам на печатной плате и паяных соединениях, что в конечном итоге может привести к выходу из строя этих узлов. Печатную плату необходимо сконструировать так, чтобы она выдерживала тяжелые условия работы [57]. Ударные нагрузки, обладающие большой силой, могут привести к появлениям высоких напряжений изгиба и прогибу выводов компонентов, припаянных к печатной плате.

Критерий высокой циклической усталости может быть использован для анализа видов отказов компонентов на печатных платах и для оценки срока службы систем для обеспечения высокой надежности. Предлагаемый подход основан на использовании возможности программы Creo, которая определяет усталостную долговечность печатной платы с компонентами и без них.

Таблица - 2.4. Добавление ребер для эффективного повышения жесткости печатной платы «кассетной» конструкции

| Добавление ребер для эффективного придания жесткости плате                          |             |  |
|---|-------------|--|
|    | Правильно   | Ребра должны быть расположены так, чтобы они несли нагрузку непосредственно на опору.  |
|   | Неправильно | Если ребра спроектированы неправильно, они не увеличивают жесткость печатной платы.  |
|  | Неправильно | Если невозможно добавить ребра непосредственно к опоре, необходимо добавить дополнительное ребро для переноса нагрузки на опору. |
|  | Правильно   |  |

Усталостная долговечность материалов характеризуется кривой Веллера (рисунок 2.18) - зависимости амплитуд напряжения  $\sigma_a$  от числа циклов нагружения  $N$  до разрушения. Отказ печатных плат, главным образом, происходит по причине разрушения токопроводящих дорожек и паяных соединений [58].

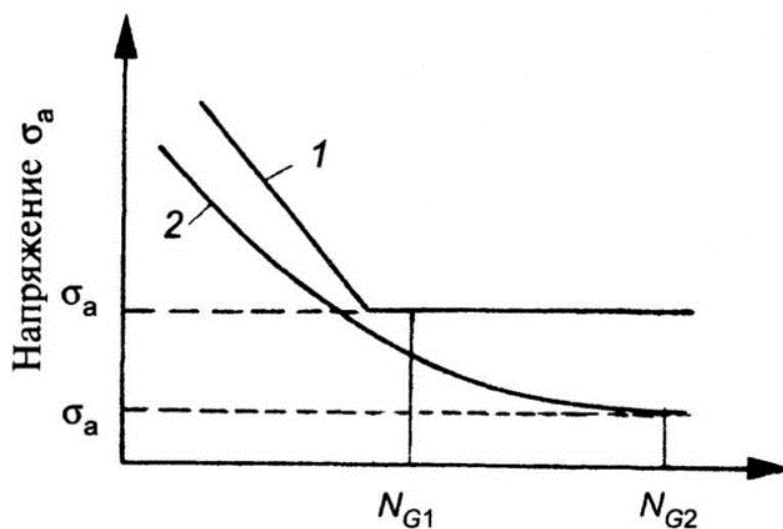


Рисунок 2.18 – Кривая Веллера

В [59] указывается ожидаемый срок службы токопроводящей части МПП, а также даны формулы для определения величины пределов усталости для общего допустимого относительного смещения  $3\sigma$  пластин для случая двадцати миллионов циклов нагрузки. Данный подход предполагает, что из-за изгиба основное повреждение компонентов на МПП обусловлено напряжением, возникающим в проводниках. Однако он не учитывает граничные условия печатных плат. Принято, что параметры вибрации находится в установившемся состоянии, имеющем гауссовское распределение. Классические методы определения усталостных напряжений предполагают использование величины механического напряжения, которая определяет запас прочности.

Распределение Гаусса (рисунок 2.19) позволяет статистически обобщить результаты напряжений. Анализ методом конечных элементов показывает, что напряжения  $1-\sigma$  представляют напряжение, которое устройства, будет испытывать



в 68% случаев. Уровень напряжения 2- $\sigma$  охватывает 95% случаев, а 3- $\sigma$  - 99,7%. В большинстве случаев устройства рассчитаны на уровень напряжений 3- $\sigma$ .

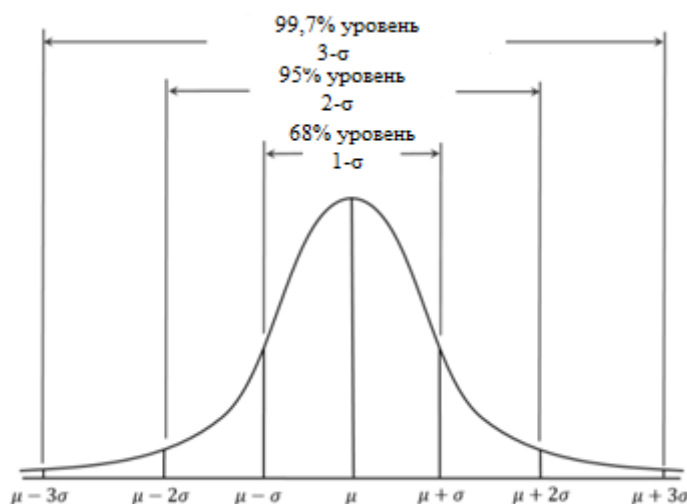


Рисунок 2.19 – Кривая Гаусса распределения напряжения системы

В таблице 2.5 приведены данные о времени моделирования в зависимости от значения нагрузки, что полезно для ускорения расчетов при различных граничных условиях [59].

Таблица 2.5 - Уровни механического напряжения фон Мизеса и время расчета

|  |   |
|--|---|
| Значение напряжения между $-1\sigma_i$ и $1\sigma_i$ | Занимает 68,3% общего времени   |
| Значение напряжения между $-2\sigma_i$ и $2\sigma_i$ | Занимает 95,4% общего времени   |
| Значение напряжения между $-3\sigma_i$ и $3\sigma_i$ | Занимает 99,7% общего времени   |
| Значение напряжения более $3\sigma_i$                | в пределах 0,27% времени, поэтому мы предполагаем, что оно не вызывает никаких повреждений. |

В соответствии с линейной теорией накопленных повреждений повреждение, вызванное  $n_i$  - циклов при условии нагрузки  $\sigma_i$  выражается как:

$$D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_{i-1} + D_i \geq 1 \quad (2.30)$$

Известно, что доля поврежденности при любом уровне амплитуды напряжения цикла  $\sigma_1$  прямо пропорциональна отношению числа циклов его действия к полному числу циклов, т.е.

$$D = \frac{ni}{Ni}. \quad (2.31)$$

Тогда

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{ni}{Ni}, \quad (2.32)$$

где  $D$  – накопленное усталостное повреждение;

$ni$  – количество циклов нагружения при уровне напряжений  $\sigma_i$ ;

$Ni$  – количество циклов нагружения до разрушения рассматриваемого элемента при уровне напряжений  $\sigma_i$  [60].

$$\log N_{\sigma_i} = 57.78 - 6.648 \log \sigma_i. \quad (2.33)$$

При разрушении рассматриваемого элемента суммы  $\sum ni/Ni$  в момент разрушения приблизятся к единице [16]:

$$D = 1$$

Время усталости конструкции при случайной вибрации  $T$ , фактическое количество циклов выражается как:

$$n_{1\sigma} = 0.683 v^{+T}, \quad (2.34, a)$$

$$n_{2\sigma} = 0.271 v^{+T}, \quad (2.34, b)$$

$$n_{3\sigma} = 0.043 v^{+T}, \quad (2.34, c)$$

где  $n_{1\sigma}$ ,  $n_{2\sigma}$ ,  $n_{3\sigma}$  представляют количество циклов при уровне напряжения соответственно;

$\nu^+$  - это средняя статистическая частота напряжения фон Мизеса [60], которая определяется как

$$V^+ = \frac{f_{max} - f_{min}}{2} \quad (2.35)$$

Подставляя (2.34) в (2.32), получаем формулу для расчета общей усталостной долговечности конструкции [61]:

$$D = \frac{1}{T} = 1 / \left( \frac{0.683 * V^+}{N_{1\sigma}} + \frac{0.27 * V^+}{N_{2\sigma}} + \frac{0.043 * V^+}{N_{3\sigma}} \right). \quad (2.36)$$

Приведенный выше расчет относится к конструкции из одного состава материала. Когда конструкция состоит из разных материалов, самое короткое время усталости материала - это срок службы конструкции.

## 2.5. выводы по главы

1. Определены математические модели внешних механических воздействий на МПП, выявлены наиболее негативные факторы, проявляющиеся при действии вибраций, ударов и статических нагрузок.

2. Сформированы структура и состав математического обеспечения, в которое входят математические модели собственных частот МПП блоков «кассетной» конструкции с различными способами закрепления краев, предназначенные для проектирования оптимальной конструкции и исключения явления резонанса.

3. Рассмотрен способ применения ребер для увеличения жесткости МПП блоков «кассетной» конструкции. Получено соотношение для определения собственной частоты платы с учетом размещения ребер. Сформированы рекомендации по размещению ребер.

4. Рассмотрен процесс усталостной долговечности МПП при свободной вибрации. Предложена математическая модель для определения общей усталостной долговечности МПП.

### **Глава 3. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

#### **3.1. Методика выбора вида анализа при проектировании многослойных печатных плат**

Общая структурная схема процесса комплексного анализа механических характеристик МПП в составе радиоэлектронных модулей представлена на рисунке 1.11. На начальном этапе анализа механических характеристик МПП выявляется необходимая точность вычислений. Кроме того, точность тесно связана с временем вычисления, поэтому на начальных этапах полезно проводить анализ с помощью аналитических выражений, которого бывает достаточно для определения работоспособности общей концепции МПП и определения путей дальнейшей оптимизации (рисунок 1.11).

Рассмотрим методику подробнее. Вначале необходимо выполнить постановку задачи с осуществлением процедуры сбора необходимой информации. Сюда входят виды и состав механических воздействий, которые испытывает аппаратура согласно условиям эксплуатации. Полнота сбора данных влияет на результаты проектирования. В таблице 3.1 представлены параметры механических воздействий, действующих на аппаратуру в зависимости от видов [62]. Сюда входят также данные о конструкции печатной платы и всего радиоэлектронного модуля, а также материалах платы, припоя и других комплектующих. Для повышения достоверности моделирования и, соответственно, правильности принятия проектных решений предлагается использовать базу данных прочности и надежности паяных соединений, а также конструктивных элементов платы. Элементная база и конструктивы платы испытываются в соответствии с ГОСТ Р55492-2013 [63] с определением предельных значений по нагрузкам в плане работоспособности. Для ускорения процесса испытания ГОСТ Р55492-2013 предполагает использовать процесс термоциклирования, где количество термоциклов зависит от класса использования аппаратуры. База данных постоянно

пополняется и ее можно использовать при последующих разработках, где используется похожая элементная база, припои и материалы.

Таблица 3.1 – Значения параметров механических воздействий на РЭС

| № | Вид РЭС          | Вибрация    |              | Удар, g | Линейное ускорение, g |
|---|------------------|-------------|--------------|---------|-----------------------|
|   |                  | Частота, Гц | Ускорение, g |         |                       |
| 1 | Автомобильная    | 2-80        | 1-10         | 10      | 6                     |
| 2 | Полустационарная | 2-80        | 1-4          | 20-75   | -                     |
| 3 | Переносная       | 2-80        | 3-6          | 100-200 | 6                     |
| 4 | Самолетная       | 3-2000      | 2-10         | 5-10    | 11                    |
| 5 | Корабельная      | 5-55        | 1,5          | 7-12    | 11                    |
| 6 | Бортовая         | 10-2000     | 15-20        | 50      | 11                    |
| 7 | Атомная          | 10-3000     | 40           | 50      | 11                    |

Инженер конструктор выбирает способ определения механических характеристик МПП и всего модуля в целом. Для выполнения предварительных расчетов или в случае простых конструкций может использоваться аналитический расчет. Он дает достаточно быстрое решение с хорошей точностью. В зависимости от способа закрепления проводится анализ собственных частот конструкции, расчет максимальных механических напряжений, деформаций и времени усталостной долговечности.

В более сложных конструкциях используется инженерный анализ методом конечных элементов. В ходе анализа строится сетка и проводится структурный анализ, включающий в себя модальный, статический, усталости материалов и др. Вибрационный анализ содержит динамический временной, ударный, частотный, случайных воздействий и др. [64].

Для обеспечения обмена данными на разных этапах моделирования предлагается использовать программу электронного документооборота

(приложение В) . Она позволяет структурировать как исходные данные, так и результаты предварительных расчетов и моделирования. Такой подход дает возможность значительно ускорить процесс проектирования и уменьшить количество доработок и ошибок.

После моделирования проводится анализ результатов и принимается решение о путях доработки конструкции или окончательной подготовки конструкторской документации.

На рисунке 3.1 представлен алгоритм выбора способа решения при анализе механических характеристик многослойных печатных плат.

Сбор необходимой информации (блок 2) включает в себя данные о самом радиоэлектронном модуле, его размерах, элементной базе, материалах и их характеристиках, а также определение наиболее уязвимых мест с точки зрения конструкции. Необходимо иметь данные о вибрационных и ударных характеристиках радиокомпонентов и других приборов.

Блок 3 представляет собой выбор предварительного анализа характеристик печатной платы, аналитический или предварительный анализ методом конечных элементов. Выбор сводится к возможности применить математические модели, описывающие наиболее используемые способы крепления, такие как жесткое защемление, свободное опирание незакрепленного края пластины или конца балки. В случае невозможности применения таких моделей предварительный анализ, как и подробный, сводится к использованию программных инструментов, основанных на методах конечных элементов.

Аналитическое решение (блок 4) поставленной задачи сводится к определению собственных частот колебаний печатной платы с установленными компонентами (СЧК), максимальных отклонений от положения равновесия, величины напряжений в узлах конструкции печатной платы, а также расчету времени усталостной долговечности.

После проведения аналитического анализа механических характеристик конструктор должен решить, достаточно ли полученных данных для последующих действий.

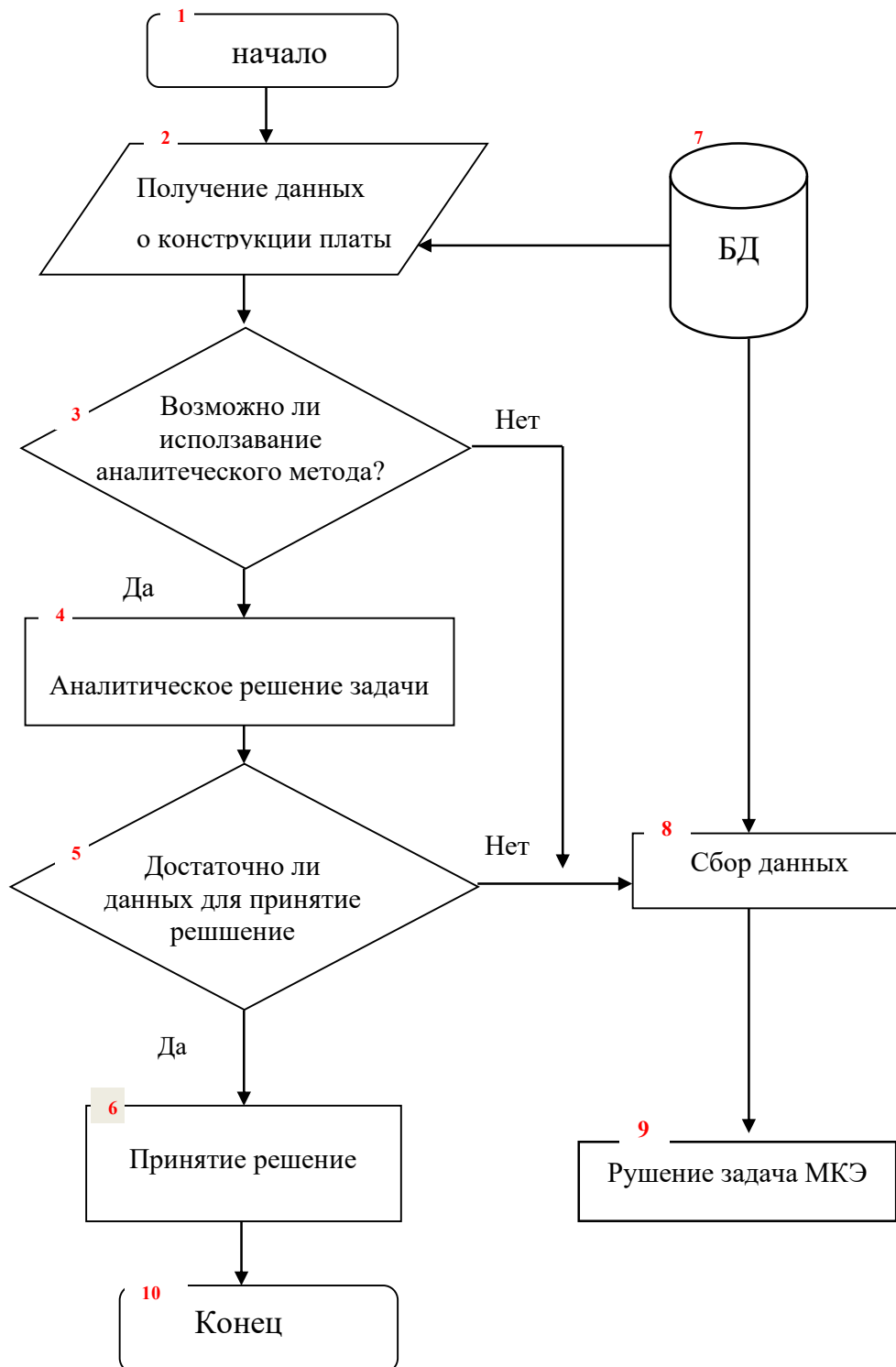


Рисунок 3.1– Структурная схема выбора методов анализа

В случае, когда данных недостаточно или когда особенности конструкции изделия не позволяют применить аналитические методы анализа, применяются современные инструменты инженерного анализа на основе МКЭ или МКР (блоки 8 и 9).

База данных (блок 7) включает в себя механические и тепловые свойства материалов конструкций печатных плат, а также элементной базы, физико-химические свойства материалов, участвующих в производственно-технологическом процессе, графическое представление, связывающее количество циклов нагрузки до разрушения с приложенным напряжением пластической деформации как при пластическом, так и при упругом поведении материала.

### 3.2. Алгоритм проектирования многослойных печатных плат с учетом предварительного размещения компонентов

При традиционном подходе к процессу проектирования инженеры на разных этапах проявляют низкий коэффициент взаимодействия. Часто после проектирования печатной платы с трудоемким процессом трассировки приходится дорабатывать конструкцию с учетом механических, тепловых или электромагнитных критериев. При этом итерационный процесс доработки требует много времени и достаточно затратен финансово.

При использовании процесса моделирования предлагается предварительно до трассировки платы размещать компоненты и выявлять наиболее опасные участки с точки действия механических нагрузок. В этом случае можно попытаться переразместить компоненты или увеличить жесткость конструкции платы введением дополнительных точек крепления или ребер. Такой подход позволяет сократить время на исправление трассировки платы, как наиболее трудоемкого и дорогостоящего процесса.

Предлагаемый подход можно представить в виде алгоритма, изображенного на рисунке 3.2.



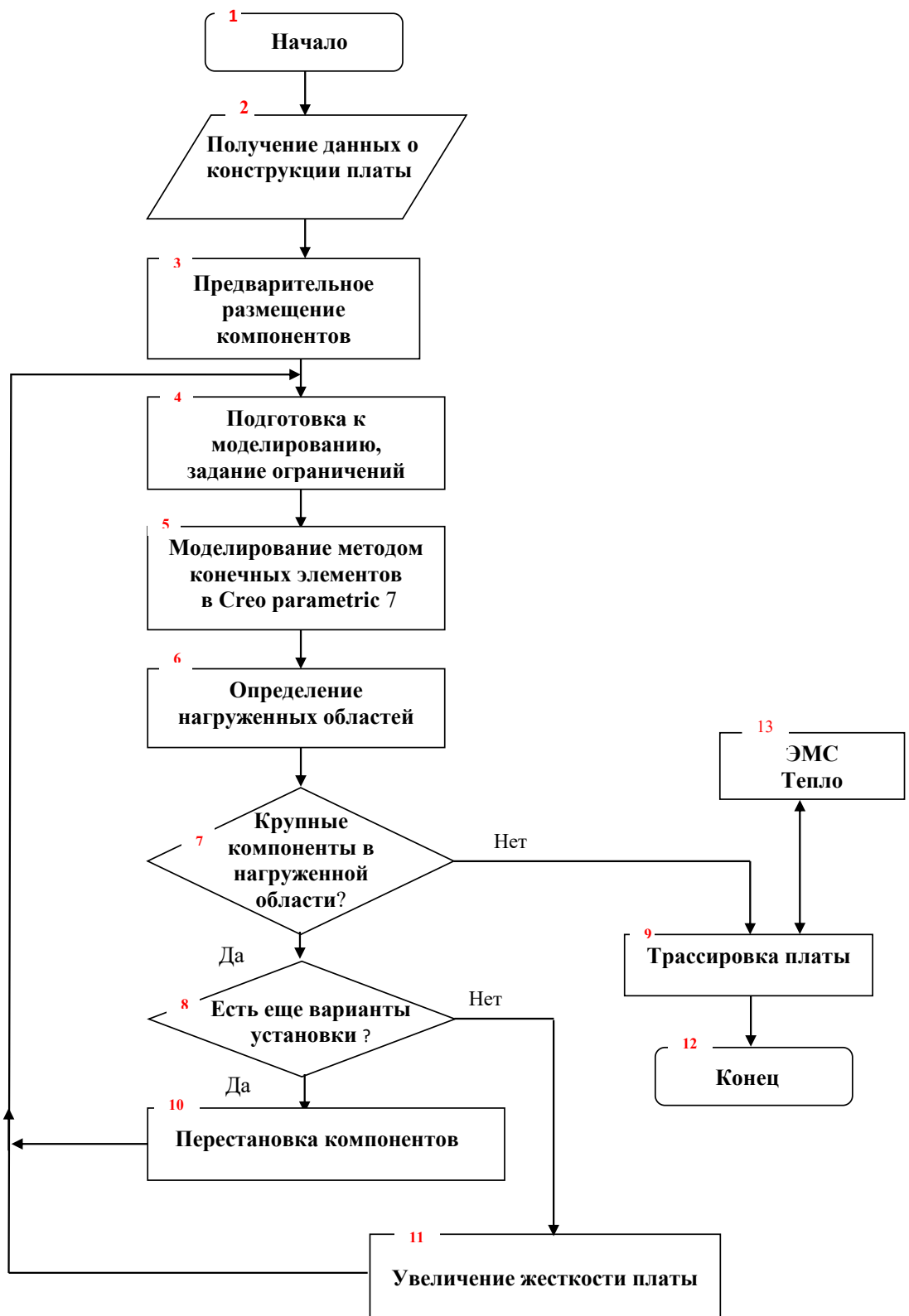


Рисунок 3.2 – Алгоритм проектирования МПП с учетом предварительного размещения

При моделировании необходимо создать геометрическую модель платы, часто требуется также адекватно упростить модель платы и компонентов для ускорения расчетов, а также выбрать подходящий размер конечного элемента для генерации сетки. Меньшая сетка может применяться к некоторым поверхностям, что повышает точность расчета, хотя и удлиняет процесс решения. После установки геометрической модели определяются граничные условия для платы (закрепление и нагрузка) [65]. В алгоритме этим операциям соответствует блок 2, рисунка 3.3. Он включает в себя также данные о компонентах и конструкции платы (вид корпуса, тип монтажа, масса), схеме электрических соединений этих компонентов, контуре платы с отверстиями для фиксации платы на несущем основании.

Необходимы сведения о вибрациях, ударах и статических нагрузках, которым будет подвергаться плата в процессе эксплуатации.

Затем нужно предварительно разместить компоненты на печатной плате исходя из конструктивных и функциональных ограничений (блок 3, рисунок 3.3). После необходимо подготовить плату к моделированию методом конечных элементов (блок 4, рисунок 3.3). Этот процесс заключается в задании граничных условий, задании нагрузок и материала. В нашем исследовании было протестировано тринадцать наиболее типичных способов закрепления платы.

Вместо геометрии электронных компонентов в тех местах, где они предварительно размещены, на этом этапе может использоваться инструмент «сосредоточенная масса», равная массе компонента. Сосредоточенные массы можно ставить как на отдельный крупный компонент, так и на массив компонентов, представляющий собой, например, ряд микросхем. Такой подход позволяет выполнить также быстрые предварительные расчеты без необходимости создания 3D-моделей компонентов.

На следующем этапе (блок 5, рисунок 3.3) происходит моделирование механических характеристик платы с определением собственных частот, а также

наиболее нагруженных участков, куда крупные микросхемы, типа BGA, QFP, QFN, PLCC и др. устанавливаются нежелательно (блоки 7, 8, рисунок 3.3).

Если компоненты, наиболее подверженные разрушению, располагаются в нагруженных областях и есть другие варианты размещения (блоки 6, рисунок 3.3), то происходит попытка переразместить компоненты и заново идет процесс моделирования. Этот итерационный процесс происходит до тех пор, пока не будут перебраны все возможные варианты размещения или не будет достигнут приемлемый результат. В случае невозможности оптимально разместить компоненты необходимо увеличить жесткость платы (блок 11, рисунок 3.3).

Этот вариант менее желателен, чем предыдущий, так как требует вмешательства в конструкцию платы. Пути повышения жесткости следующие: увеличение точек крепления платы, изменение толщины, выбор другого материала и применение ребер жесткости. После этого опять выполняется моделирование, пока не будет достигнут вариант, удовлетворяющий всем требованиям [66].

Заключительным этапом при проектировании платы является ее трассировка с получением рисунка по каждому слою.

Указанный подход к проектированию многослойных печатных плат позволяет значительно ускорить процесс создания устройств, испытывающих механические воздействия в процессе эксплуатации, так как при традиционном подходе все недостатки и промахи в проектировании выясняются на этапах испытаний. В результате приходится процесс проектирования повторять заново, в том числе и этап трассировки печатной платы, который требует значительного времени.

### 3.3. Алгоритм увеличения жесткости конструкции многослойной печатной платы

Конструкции платы часто представляет собой компромисс между различными противоречивыми требованиями. В связи с этим проектирование платы является сложной задачей. Для ускорения процесса проектирования и

получения оптимальной конструкции используется метод конечных элементов (МКЭ) [67].

Существует несколько путей повышения жесткости платы, направленные на увеличение собственных частот и уменьшения внутренних напряжений при статических нагрузках. На рисунке 3.3 показан алгоритм методики увеличения жесткости многослойных печатных плат. Вначале (блок 1) традиционно происходит получение данных о конструкции платы, ее характеристиках, способах закрепления. Затем (блок 3) задается наилучшее расположение компонентов, определенное на предыдущих этапах.

Вначале в блоке 4 предлагается изменить схему закрепления платы, исходя из наиболее нагруженных областей с учетом ранее размещенных компонентов. Затем происходит моделирование и выяснение, находятся ли компоненты, наиболее критичные к механическим напряжениям, в нагруженной области (блок 5). Если крупные компоненты находятся вне опасных зон, то оптимальный вариант найден, если нужна доработка и есть еще варианты изменения точек закрепления (блок 6), то проверяются эти варианты путем моделирования. Это происходит до тех пор, пока не будет найден приемлемый вариант или будут исчерпаны все возможности.

Следующий путь для увеличения жесткости платы, более дорогостоящий, это применение ребер жесткости. В блоке 7 предлагается вариант размещения ребер и моделирования. Затем в блоках 8 и 9 проверяется нахождение компонентов в нагруженных областях и наличие вариантов размещения ребер. На этом этапе также могут быть найдены приемлемые или исчерпаны все возможные варианты.

Также может быть изменена толщина материала или применен материал с другими физико-химическими свойствами. Данный путь наиболее желателен, так как может привести к значительному увеличению массы или дополнительным исследованиям для выявления пригодности материала в целях использования в данной аппаратуре. В блоках 10-12 происходит моделирование и выяснение оптимальности принятого решения.

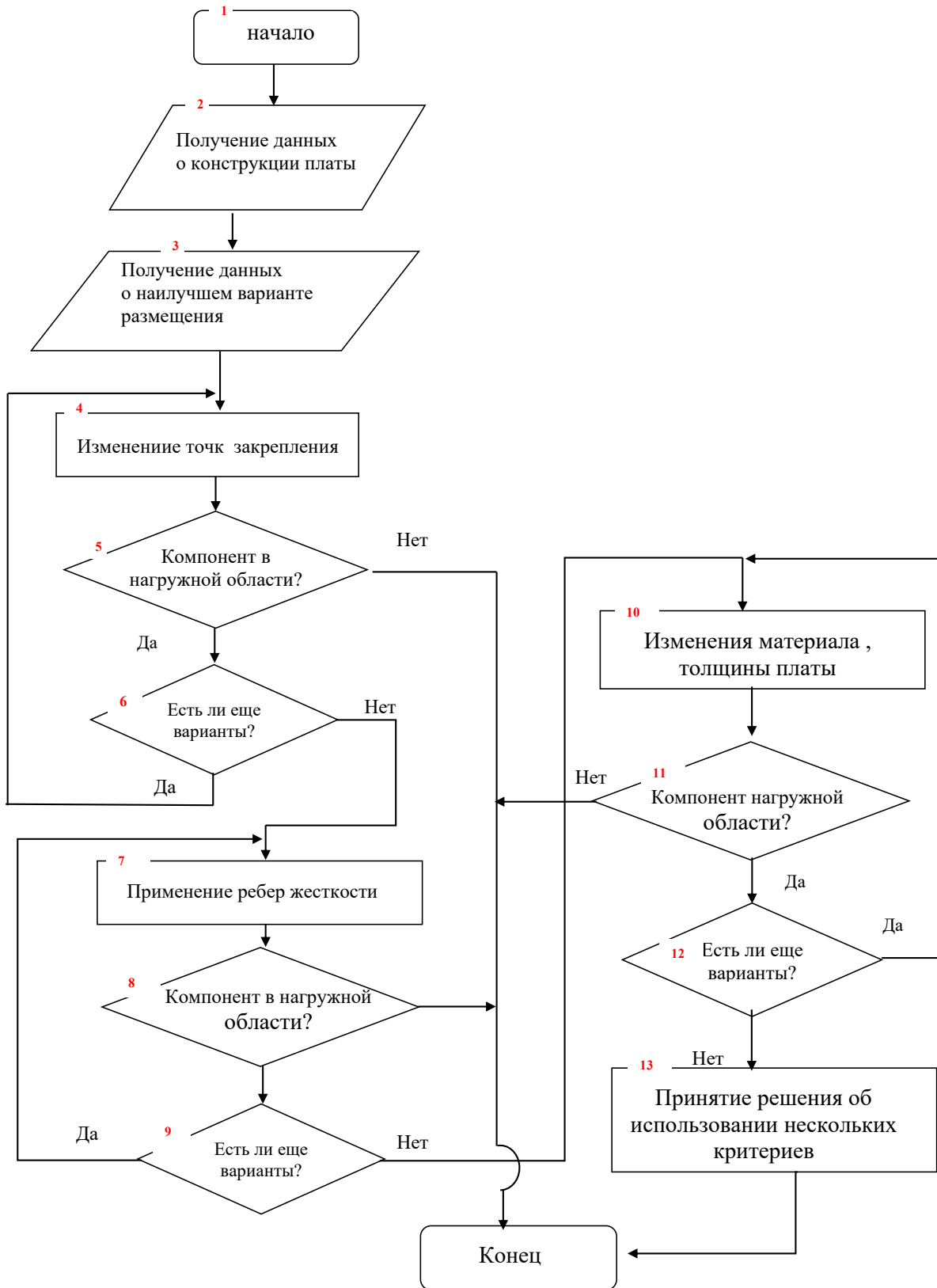


Рисунок 3.3 – Алгоритм методики увеличения жесткости МПП

Если удастся найти вариант, где получается снизить нагрузку на компоненты, то переходят на следующий этап проектирования, если исчерпаны все варианты может быть принято решение об использовании нескольких критериев и поиске наиболее оптимального варианта решения (блок 13).

### 3.4. Алгоритм оценки усталостного ресурса печатной платы при различных граничных условиях

Печатные платы испытывают различные тепловые и механические нагрузки в процессе производства и срока их службы, включая циклический изгиб, падение, вибрацию и т.д. [68].

Повторение этих нагрузок в течение срока службы изделия может способствовать появлению трещин в печатной плате и паяных соединениях, что в конечном итоге может привести к отказам этих блоков. Таким образом, печатная плата должна быть сконструирована так, чтобы выдерживать работу в суровых эксплуатационных условиях [69]. Сильные ударные нагрузки могут привести к высоким механическим напряжениям изгиба и прогибу выводов компонентов, припаянных к печатной плате. Критерий высокой циклической усталости может быть применен для анализа режимов отказов компонентов на печатных платах и оценки ресурса устройств с высокой надежностью.

Алгоритм оценки усталостного ресурса печатной платы при различных граничных условиях представлен на рисунке 3.4. На начальном этапе (блок 2) происходит получение данных о конструкции платы, материалах и оптимизированного варианта размещения компонентов, определенных на предыдущих этапах. В соответствии с этим задаются ограничения (блок 3). Затем происходит моделирование методом конечных элементов с получением величин механических напряжений в различных элементах конструкции платы (блок 5).

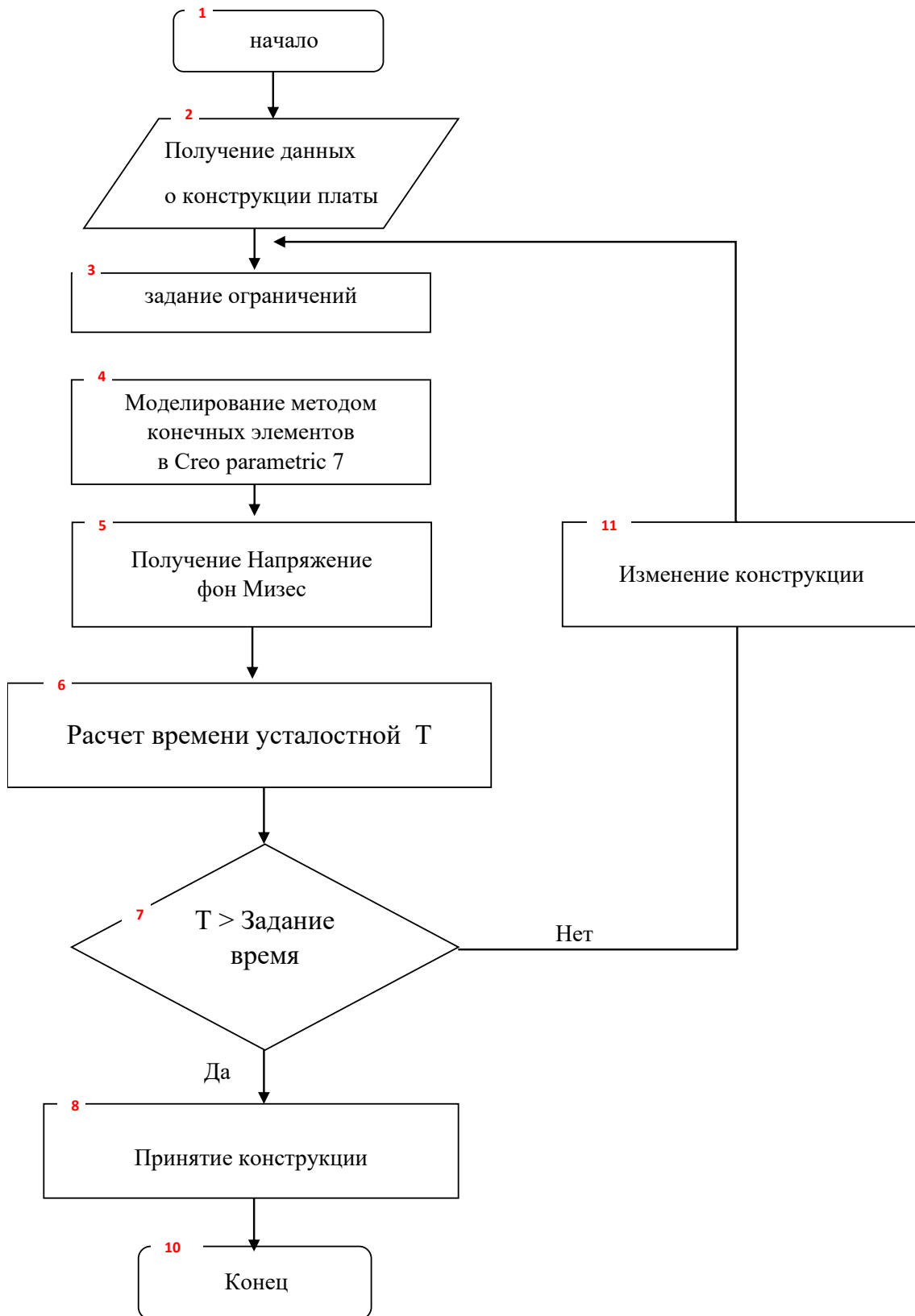


Рисунок 3.4 - Алгоритм оценки усталостного ресурса печатной платы

На следующем шаге рассчитывается время усталостной долговечности МПП с компонентами по соотношению (2.31). Если это время оказывается больше времени срока службы изделия, указанного в техническом задании на разработку, то происходит принятие подобранного варианта конструкции (блок 8). Если время усталостной долговечности слишком малое для обеспечения надежной работы, то происходит изменение конструкции (блок 11) для уменьшения величины максимального механического напряжения в отдельных элементах платы. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет получен приемлемый вариант [70].

### 3.5. Алгоритм проектирования многослойных печатных плат блоков «кассетной» конструкции

Особенностью «кассетной» конструкции является закрепление платы по периметру с невозможностью закрепления центральных областей. Ранее в данном исследовании показано, что наименее предпочтительным является вариант размещения крупных компонентов на плате с точками, имеющими координаты внутри зоны с соотношением  $a/4$  и  $b/4$ , где  $a$  и  $b$  длина и ширина печатной платы. На рисунке 3.5 представлена конструкция платы с обозначением образуемых зон.

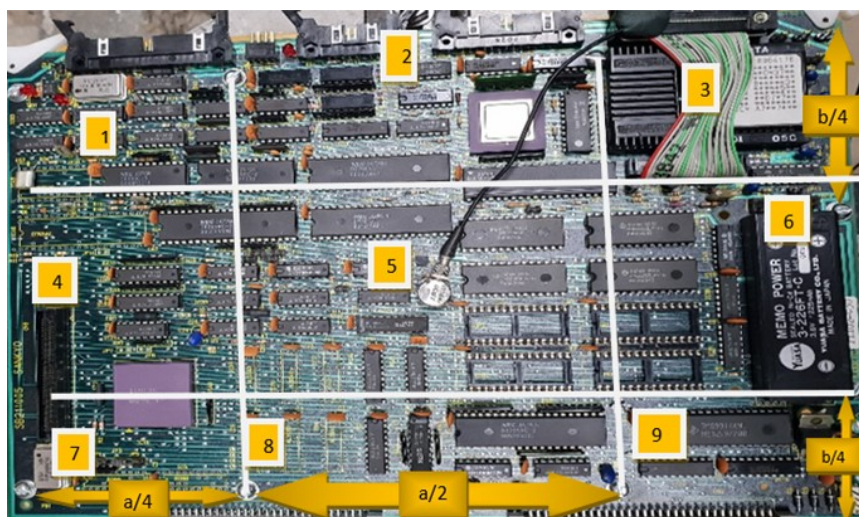


Рисунок 3.5 – Печатная плата, разделенная на девять областей с соотношением  $a/4$  и  $b/4$



Наиболее подверженной влиянию максимальных прогибов и напряжений в паяных контактах является область 5 (рисунок 3.5). Наиболее закрепленными являются области 1,3,7,9. Области 2,4,6,8 по степени нагруженности лежат между перечисленными.

Также рекомендуется избегать размещения электронных компонентов вблизи краев и точек крепления ввиду того, что они наиболее уязвимы к нагрузкам, так как возле точек крепления наблюдаются значительные механические напряжения. Алгоритм методики проектирования МПП кассетной конструкции представлен на рисунке 3.6. Вначале получают данные о конструкции МПП «кассетной» конструкции, материалах, компонентах и сведения об основных конструктивных элементах (блок 2).

Инженерами предлагается также предварительный вариант размещения компонентов на плате (блок 3). Если выясняется, что крупные компоненты находятся в нежелательных областях, то происходит корректировка их размещения. Если крупных компонентов нет в опасных областях, происходит задание ограничений в соответствии с «кассетной» конструкцией, моделирование методом конечных элементов, определение нагруженных областей и проверка нахождения в них компонентов с корпусами BGA, QFP, QFN, PLCC (блоки 5-8). Затем происходит либо принятие конструкции и трассировка платы или нахождение приемлемого варианта размещения, а в случае невозможности - увеличение жесткости конструкции ребрами или иным способом (блоки 10,11).

Предлагаемая методика позволяет ускорить процесс проектирования МПП «кассетной» конструкции, так как помогает найти оптимальное место размещения компонентов на плате. Особенностью такой конструкции является невозможность размещения точек крепления платы в центральных областях, наиболее подверженных механическим напряжениям.

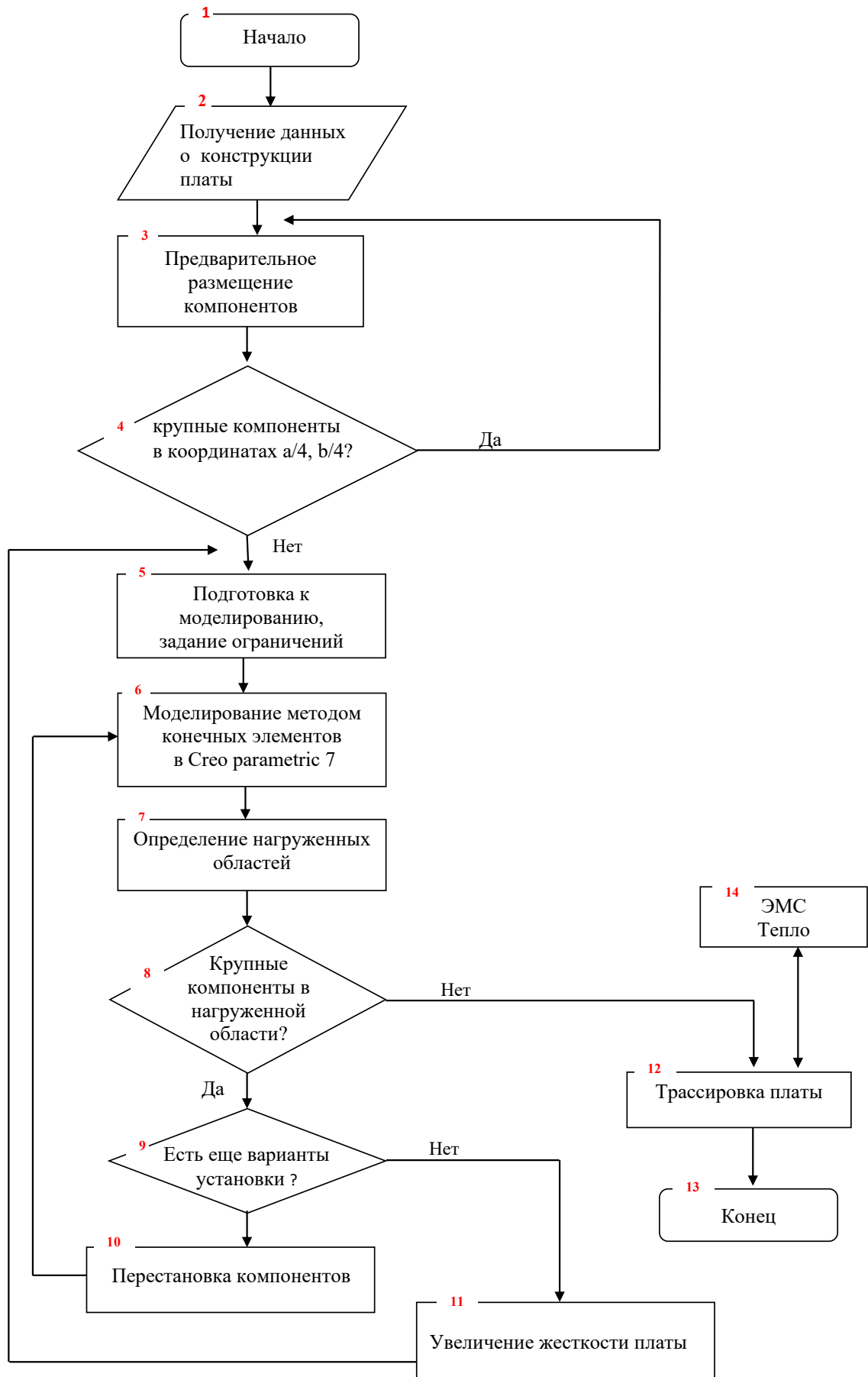


Рисунок 3.6 - Алгоритм методики проектирования МПП кассетной конструкции

### 3.6. Выводы по главе

1. Предложена комплексная методика создания радиоэлектронных модулей на основе МПП, охватывающая этапы от топологического проектирования до испытаний, позволяющая сократить временные затраты на проектирование, отличающаяся использованием структуры обмена проектными данными. Методика включает базу данных прочности и надежности паяных соединений, позволяющую оценить надежность конструкции МПП.

2. Предложена методика выбора методов анализа механических характеристик МПП, основанная на рассмотренных аналитических выражениях. Предложены рекомендации по выбору методов математического анализа механических характеристик МПП.

3. Предложена методика проектирования радиоэлектронных модулей на основе МПП, основанная на предварительном моделировании вибрационных свойств, выявлении наиболее опасных мест для микросхем с корпусами большой площади с учетом предварительного размещения компонентов.

3. Предложена методика определения оптимальной конструкции МПП с разными способами закрепления и определения оптимальных точек крепления, а также возможностью применения ребер для увеличения жесткости.

4. Предложена методика оценки усталостной долговечности конструкции МПП, основанная на процессе анализа механических напряжений, выявленных в результате моделирования.

5. Разработана методика топологического проектирования МПП, в том числе «кассетной» конструкции, основанная на предварительном размещении компонентов и моделировании механических характеристик до этапа трассировки, выявлении наиболее опасных мест для компонентов с корпусами большой площади, отличающаяся определением оптимальных схем крепления и координат точек крепления, а также возможностью применения ребер для увеличения жесткости.

## Глава 4. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

### 4.1. Экспериментальная проверка точности моделирования механических характеристик многослойных печатных плат

Для проверки точности моделирования механических характеристик печатных плат в CREO использовалась экспериментальная установка (вибростенд). Схематичное изображение основных элементов стенда представлено на рисунке 4.1. Печатная плата устанавливается на предметный стол вибровозбудителя и фиксируется в нескольких местах. Акселерометр устанавливался в нескольких местах: в центре платы и на краях. Второй акселерометр установлен на самом вибровозбудителе [71].

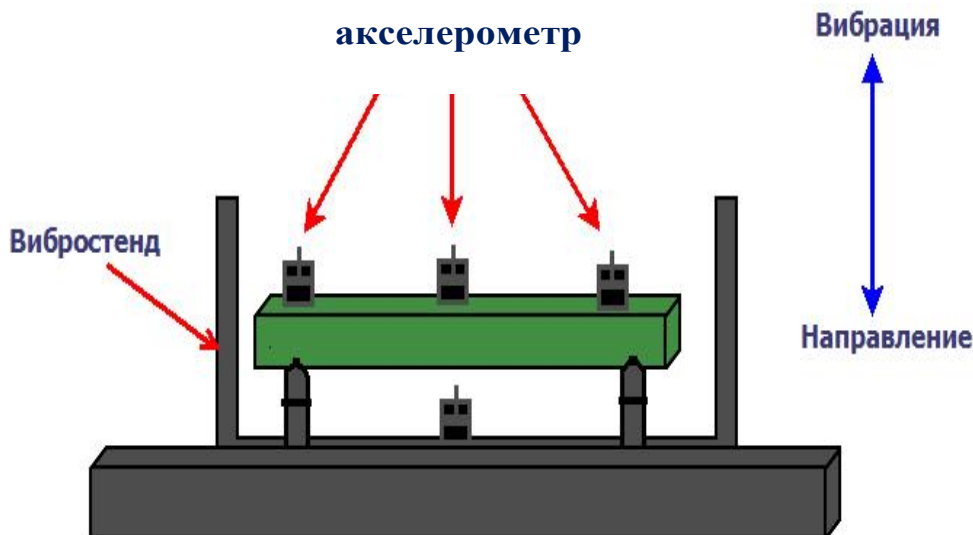


Рисунок 4.1 – Схема вибростенда

В качестве платы использовалась ячейка преобразования сигнала технологической установки (рисунок 4.2). Материал платы - стеклотекстолит. Плата имеет следующие характеристики:

- материал основания - стеклотекстолит фольгированный (аналог – FR4), толщиной  $h_0=2,1$  мм,
- толщина медного слоя  $h_1=0,035$ мм,
- габаритные размеры составляют 305 мм×220 мм,
- тип печатной платы – многослойная,
- масса платы с компонентами составляет  $m = 625$  г.
- - модуль Юнга - 18.14 ГПа.
- плотность - 1850 кг/м<sup>3</sup>.
- коэффициент Пуассона 0,12.

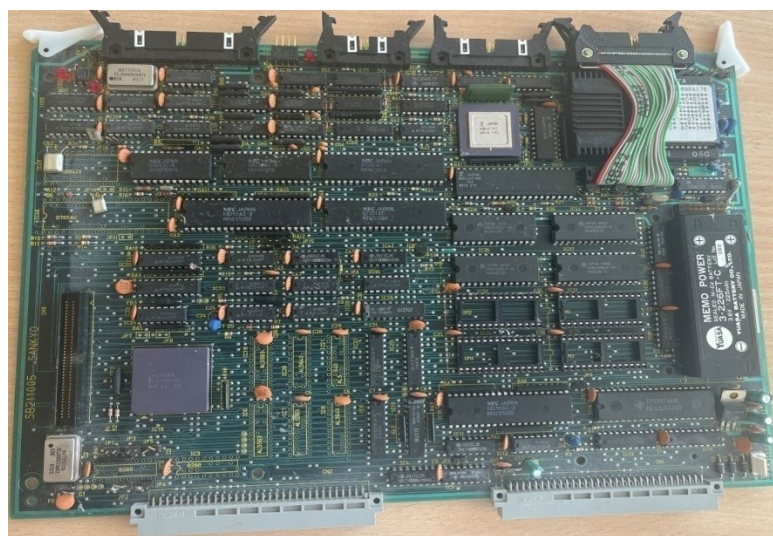


Рисунок 4.2 – Ячейка преобразования сигнала

Испытание на вибрацию проводилось путем монтажа печатной платы с помощью винтов в восьми местах на вибрационном столе. Печатная плата, установленная на вибрационном стенде, показана на рисунке 4.3. Вибростенд включает в себя кроме электродинамического виброгенератора (шейкера) [72] также систему управления и систему сбора и отображения данных.

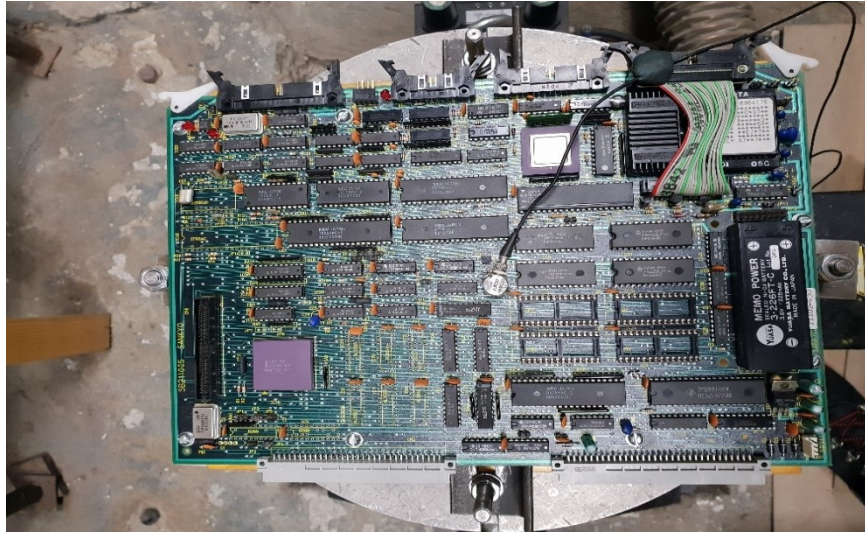


Рисунок 4.3 – Плата, установленная на вибрационном стенде

Разделение печатной платы на девять частей с предложенным соотношением, которое зависит от размеров платы (длина и ширина), показано на рисунке 4.4. Такая конструкция плат характерна для «кассетной» компоновки.



Рисунок 4.4 – Модель печатной платы, которая разделена на девять областей

Координаты выбранных областей показаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Координаты выбранных участков разделения МПП

| N области | Координаты выбранных областей   |
|-----------|---|
| 1         | Угловая область между точками $(-a/4, b/4)$ и верхним краем.  |
| 2         | Граница площади с координатами $[(-a/4, b/4), (a/4, b/4)]$ верхней границы длинной стороны          |
| 3         | Угловая область между точками $(a/4, b/4)$ и верхним краем  |
| 4         | Границы площади с координатами $[(-a/4, b/4), (-a/4, -b/4)]$ левой границей короткой стороны        |
| 5         | Центральная область с координатами $[(-a/4, b/4), (a/4, b/4)], (0, 0), [(a/4, -b/4), (-a/4, -b/4)]$ |
| 6         | Границы площади с координатами $[(-a/4, b/4), (a/4, -b/4)]$ и правой границей короткой стороны      |
| 7         | Угловая область между точкой $(-a/4, -b/4)$ и нижним краем  |
| 8         | Граница площади с координатами $[(-a/4, -b/4), (a/4, -b/4)]$ нижней границы длинной стороны         |
| 9         | Угловая область между точкой $(a/4, -b/4)$ и нижним краем   |

Печатная плата зафиксирована по восьми точкам, как показано на рисунке 4.5

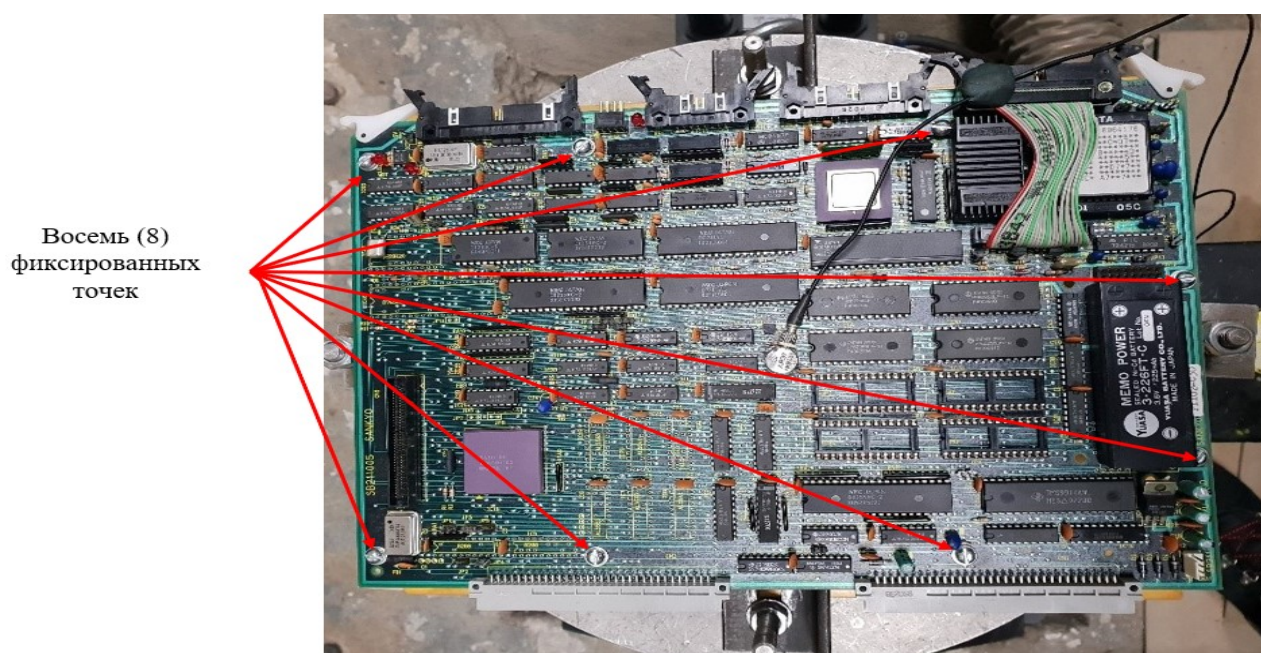


Рисунок 4.5 – Точки фиксации печатной платы на вибрационном стенде

На рисунке 4.6 показано условное разделение печатной платы на девять областей с координатами, представленными в таблице 4.1.

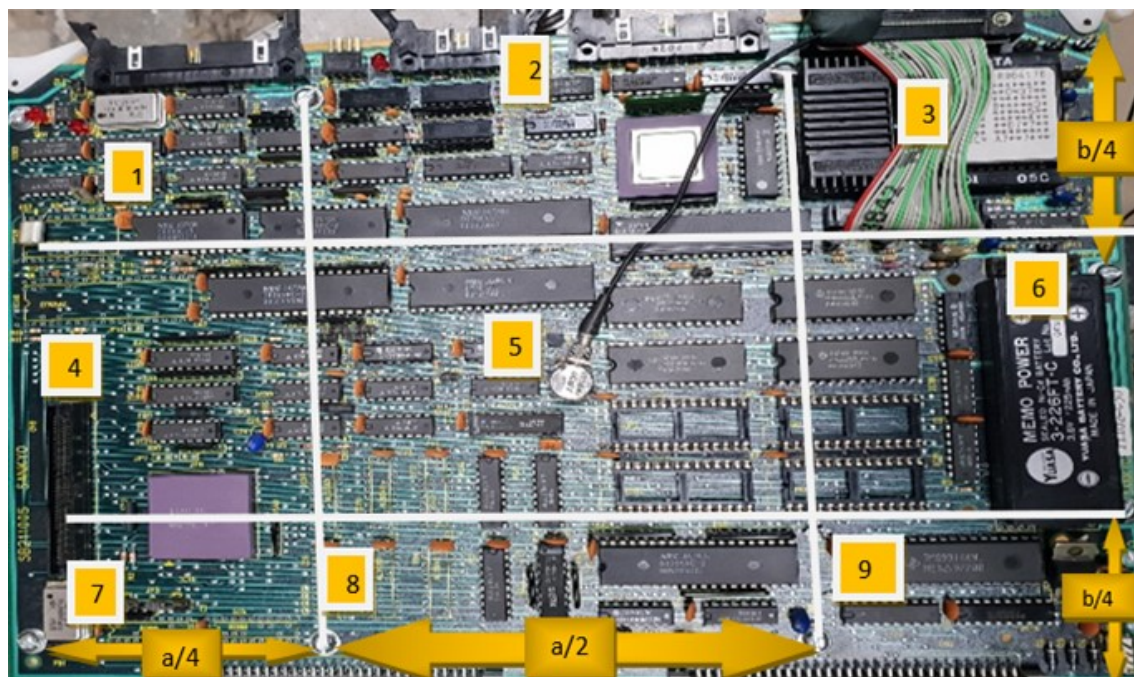


Рисунок 4.6 – Печатные платы, которые делятся на девять областей

На стенд подавалось вибрационное воздействие синусоидальной формы ускорением в 2g. Второй датчик ускорения фиксировал изменения  $g$  в пределе от 2 до 70 g. Акселерометр на плату устанавливался в центре (область 5), а также с краев в областях 4, 7 и 8 (рисунок 4.6). Числовые экспериментальные данные содержатся в приложении Б. Результат исследования в графическом виде проиллюстрирован на рисунках 4.7-4.10. Он представляет собой спектр частот исследуемой платы.



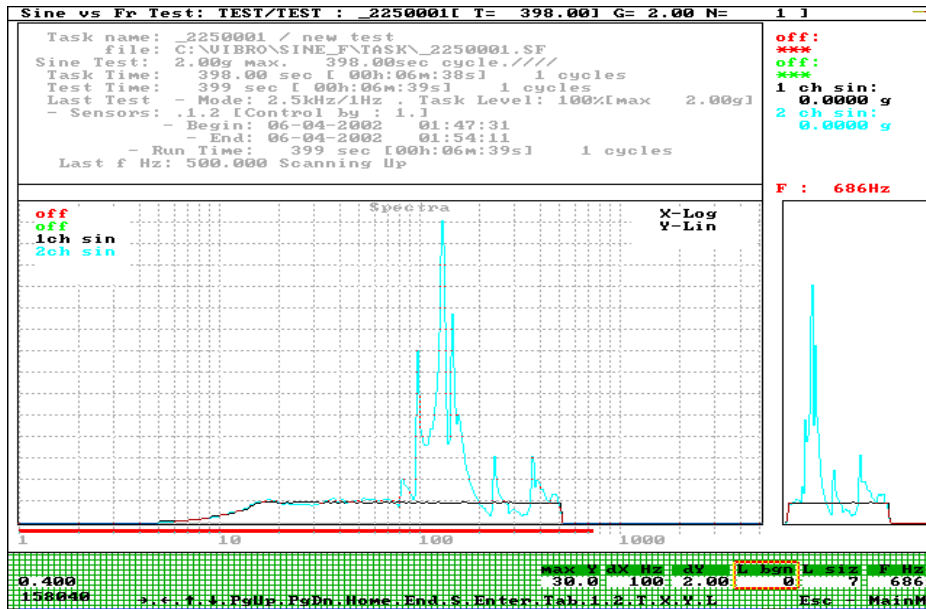


Рисунок 4.7 – Экспериментальная частотная характеристика МПП (акселерометр в центре платы, область 5)

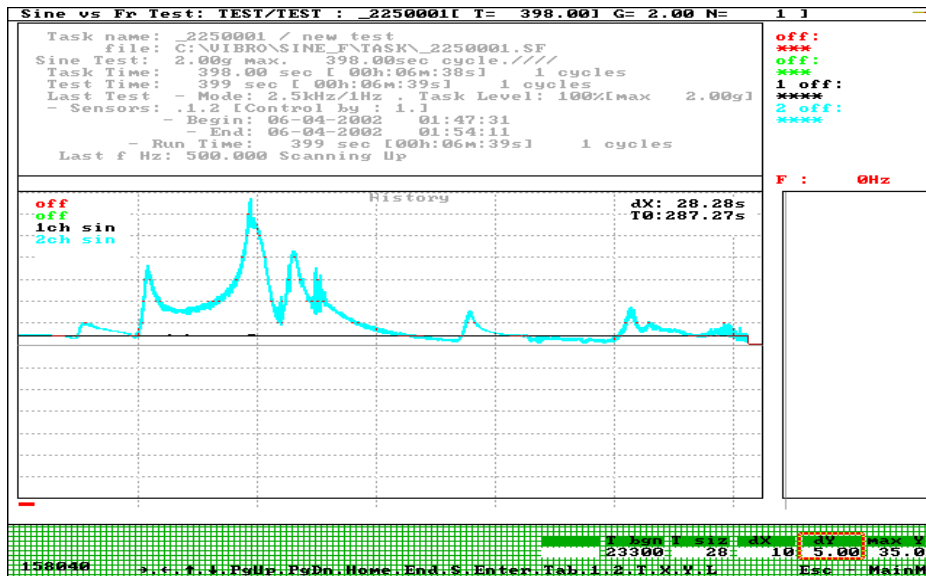


Рисунок 4.8 – Экспериментальная частотная МПП (акселерометр на краю платы, область 7)

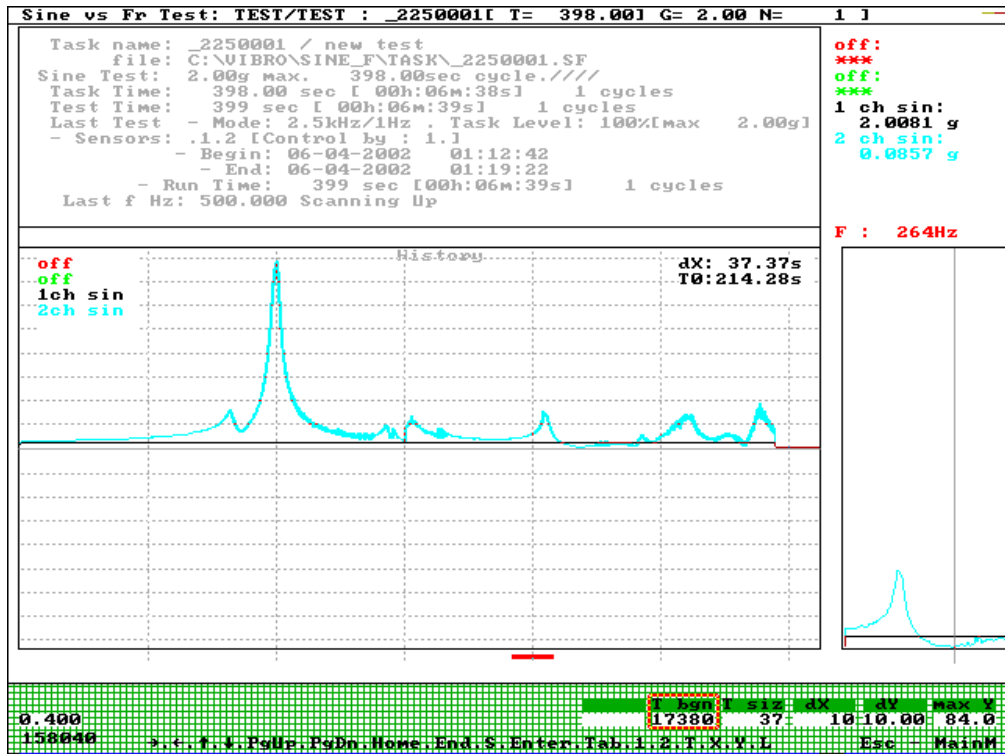


Рисунок 4.9 – Экспериментальная частотная МПП  
 (акселерометр на краю платы, область 8)

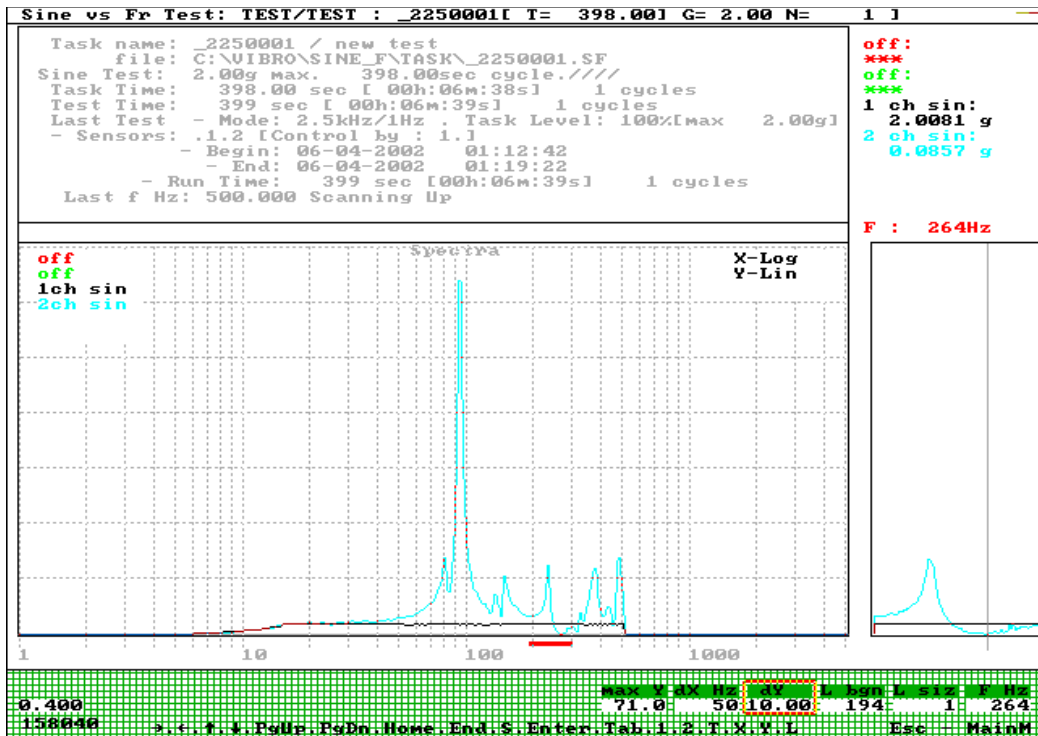


Рисунок 4.10 – Экспериментальная частотная МПП  
 (акселерометр на краю платы, область 4)

На данных рисунках ось X имеет логарифмическое отображение, ось Y - линейное значение. Для большего удобства была построена спектральная характеристика платы, где ось X задана в единицах частоты (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Построенная частотная характеристика МПП

Для ускорения процесса моделирования механических свойств многослойных печатных платы в среде Sgeo имеется такой инструмент, как «сосредоточенная масса» [6]. Вместо реальной геометрии компонента можно поставить точечный эквивалент с массой, равной массе компонента. Конечно, это определенное упрощение, однако оно серьезно ускоряет процесс моделирования.

На рисунке 4.12 показана модель печатной платы, закрепленная в точках, соответствующих таблице 4.1, координаты такие же, как при фиксации на вибрационном стенде.

Анализ модального режима МПП проводился для определения первых трех основных собственных частот. Вычисленные первые три собственные частоты составляют 77 Гц, 104 Гц и 136 Гц. Формы режимов, соответствующие этим частотам, приведены на рисунках 4.13-4.15.

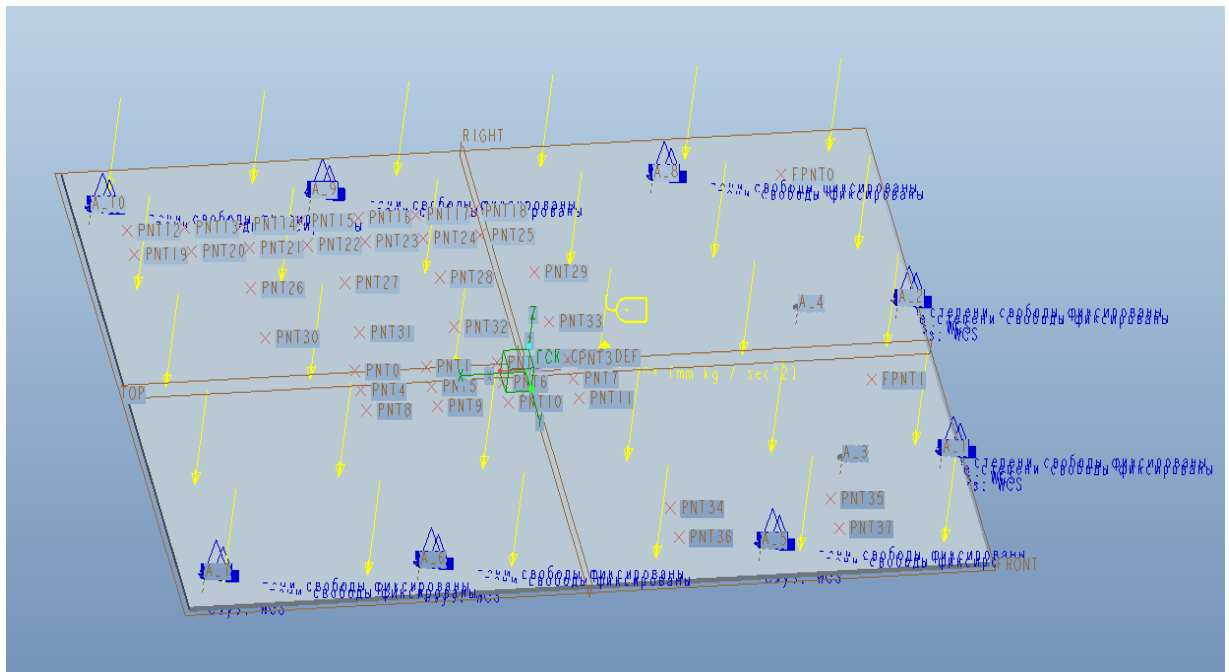


Рисунок 4.12 – Модель для пустой ПП

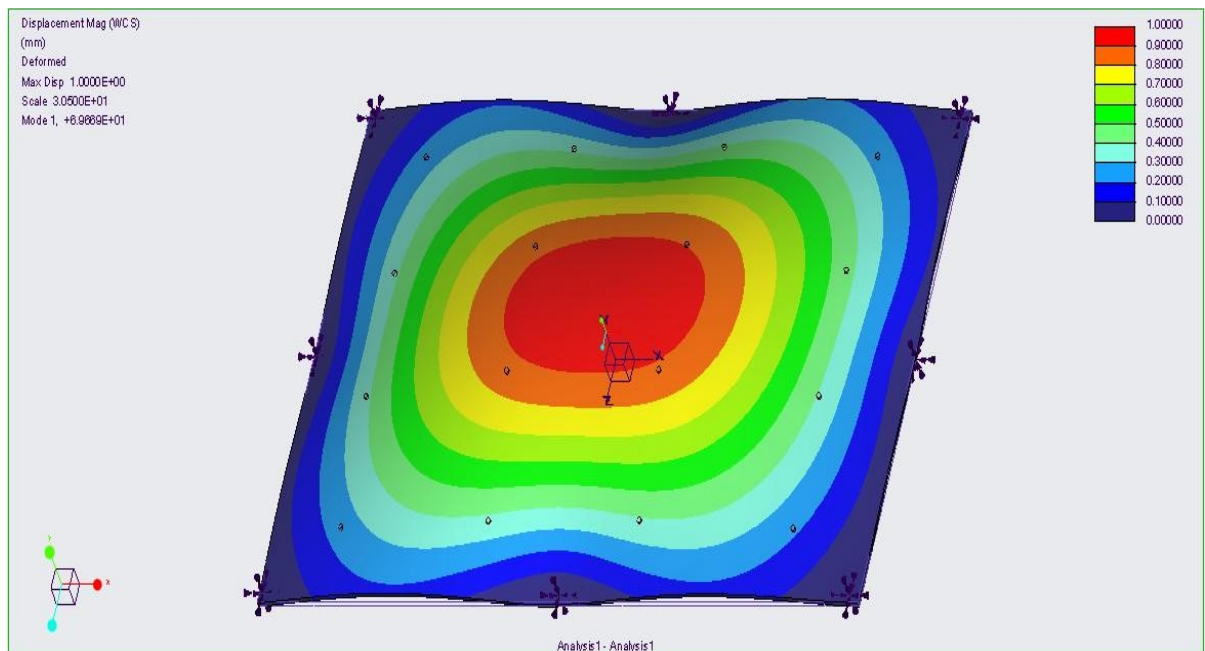


Рисунок 4.13 – Первая собственная частота ПП

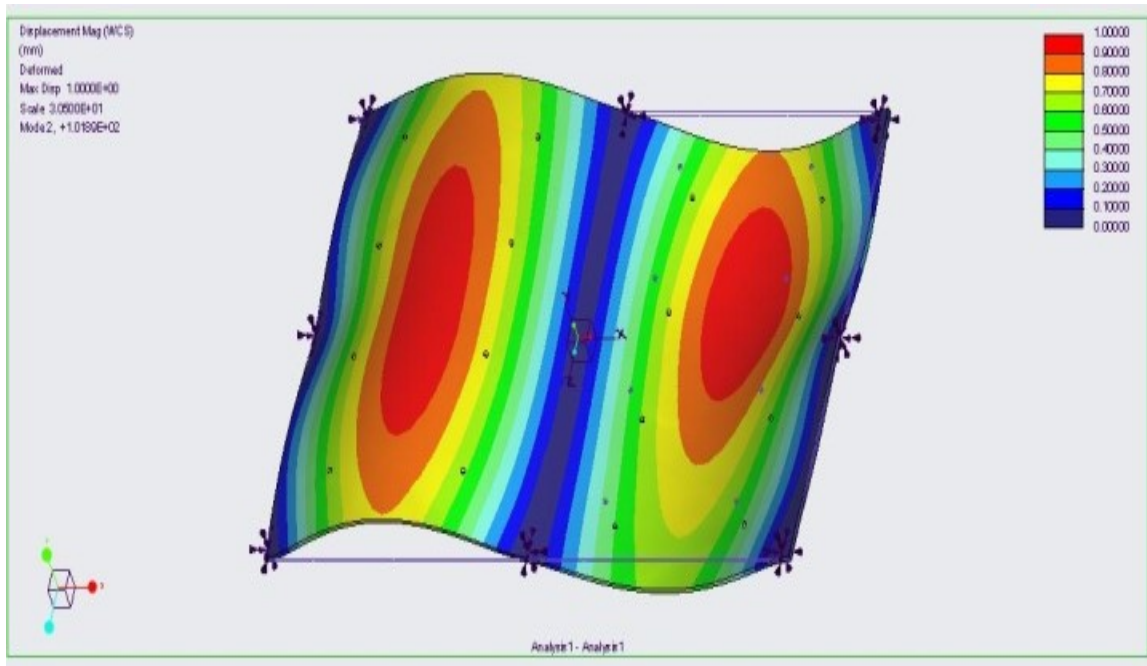


Рисунок 4.14 – Вторая собственная частота ПП

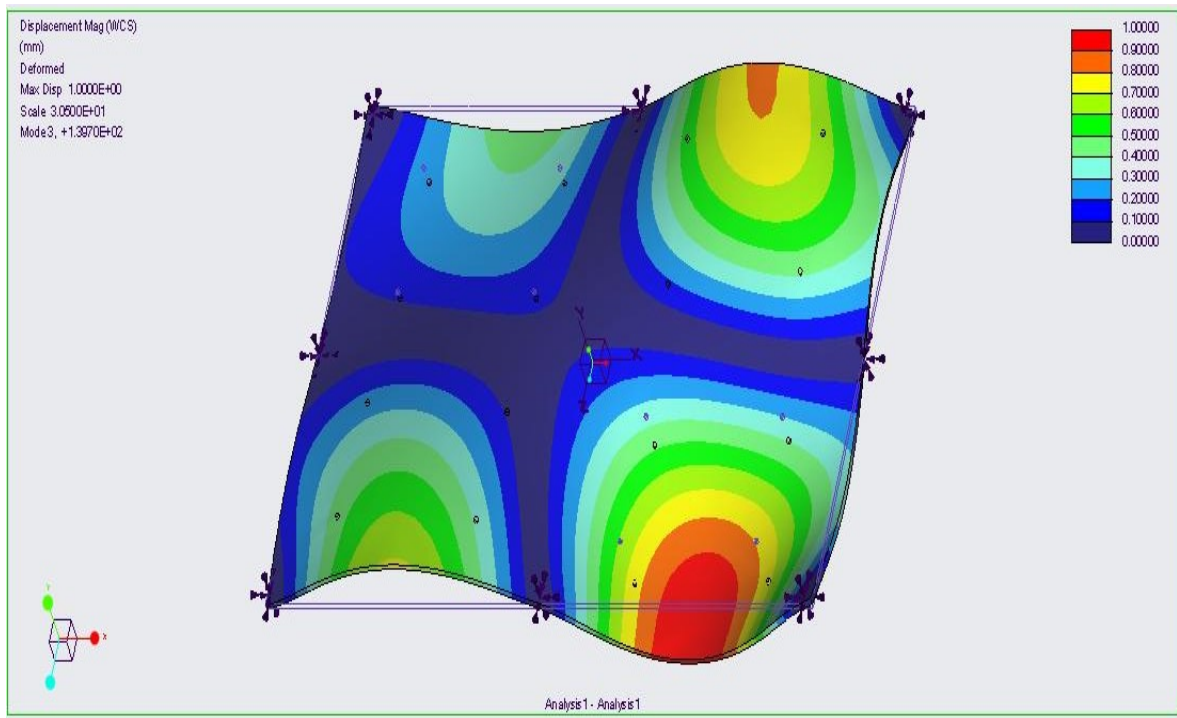


Рисунок 4.15 – Третья собственная частота ПП

Результаты моделирования и испытаний для основных частот МПП представлены в таблице 4.2. Результаты моделирования и тестирования для ПП хорошо согласуются. Следовательно, модель FEM анализа достаточно адекватна [73].

Таблица 4.2 – Сравнение собственных частот при моделировании и эксперименте

| Частота (Гц) | Моделирование Результаты | Тестовое задание Результаты | % разница |
|--------------|--------------------------|-----------------------------|-----------|
| 1            | 77                       | 78                          | 1,3       |
| 2            | 104                      | 96                          | 8,3       |
| 3            | 136                      | 128                         | 6,3       |
| 4            | 153                      | 144                         | 6,2       |

Таким образом, опираясь на данные проведенного эксперимента и моделирования в CREO, такой инструмент, как «сосредоточенная масса», заменяющий реальную геометрию компонентов, расположенных на плате, дает хорошую точность, не превышающую 10 %, а следовательно, широко может использоваться для анализа механических характеристик МПП [74]. Такой подход позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на моделирование, так как отпадает необходимость построения очень сложной сети конечных элементов [75].

#### 4.2. Моделирование многослойных печатных плат «кассетной» конструкции с несколькими способами закрепления

Особенность МПП «кассетной» конструкции заключается в невозможности фиксации в произвольном месте, что вызывает дополнительные трудности в размещении тяжелых или больших компонентов. Наличие тяжелых электронных компонентов на печатной плате обычно снижает ее собственную частоту, поэтому в процессе анализа модели это необходимо учитывать [76].

Печатная плата такой конструкции может быть закреплена только по периметру, поэтому необходимо выделять девять областей на печатной плате, как это показано в предыдущем разделе, куда в зависимости от ситуации желательно или нежелательно ставить компоненты.

Кроме того, платы «кассетной» конструкции могут в силу особенностей иметь разные способы закрепления сторон. Это может быть жесткое закрепление, там, где располагается длинный многоконтактный электрический соединитель, или

свободное опирание на конструктивные элементы блока. В данном исследовании проведено моделирование тринадцати способов закрепления МПП «кассетной» конструкции. Кроме того, показана оценка собственных частот, проведенная аналитическим методом с помощью математических моделей, представленных в разделе 2.2.

На рисунке 4.16 представлена модель МПП с размерами, указанными в таблице 4.1 с построенной сеткой конечных элементов.

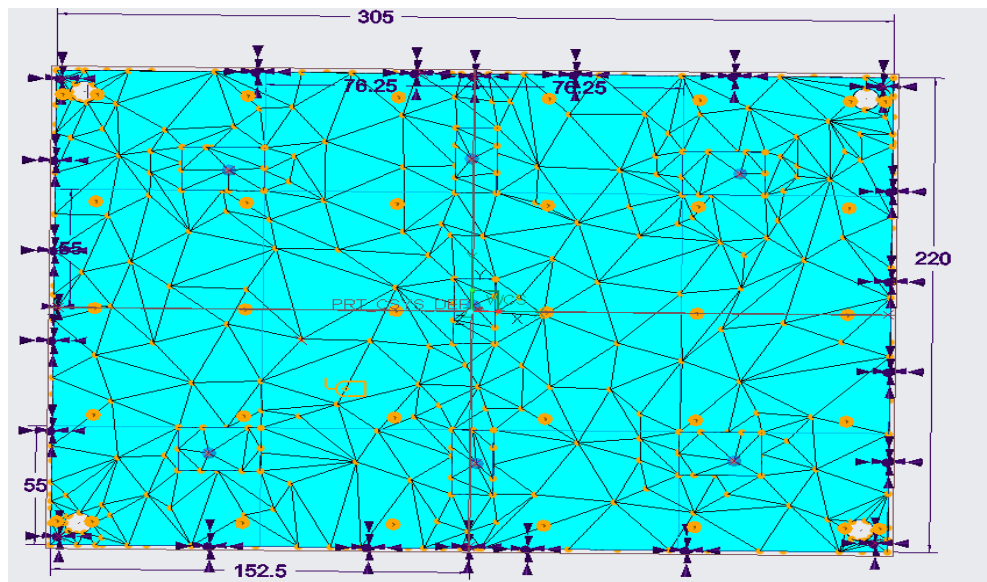
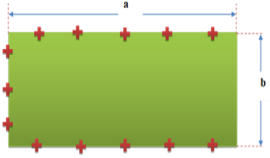


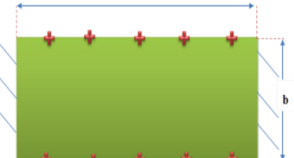
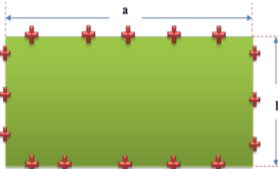

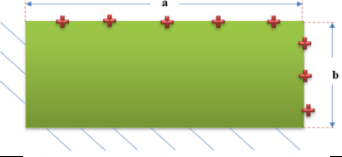



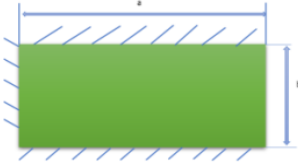
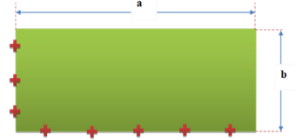
Рисунок 4.16 – Модель МПП с сеткой конечных элементов

Результаты моделирования и аналитических расчетов СЧК различных способов закрепления МПП «кассетной» конструкции содержатся в приложении А. Разность между итогами определения собственных частот в процессе моделирования и аналитических расчетов представлена в таблице 4.3.

Таблица 4.3 Результаты моделирования и аналитического расчета собственных частот конструкции МПП «кассетной» конструкции

| № | Способ закрепления МПП  | Аналитический расчет СЧК платы Гц | Результат модального анализа СЧК платы | Разница % |
|---|---|-----------------------------------|--|-----------|
| 1 |    | 71 Гц                             | 69 Гц                                  | 2.8       |
| 2 |    | 72.3 Гц                           | 76 Гц                                  | 5         |
| 3 |    | 35 Гц                             | 38 Гц                                  | 8.5       |
| 4 |  | 120 Гц                            | 119 Гц                                 | 0.8       |
| 5 |  | 93 Гц                             | 100 Гц                                 | 7.5       |
| 6 |  | 182 Гц                            | 183 Гц                                 | 0.5       |
| 7 |  | 131 Гц                            | 138 Гц                                 | 5         |
| 8 |  | 31.9 Гц                           | 28 Гц                                  | 12        |



|    |   |        |        |     |
|----|---|--------|--------|-----|
| 9  |  | 150 Гц | 143 Гц | 4,6 |
| 10 |  | 19 Гц  | 22 Гц  | 13  |

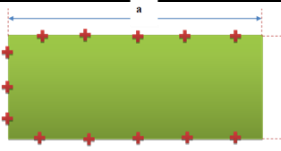
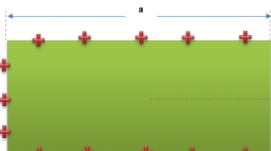


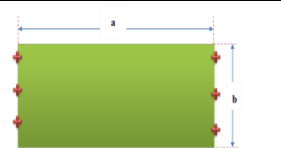
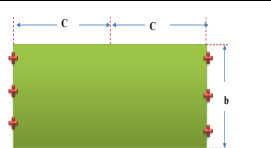
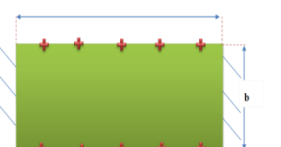
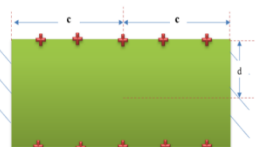
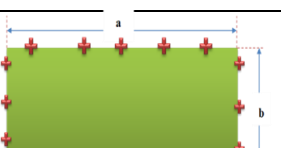
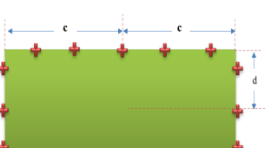
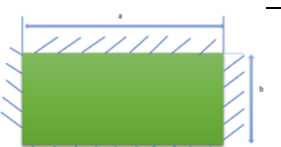
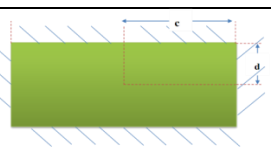
Из таблицы 4.3 видно, что разница между аналитическим методом, дающим наибольшую точность, и моделированием не превышает 12 %, что показывает хорошее согласование результатов моделирования.

Кроме того, в приложении А также приведены результаты моделирования собственных частот МПП и расчет СЧК с применением тригонометрических и полиномиальных моделей.

Результаты сравнения моделирования и аналитического расчета с помощью двух видов математических моделей (полиномиальной и тригонометрической функций) для разных видов закрепления плат «кассетной» конструкции представлены в таблице 4.4

Из таблицы 4.4 видно, что разница между аналитическим методом и моделированием не превышает 15 %, что показывает хорошую точность моделирования.

Таблица 4.4 Результаты моделирования и аналитического расчета с помощью двух видов функций собственных частот конструкции МПП «кассетной» конструкции

| Проведение аналитических расчетов СЧК платы Гц |   |   | Моделирование СЧК (первая собственная частота) Гц | Разница, % (тригонометрическая функция) | Разница, % (полиномиальная функция) |
|--|---|---|---|---|-------------------------------------|
| №  | Тригонометрическая функция  | Полиномиальная функция  |   |   |                                     |
| 1  | <br>71 Гц    | <br>75 Гц    | 69 Гц   | 2.8                                     | 8                                   |
| 2  | <br>72.3 Гц  | <br>73 Гц    | 76 Гц   | 5.1                                     | 4.1                                 |
| 3  | <br>35 Гц  | <br>33 Гц  | 38 Гц   | 8.5                                     | 14                                  |
| 4  | <br>120 Гц | <br>119 Гц | 120 Гц  | 0                                       | 0.8                                 |
| 5  | <br>93 Гц  | <br>105 Гц | 100 Гц  | 7.5                                     | 4.7                                 |
| 6  | <br>182 Гц | <br>173 Гц | 183 Гц  | 0.5                                     | 5.7                                 |

#### 4.3. Определение оптимального способа закрепления многослойных печатных плат

Методика, предложенная в предыдущей главе, может использоваться для поиска оптимальной конструкции МПП. Рассмотрим один из вариантов для определения наиболее оптимального способа закрепления МПП. Печатная плата, модель которой представлена на рисунке 4.17, имеет кассетную конструкцию. С одной стороны располагается краевой соединитель, а с противоположной – органы управления и индикации.

Первоначальный способ крепления платы предполагал жесткое защемление в краевом разьеме и защемление на углах противоположной стороны защелками. На рисунке 4.17 показана модель платы в CREO с указанным способом закрепления. Кроме того на плате располагается ряд крупных и тяжелых компонентов (тороидальный трансформатор 43 г., модуль питания 23 г., микросхемы BGA [77]). Данные о максимальных значениях прогибов из базы данных представлены в таблице 4.5. Получено также предварительное размещение компонентов (рисунок 4.17).

Таблица 4.5 – Максимальные прогибы в областях МПП

| № | Вид компонента                | Масса<br>г | Размеры,<br>мм      | Максимальная<br>допустимая деформация,<br>мм |
|---|-------------------------------|------------|---------------------|--|
| 1 | SOIC28-330                    | 2          | 18,2x12,6           | 0,1  |
| 2 | NF-G6100-N-A2                 | 9          | 40 x 40             | 0,3  |
| 3 | BGA-352P-M01                  | 11         | 35 x 35 x 2.58      | 0,25   |
| 4 | МДМ2-1А 3,3 хН                | 23         | 22,3 x12,1 x<br>9,8 | 0,32   |
| 5 | Тороидальный<br>трансформатор | 43         | 62 x 32             | 0,50   |

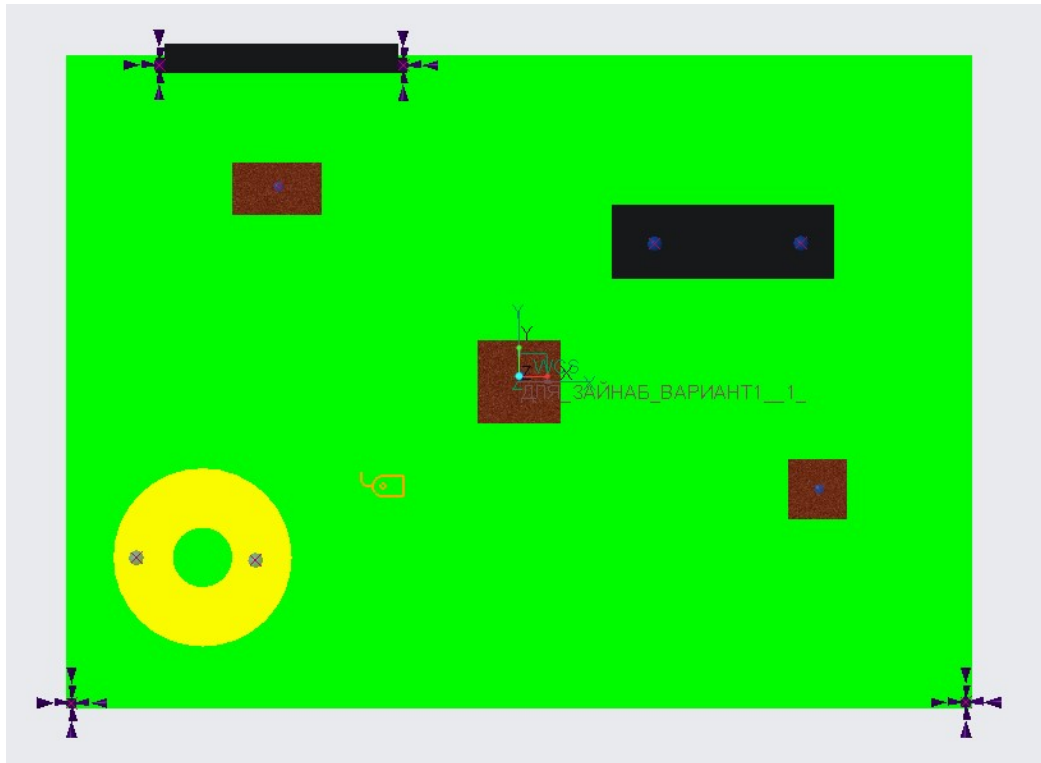


Рисунок 4.17 – Первоначальный вариант конструкции МПП

На рисунке 4.18 показана построенная сетка конечных элементов МПП, а на рисунке 4.19 – результат модального анализа.

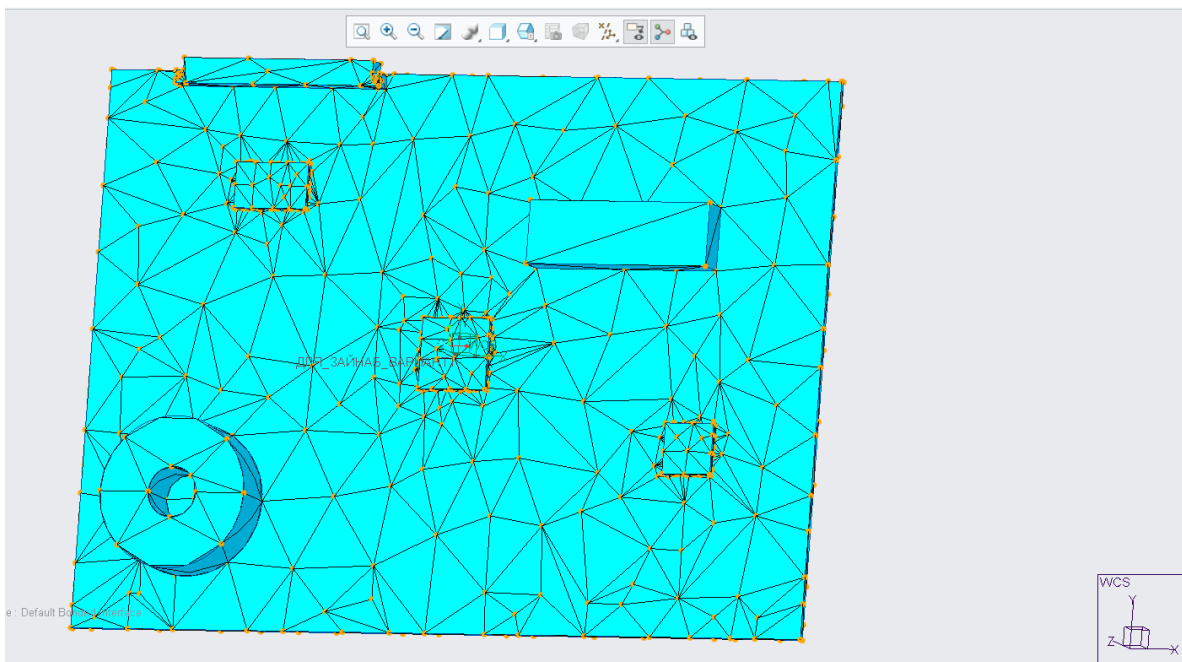


Рисунок 4.18 – Сетка конечных элементов конструкции МПП

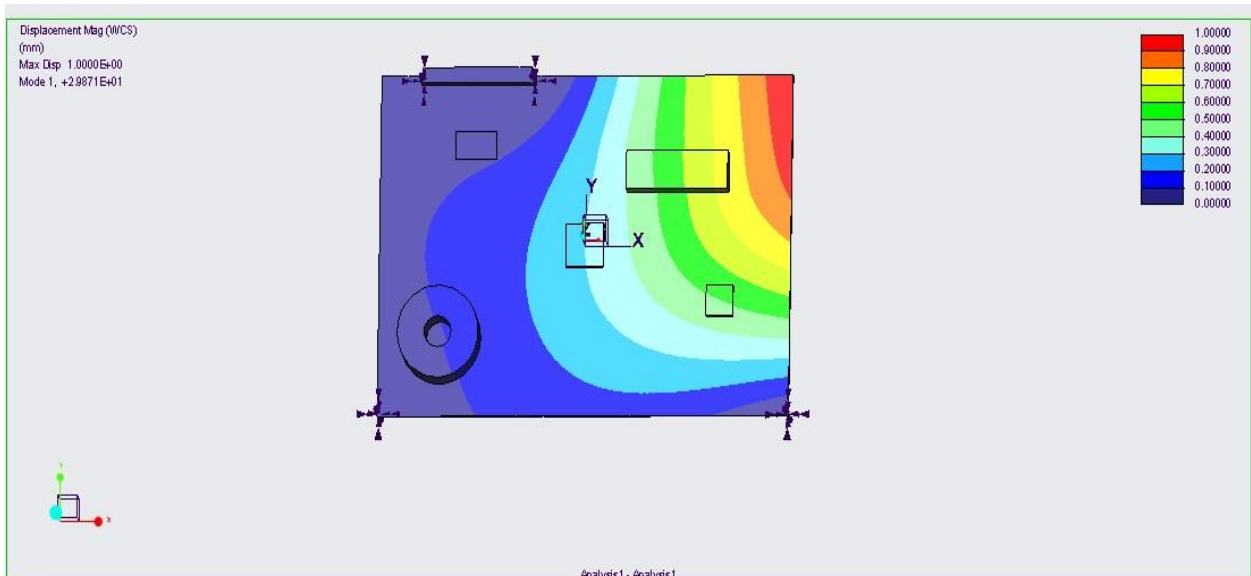


Рисунок 4.19 – Результат модального анализа конструкции МПП (первый вариант)

Согласно результатам моделирования собственная частота МПП составляет всего 28 Гц, что недопустимо, так как устройство, в состав которого входит исследуемая МПП, располагается на автомобильном носителе, для которого характерны вибрации в диапазоне до 80 Гц. В этом случае может возникнуть резонанс, что приведет к выходу из строя элементов и компонентов МПП. Требуется другой вариант закрепления.

Предложено плату в кассетах расположить на направляющих, которые будут жестко защемлять края. Второй вариант закрепления МПП показан на рисунке 4.20.

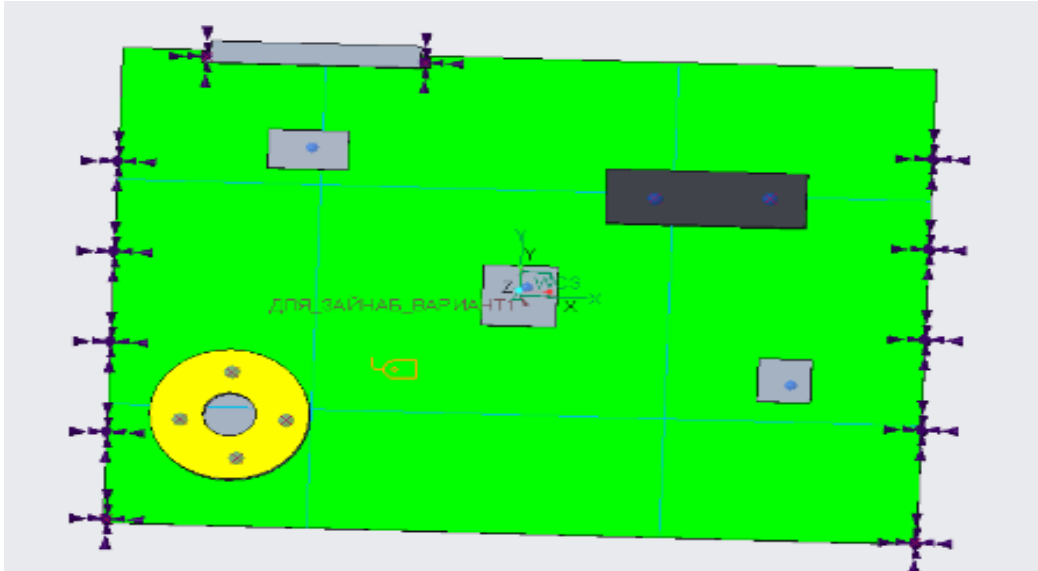


Рисунок 4.20 – Второй вариант конструкции МПП (изменена схема закрепления)

На рисунке 4.21 показан результат модального анализа второго варианта конструкции МПП. Собственная частота конструкции увеличилась до 104 Гц, что является более приемлемым вариантом с точки зрения возникновения резонансных явлений при эксплуатации. Однако наиболее крупные компоненты (микросхемы с корпусом BGA и модуль питания) находятся в областях с повышенным прогибом и механическими напряжениями в областях платы, где они установлены (таблица 4.6). [78].

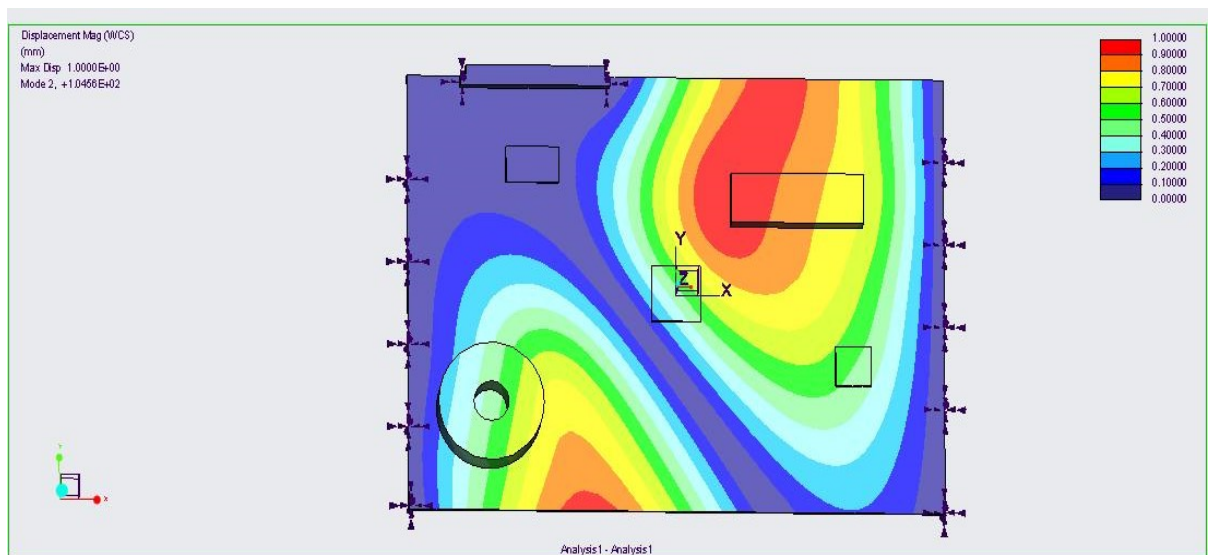


Рисунок 4.21 – Результат модального анализа конструкции МПП (второй вариант)

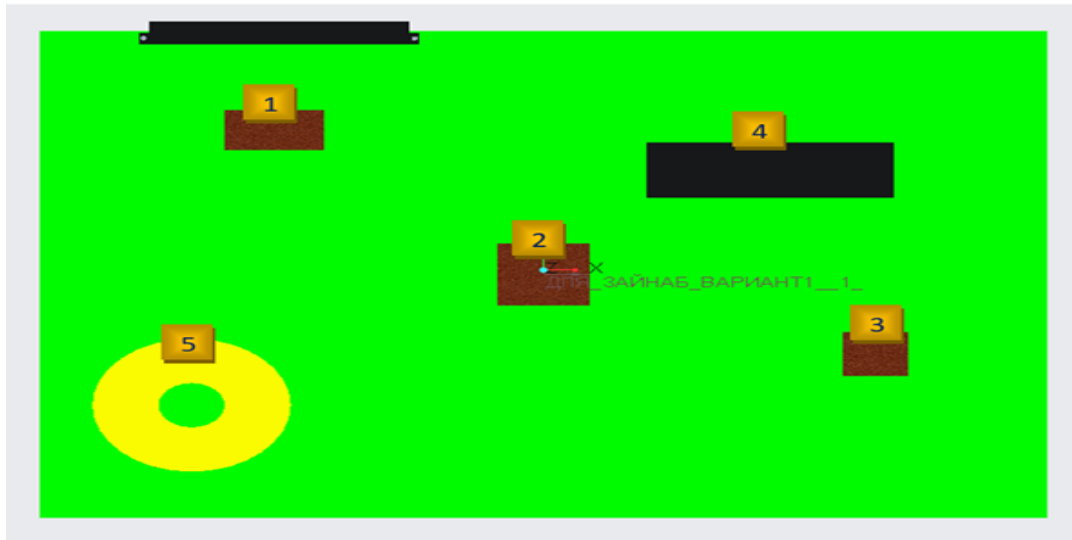


Рисунок 4.22 – Перемещение (прогиб) компонентов МПП

Таблица 4.6 – Максимальные прогибы в областях МПП

| № компонента | Перемещения, мм |
|--------------|-----------------|
| 1            | 0,09            |
| 2            | 0,3             |
| 3            | 0,51            |
| 4            | 0,67            |
| 5            | 0,41            |

На рисунке 4.22 показано перемещение областей, на которых установлены указанные компоненты. Видно, что почти все компоненты, кроме первого, имеют значительные перемещения, что неприемлемо, так как это может вызвать повышенные напряжения в паяных соединениях с нарушением целостности контакта. Так как схему закрепления у платы «кассетной» конструкции изменить нельзя, то предлагается переместить компоненты в области, менее подверженные нагрузкам [79].

На рисунке 4.23 показан третий вариант конструкции, а на рисунке 4.24 – результат модального режима в CREO, который показывает, что собственная частота увеличилась до 147 Гц, а прогибы в областях, где стоят крупные

компоненты, составляют не более 0,2 мм (таблица 4.7), что удовлетворяет требованиям по надежности.

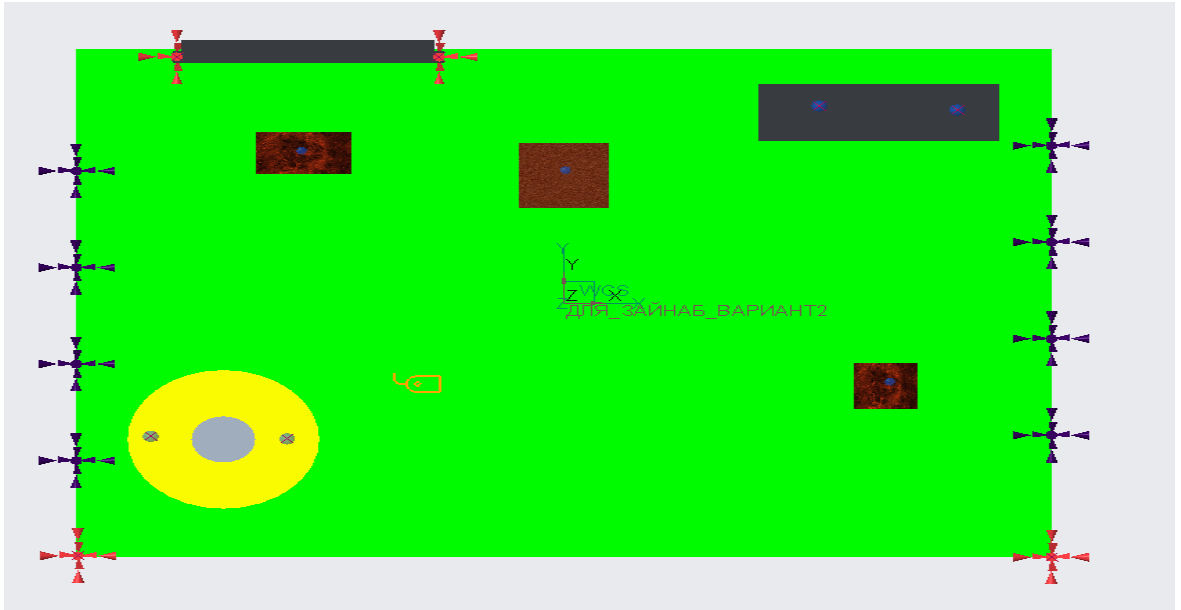


Рисунок 4.23 – Третий вариант конструкции МПП (изменено положение крупных компонентов)

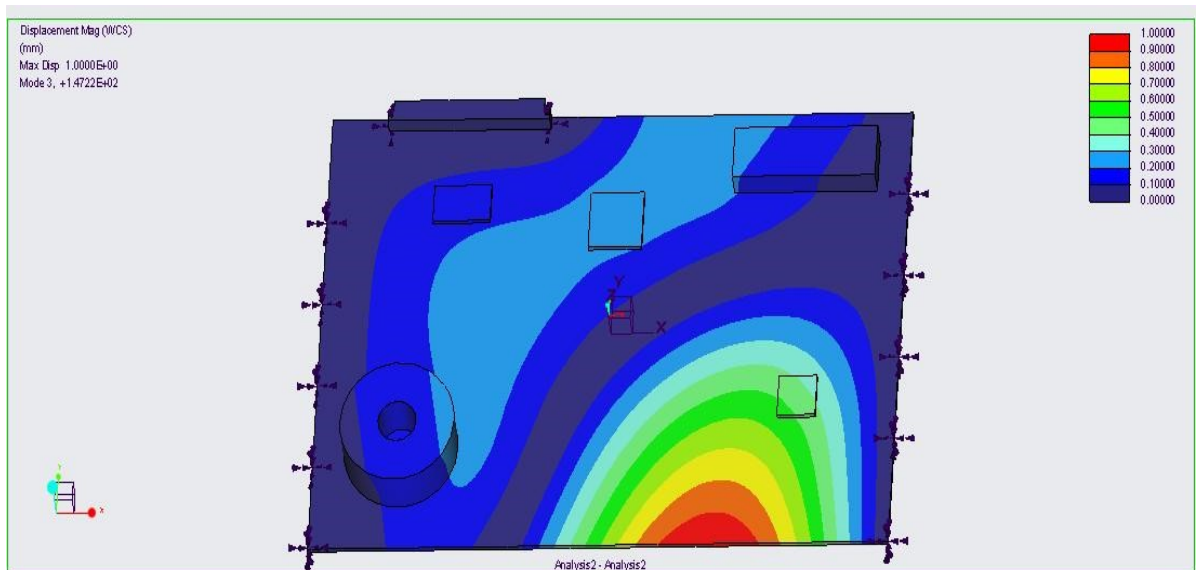


Рисунок 4.24 – Результат модального анализа конструкции МПП (третий вариант)



Таблица 4.7 – Максимальные прогибы в областях МПП

| № компонента | Перемещение, мм |
|--------------|-----------------|
| 1            | 0,15            |
| 2            | 0,17            |
| 3            | 0,19            |
| 4            | 0,10            |
| 5            | 0,17            |

#### 4.4. Выводы по главе

1. Проведен эксперимент на вибрационном стенде МПП «кассетной» конструкции с установленными компонентами. Точки крепления платы делят ее площадь на девять областей, которые подвергаются механическим напряжениям с разной интенсивностью. В результате эксперимента показано, что центральная область имеет наибольшее ускорение. Области с номерами 2,4,6,8 имеют меньшую интенсивность воздействия механических сил. И области с номерами 1,3,7,9 наименее подвержены механическим воздействиям. Проведено также моделирование конструкции этой платы в Creo. Модальный анализ показал разницу между результатами эксперимента и моделированием, не превышающую 10 %, что демонстрирует хорошую точность.

2. Проведено моделирование разных способов закрепления МПП «кассетной» конструкции с определением СЧК аналитическим методом. Результаты показывают небольшое расхождение итогов моделирования и аналитического расчета.

3. В ходе исследований проводилась доработка МПП модуля «кассетной» конструкции. В результате моделирования выявлена недостаточная величина собственной частоты МПП. Изменена схема закрепления платы и изменено расположение компонентов на наиболее оптимальное с точки зрения механических нагрузок на паяные контакты.

4. Работа выполнена в рамках одного из основных научных направлений Воронежского государственного технического университета и ГБ НИР 2019.17

«Исследование и разработка методов комплексного анализа и оптимального синтеза на этапах функционального и конструкторского проектирования РЭС». Основные результаты внедрены в отдел разработки и отдел испытаний АО НВП «Протек» (г. Воронеж), внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по дисциплине «Современные РЭС спецназначения: особенности проектирования и эксплуатации» образовательной программы подготовки магистров по направлению 11.04.03 "Конструирование и технология электронных средств".

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного диссертационного исследования получены следующие научно-технические результаты:

1. Исследованы виды, особенности конструкций, материалы и области применения радиоэлектронных модулей на основе МПП, способы фиксации в радиоэлектронных блоках, в том числе «кассетной» конструкции, определены граничные условия, используемые для моделирования характеристик электронных средств при действии на них внешних механических нагрузок.
2. Проведен анализ видов механических нагрузок, действующих на радиоэлектронные модули в составе МПП, а также особенностей поведения отдельных компонентов при действии внешних деформаций, исследованы математические модели механических сил, действующие на МПП.
3. Предложены математические модели определения прогиба участков МПП «кассетной» конструкции, позволяющие оценить механические нагрузки на паяные выводы компонентов и тем самым выявить опасные места для установки.
4. Предложена комплексная методика создания радиоэлектронных модулей на основе МПП, охватывающая этапы от топологического проектирования до испытаний, позволяющая сократить временные затраты на проектирование, отличающаяся использованием структуры обмена проектными данными.
5. Разработана методика топологического проектирования МПП, в том числе «кассетной» конструкции, основанная на предварительном размещении компонентов и моделировании механических характеристик до этапа трассировки, выявлении наиболее опасных мест для компонентов с корпусами большой площади, отличающаяся определением оптимальных схем крепления и координат точек крепления, а также возможностью применения ребер для увеличения жесткости.

6. Проведена экспериментальная оценка точности моделирования механических характеристик радиоэлектронных модулей на основе МПП.
7. Предложенные методы, модели и алгоритмы проверены на опытно-конструкторской разработке, в ходе которой выявлены преимущества методик и их эффективность.
8. Результаты внедрены в проектные работы на АО НВП «Протек» (г. Воронеж) и в учебный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ», их применение позволяет осуществлять конструкторский анализ радиоэлектронных модулей, повышает эффективность НИОКР, в результате чего повышается конкурентоспособность изделий при сокращении сроков выхода изделий на рынок.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

РЭС – радиоэлектронные средства

ПП – печатная плата

МПП – многослойная печатная плата

ЭВМ - электронная вычислительная машина

КМО - компоненты, монтируемые в отверстия

КПМ - поверхностно монтируемые компоненты

МКЭ – метод конечных элементов

МКР – метод конечных разностей

ЭРЭ – электрорадиоэлементы

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика

БД – база данных

ВИП – виброизмерительный преобразователь

ПО – программное обеспечение

ПК – программный комплекс

СЧК – собственная частота конструкции

САПР – система автоматизированного проектирования

ЭС – электронное средство

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Горобец А.И. Справочник по конструированию радиоэлектронной аппаратуры (печатные платы) / А.И. Горобец, В.М. Коронкевич, А.И. Степаненко. - 5-е изд. - Киев: Техника, 1985.
2. Галушко В.Н. Надежность электроустановок, энергетических систем и радиоэлектронных средств: учеб.-метод. пособие / В.Н. Галушко, С.Г. Додолев, А.В. Дробов. - Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2018. - 217 с.
3. Гасников А.В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска / А.В. Гасников. -2-е изд., доп. - М.: МФТИ, 2018. - 181 с.
4. Моделирование механических характеристик многослойных печатных плат средствами САЕ анализа / З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Муратов, А.В. Турецкий, Ю.В. Худяков // Надежность и качество: труды Междунар. симпозиума. - Пенза: Пензенский государственный университет, 2018. - Т. 1. - С. 224-227.
5. Методика выбора оптимальной компоновки многослойных печатных плат с учетом внешних механических воздействий / З.Х.М. Аль-Араджи, О.Ю. Макаров, А.В. Муратов, А.В. Турецкий, Ю.В. Худяков // Радиотехника. - 2020. - Т. 84. - № 6 (12). - С. 30-36.
6. Gide A. Исследование и разработка методов обеспечения функциональной безопасности и электромагнитной совместимости / А. Gide. - Москва, 1967. - С. 5-24.
7. Брусницына Л.А. Технология изготовления печатных плат: учеб. пособие / Л.А. Брусницына, Е. И. Степановских. - Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2015. - 200 с.
8. Методы изготовления многослойных печатных плат / О.И. Щербакова, Ю.А. Граб, А.Г. Белов и др.// Надежность и качество: труды Междунар. симпозиума. - Пенза: Пензенский государственный университет, 2014. - Т. 2. - С. 154 - 157.
9. Modeling and Experimental Research of Vibration N Properties of A Multi-

Layer Printed Circuit Board / Z.H.M. Al-Araji, N.A. Swaikat, A.V. Muratov, A. V. Turetsky // 4th Scientific International Conference Najaf, SICN, 2019. - P. 43–47.

10. Александр Акулин. Технические параметры изготовления многослойных печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 5. С 30-32.

11. Шимановский А.О. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики: учеб.-метод. пособие / А.О. Шимановский, А.В. Путьто. - Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2008. - 61 с.

12. Иванов Д.В. Введение в метод конечных элементов: учеб. пособие / Д.В. Иванов, А.В. Доль. - Саратов: Саратовский национальный исследовательский университет, 2016. - 84 с.

13. ГОСТ 55693-2013. Платы печатные жесткие. - Введ. 01.06.2014. -М.: Стандартиформ, 2014.

14. Справочник конструктора РЭС: общие принципы конструирования / под ред. Р.Г. Варлатова. - М.: Сов. Радио, 1980. - 480 с.

15. Silvestre S. Printed Circuit Board (PCB) Design Process and Fabrication / S. Silvestre, S. Jordi, J. Marzo. - 1<sup>st</sup> Editio-e. - Czech: Czech Technical University of Prague Faculty of electrical engineering, 2019.

16. Автономная система обеспечения теплового режима электронных блоков космических аппаратов / А.В. Горбунов, Ю.А. Жуков, Е.Б. Коротков, А.В. Леканов, В.Г. Порпылев, Н.С. Слободзян // Вопросы радиоэлектроники. - 2018. - №7. - С. 72–78.

17. Моделирование механических характеристик многослойных печатных плат в PRO/ENGINEER / З.Х.М. Аль-Араджи, О.Ю. Макаров, А.В. Турецкий, В.А. Шуваев // Радиотехника. - 2014. - №3. - P. 101–102.

18. Белецкая С.Ю. Применение экспертных систем при проектировании печатных плат с учетом требований по механической прочности / С.Ю. Белецкая, П.В. Иевлев, А.В. Турецкий // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - № 6-3. - С. 33-35

19. Пат. RU 148503 U1 РФ, МПК H05K 1/02, H05K 1/03. Электронная плата с

ребрами жесткости / М.В. Руфицкий, М.А. Сучков, А.В. Осин, А.Н. Золотов, Е.С. Кузнецов. - № 2012141017/07; заяв. 25.09.2012; опубл. 10.12.2014, Бюл. №34.

20. Третьяков С.Д. Современные технологии производства радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие / С.Д. Третьяков. - СПб.: Университет ИТМО, 2016. - 102 с.

21. ГОСТ Р 55492 2013/ IEC/PAS 62137-3:2008. Технология сборки изделий электроники. Часть 3. Руководство по выбору методов экологических и ресурсных испытаний для паяных соединений. – М.: Стандартиформ, 2014.

22. Конструирование гибких и гибко-жестких печатных плат / А. Медведев, А. Сержантов, Г. Мылов, П. Семенов // Компоненты и технологии. - 2008. - № 6. - (83). - С. 147-160.

23. Зенин В. Влияние марки припоя и способов пайки кристаллов на параметры силовых полупроводниковых приборов на примере транзистора КП767В / В. Зенин, О. Хишко // Компоненты и технологии. - 2009. - № 8 (97). - С. 146-151.

24. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учеб. пособие / А.И. Хальясмаа, С.А. Дмитриев, С.Е. Кокин, Д.А. Глушков. - Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2015. - 64 с.

25. Романова Е.Б. Основы конструирования электронных средств: учеб. пособие / Е.Б. Романова, О.В. Кузнецова, А.Ю. Кузнецов - С.-Пб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017. - 53 с.

26. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учеб. пособие / А.И. Хальясмаа, С.А. Дмитриев, С.Е. Кокин, Д.А. Глушков. - **Город**, 2015. - 64 с.

27. Алюшин Ю. А. Энергетическая основа резонанса в упругих телах / Ю.А. Алюшин // Физическая мезомеханика. - 2019. - Т. 22. - № 3. - С. 42-53.

28. Аль-Араджи З.Х.М. Методика тестирования надежности межслойных соединений многослойных печатных плат при механических воздействиях / З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Турецкий, С.Ю. Белецкая // Радиотехника. - 2014. - № 6. - С. 54–



57.

29. Герасимов О.Н. Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники / О.Н. Герасимов, А.Ю. Доросинский, М.Н. Березин // Надежность и качество сложных систем. - 2017. - № 3. - С. 37–42.

30. Кольтюков Н.А. Проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств: учеб. пособие / Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. - Тамбов: ТГТУ, 2009. - 83 с.

31. Иванов А.В. Оценка качества паяных соединений электронных узлов / А.В. Иванов, М.Н. Пиганов // Известия Самарского научного центра РАН. - 2016. - Т. 18. - № 4 - 7. - С. 1381 - 1386.

32. Аль-Араджи З.Х.М. Математические модели механических характеристик многослойных печатных платах / З.Х.М. Аль-Араджи // Радиотехника. - 2019. - Т. 83. - № 6. - С. 169-172.

33. Исследование теплопроводности печатных плат на основе алюминиевой подложки и алюмооксидного диэлектрика / Д.Я. Баринов, П.С. Мараховский, Е.Ю. Мальцева, Е.Д. Беспрозванный, Е.Е. Алясова // Авиационные материалы и технологии. - 2019. - №1 (54). - С. 43-48.

34. Гаффанов Р.Ф. Анализ проблем расчета запорной арматуры с нанесенным на нее коррозионно-стойким покрытием / Р.Ф. Гаффанов, А.В. Щенятский, Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2016. - № 7. - С. 23 - 27.

35. Анализ возможностей средств автоматизированного проектирования механических и тепловых процессов конструкций РЭС / И.А. Лозовой, А.В. Турецкий, О.Ю. Макаров, С.Ю. Сизов // Системные проблемы надёжности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в инновационных проектах: материалы Междунар. конф. - М.: Энергоатомиздат, 2010. - Ч. 2. - С. 203-212

36. Бутымова Л.Н. Исследование газодинамического потока и конструкции в модельной экспериментальной установке / Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский //

Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. - 2014. - Т. 3. - № 2. - С. 92-100.

37. Карпушин В.Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре / В.Б. Карпушин. - М.: Советское радио, 1971. - 344 с.

38. Al-Araji Z.H.M. Overcoming the challenges of the QFN package by proper stencil generation choice (electroform stencils, nano-coat stencils) / Z.H.M. Al-Araji, A.V. Muratov, A.V. Turetsky // Инновационные материалы и технологии - 2020. – Минск: БГТУ, 2020. – С. 178-182.

39. Евграфов В.В. Виброзащита радиотехнических устройств демпфирующими слоями: дисс... канд. техн. наук / В.В. Евграфов. - Владимир: ВлГУ, 2003. - 167с.

40. Герасимов О.Н. Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники / О.Н. Герасимов, А.Ю. Доросинский, М.Н. Березин // Надежность и качество сложных систем. - 2017. - № 3 (19). - С. 37-42.

41. Аль Араджи З.Х.М. Моделирование и экспериментальное исследование вибрационных свойств многослойной печатной платы / З.Х.М. Аль Араджи, А.В. Муратов, А.В. Турецкий // Радиотехника. - 2019. - № 6 (83). - С. 145–149.

42. Methodology for Predicting the Optimum Design of Radio-Electronic Devices / Z.H. Al-Araji, N. Swaiat, A.V. Bashkirov, A.V. Turetsky, E.A. Chunikhina, A.S. Samofalova // 4th International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), 2021.

43. Оптимизация способа закрепления печатной платы на алюминиевом основании / З.Х.М. Аль-Араджи, О.Ю. Макаров, А.В. Турецкий, Ю.В.Худяков // Надежность и качество: труды Междунар. симпозиума. - Пенза, 2021. - Т. 2. - С. 175–179.

44. Иванов А.В. Модальный анализ динамических систем роторов / А.В. Иванов, М.К. Леонтьев // Известия высших учебных заведений. Сер. Авиационная техника. - 2005. - № 3. - С. 31-35.

45. Синютин С.А. Метод формирования модели пониженного порядка

микроэлектромеханической системы встроенными средствами программного пакета ANSYS / С.А. Синютин, О.Ю. Воронков // Инженерный вестник Дона. - 2016. - № 4 (43). - С. 110.

46. Беккель Л.С. Анализ возможностей Creo Parametric / Л.С. Беккель, Е.Н. Сломинская // Инновационная наука. - 2016. - № 9 (21). - С. 47-50.

47. Горобец А.И. Справочник по конструированию радиоэлектронной аппаратуры (печатные платы) / А.И. Горобец, В.М. Коронкевич, А.И. Степаненко - Киев: Техника, 1985. - 312 с.

48. Аль-Араджи З.Х.М. Методика оценки усталостного ресурса печатной платы с использованием принципа линейных накопленных повреждений при различных граничных условиях / З.Х.М. Аль-Араджи // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2021. - Т. 17. - № 3. - С. 114-120.

49. Моделирование механических характеристик многослойных печатных плат средствами CAE анализа / З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Муратов, А.В. Турецкий, Ю.В. Худяков // Надежность и качество: труды Междунар. симпозиума. - Пенза, 2018. - Т. 1. - С. 224 - 227

50. Fatemi A. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials / A. Fatemi, L. Yang // International Journal of Fatigue 20. - 1998. - Vol. 20. - Issue 1. - С. 9-34.

51. Муравьев Ю. Особенности проектирования и производства печатных плат на металлическом основании / Ю. Муравьев // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. - 2010. - № 2. - С. 35-38.

52. Хабибуллин М.Я. Увеличение эффективности разделения жидких систем при сборе пластовой жидкости / М.Я. Хабибуллин // Нефтегазовое дело. - 2020. - № 18(2). - С. 64-71.

53. Аль-Араджи З.Х.М. Финишные покрытия МПП / З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Турецкий // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. - Воронеж: ВГТУ, 2014. - С. 266 - 269

54. Aytekin Banu. Vibration Analysis of Pcb's and Electronic Components. - M.S. - Master of Science, Middle East Technical University, 2008, 118 p.

55. Steinberg D.S. Vibration Analysis for Electronic Equipment / D.S. Steinberg 3<sup>rd</sup> Edition, 2000. - 440 p.

56. Соколов С.А. Устойчивость пластины с продольным ребром / С.А. Соколов, А.А. Грачёв // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. - 2015. - № 4 (103). - С. 119-129.

57. Оптимизация способа закрепления печатной платы для минимизации механических напряжений / З.Х.М. Аль-Араджи, О.Ю. Макаров, А.В. Турецкий, Ю.В. Худяков // Радиотехника. - 2021. - Т. 85. - № 6. - С. 5-11.

58. Мыльников В.В. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов / В.В. Мыльников, О.Б. Кондрашкин, Д.И. Шетулов - Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. - 117 с.

59. Бессолова О.А. Некоторые вопросы определения эквивалентности сопротивления усталости при многокомпонентном нагружении / О.А. Бессолова, В.Л. Райхер // Ученые записки ЦАГИ. - 1987. - Т. XVIII. - № 2. - С. 143-147.

60. The New Way of Estimating the PCB's Lifetime of Fatigue using the Principle of Linear Accumulated Damage in Various Boundary Condition / Z.H. Al-Araji, N. Swaikat, A. S. Samofalova, H. Souikat, V.V. Korneeva // 2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2020.

61. Стрижиус В.Е. Механизмы накопления усталостного повреждения при сложном программном нагружении слоистых композитов: существующие гипотезы / В.Е. Стрижиус // Научно-технические ведомости СПбПУ. Сер. Естественные и инженерные науки. - 2019. - Т. 25. - № 4. - С. 71-82.

62. Жарикова И.В. Системологический подход при исследовании параметров РЭС / И.В. Жарикова, В.В. Невлюдова // Технология приборостроения. - 2014. - №2. - С. 40-43

63. Никитин М. Российские DC/DC-преобразователи от НПП «Арбелос» для ответственных применений / М. Никитин // Современная электроника. - 2015. - № 6. - С. 66 - 69.

64. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для обеспечения электронного документооборота / З.Х.М. Аль-Араджи, А.С. Старцева, А.С. Самофалова. № 2020661840; правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»; заявка № 2020660761, дата поступления 21.09.2020; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 01.10.2020.

65. Туснин А.В. Методика построения конечно-элементной сеточной модели на примере камеры сгорания газотурбинного двигателя / А.В. Туснин, С.А. Шаламов, В.Г. Августинович // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер. Аэрокосмическая техника. - 2013. - № 35. - С. 31-48.

66. Учебное пособие по дисциплине «Основы проектирования электронных средств» / Л.Н. Панков, В.Р. Асланянц, Г.Ф. Долгов, В.В. Евграфов. - Владимир: Владимирский государственный университет, 2007. - 260 с.

67. Формирование структуры сложных многослойных печатных плат / П.В. Шуваев, В.А. Трусов, В.Я. Баннов, И.И. Кочегаров, В.Ф. Селиванов, Н.В. Горячев // Надежность и качество: труды Междунар. симпозиума. - Пенза, 2013. - Т. 1. - С. 364-373.

68. Лозовой И.А. Методы испытания паяных соединений поверхностно монтируемых компонентов на механические воздействия / И.А. Лозовой, А.В. Турецкий, В.А. Шуваев // Радиотехника. - 2012. - №8. - С. 76-80.

69. A nonlinear fatigue damage accumulation model considering strength degradation and its applications to fatigue reliability analysis / R. Yuan, H. Huang, H.-Z. Li, S.-P. Zhu, H. Gao // International Journal of Damage Mechanics. - 2015. - Vol. 24. - № 5. - Pp. 646–662.

70. The perfect position of electrical components on pcbs in communication system industry from the mechanical aspects'viewpoint / Zainab H. Al-Araji, AL-Fadhli, H.K. Firas, N. Swaikat, A.V. Turetsky, A.V. Muratov // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. - 2020. Vol. 43. - Issue 4. - С. 82 - 91.

71. Бережной В.Л. Обоснование выбора методологии параметрической разработки модификации прессования с учетом масштабного фактора / В.Л. Бережной // Технология легких сплавов. - 2013. - № 4. - С. 174-187.

72. Durand R. E., M. J. Gabler L. Weinberg, and T. M. Yang. Vibration tests of a full scale water model of a Clinch River steam generator module. No. TID-27821. Atomics International Div., Canoga Park, Calif.(USA); General Electric Co., Sunnyvale, Calif.(USA), 1978.

73. Аль-Араджи З.Х.М. Верификация результатов FEM анализа вибрационных свойств многослойной печатной платы / З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Турецкий, Ю.В. Худяков // Надежность и качество: труды Междунар. симпозиума. - Пенза, 2019. - № 2. - С. 71–73.

74. Галецкий Ф.П. Характеристика современных технологий печатных плат. / Ф.П. Галецкий // Технологическое оборудование и материалы. - 2000. - №12. - С. 16-20.

75. Kirov D.A. A methodology for design space exploration of real-time location systems / D.A. Kirov, R. Passerone, A.A. Ozhiganov // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2015. - Т. 15. - № 4. - С. 551-567.

76. Шимкович А. А. Конструирование несущих конструкций РЭС и защита их от дестабилизирующих факторов: учеб. пособие в 2 ч./ А.А. Шимкович. - Минск: БГУИР, 1999. - 166 с.

77. Kim I. A Study on Thermal Fatigue Behavior of BGA Package, Master's Thesis, MME04018, KAIST (Daejeon, 2004).

78. Смирнов К.К. Проблемы применения металлополимерных корпусов BGA / К.К. Смирнов, А.Г. Сухов, А.С. Цимбалов // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. - 2013. - Т. 3. - № 2. - С. 99-103.

79. Компоновка и конструкции микроэлектронной аппаратуры / П.И. Овсицер, И.И. Лившиц, А.К. Орчинский и др. // Компоновка и конструкции РАЭ; под ред. Б.Ф. Высоцкого, В.Б. Пестрякова, О.А. Пятлина. - М.: Радио и связь, 1982.

- 208 с.


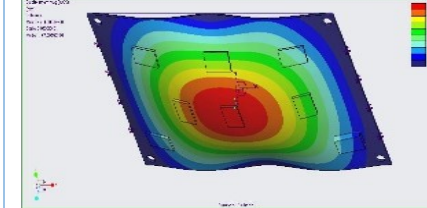
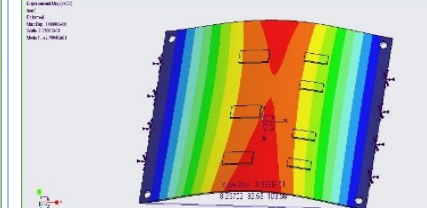
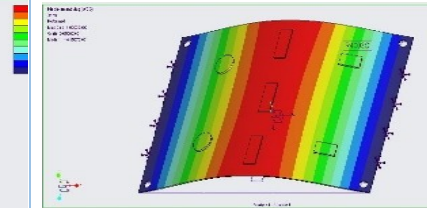
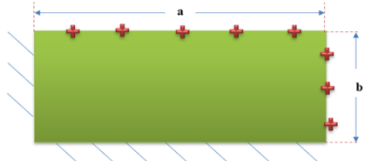
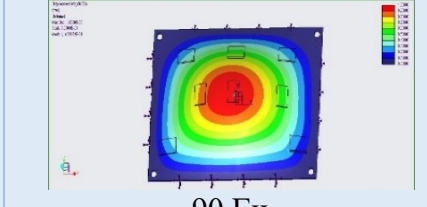
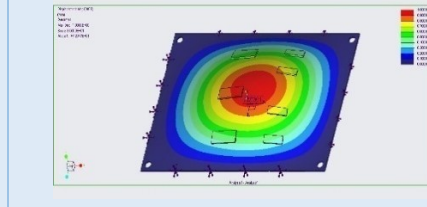
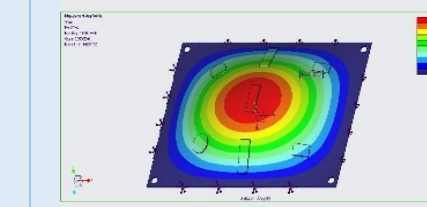
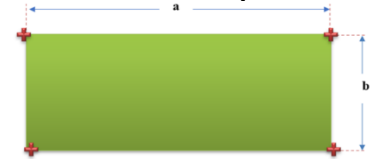
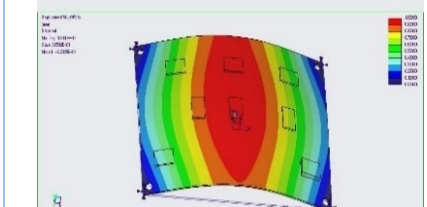
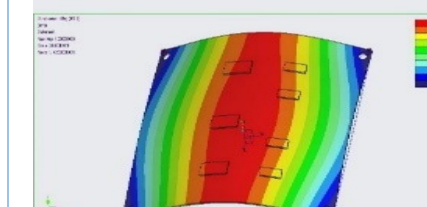
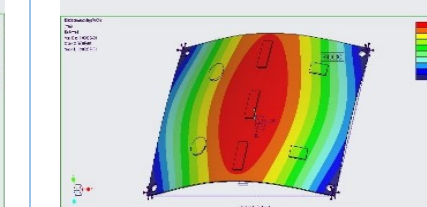
80. Способ выбора оптимального расположения компонентов на многослойных печатных платах / З.Х.М. Аль-Араджи, О.Ю. Макаров, А.В. Муратов, А.В. Турецкий, Ю.В. Худяков // Надежность и качество: труды Междунар. симпозиума. - Пенза, 2020, Т. 1, С. 197-199.

81. Башкиров А.В., Чирков О.Н. Учебно-методический комплекс дисциплины «Основы проектирования приборов и систем» [электронный ресурс] / А.В. Башкиров, О.Н. Чирков. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет, 2015.

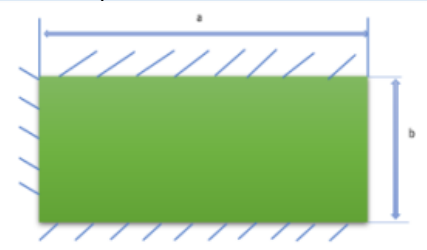
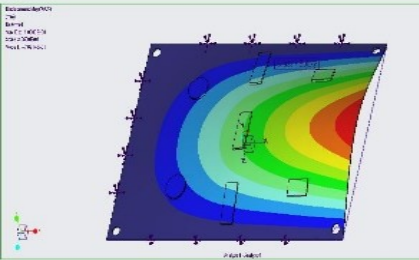
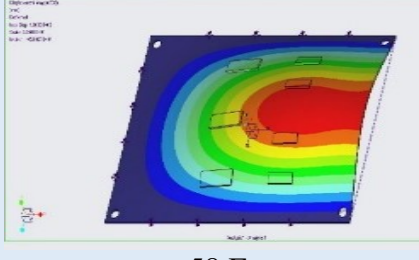
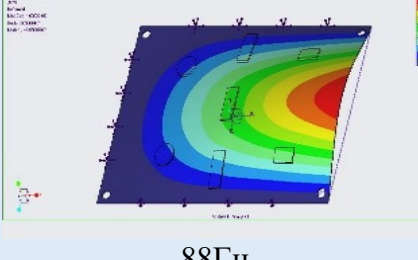

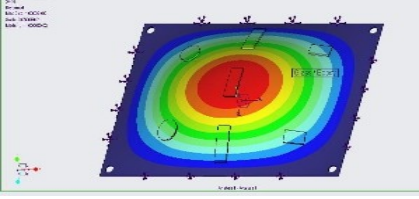
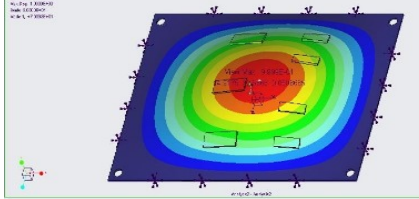
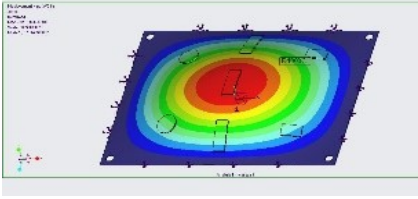
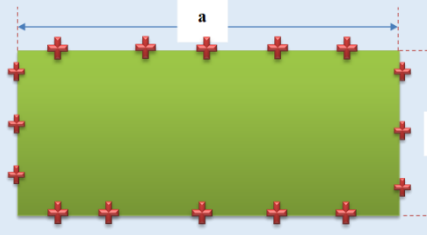
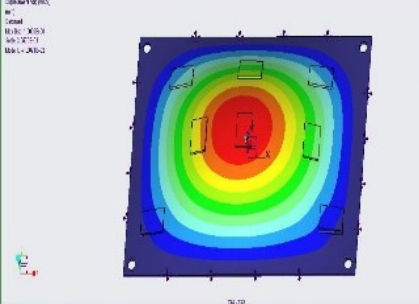
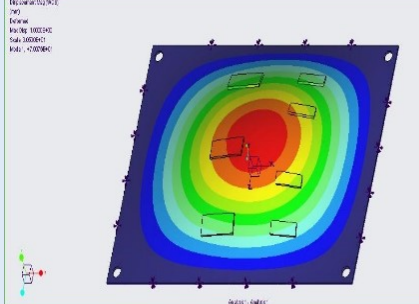
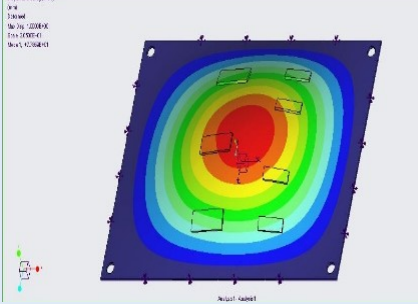
82. Экспериментальный модальный анализ летательных аппаратов на основе монофазных колебаний / В.А. Бернс, Е.П. Жуков, Д.А. Маринин, В.В. Маленкова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2018. - № 20 (4-1). - С. 43-54.

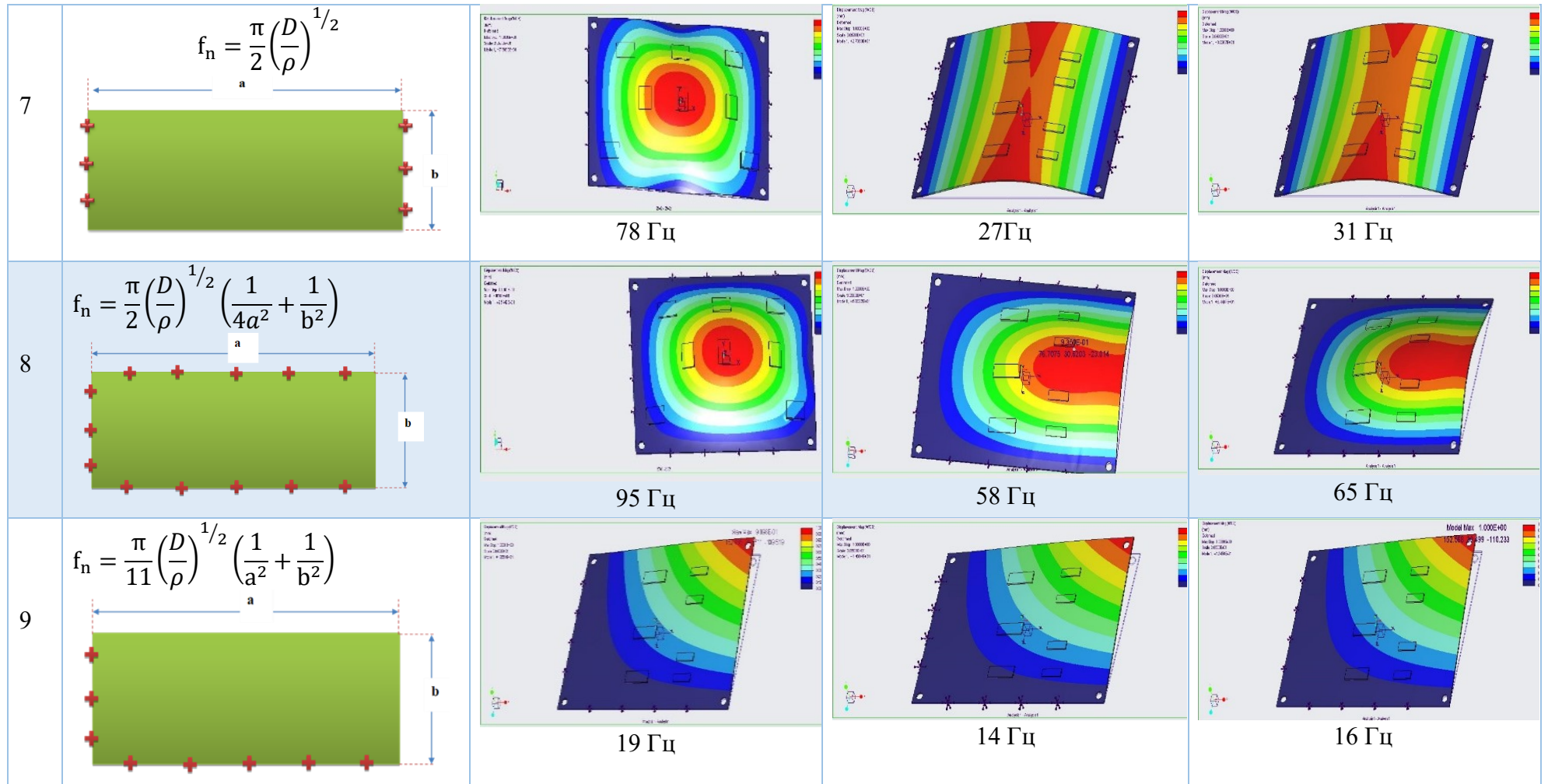
## ПРИЛОЖЕНИЕ А

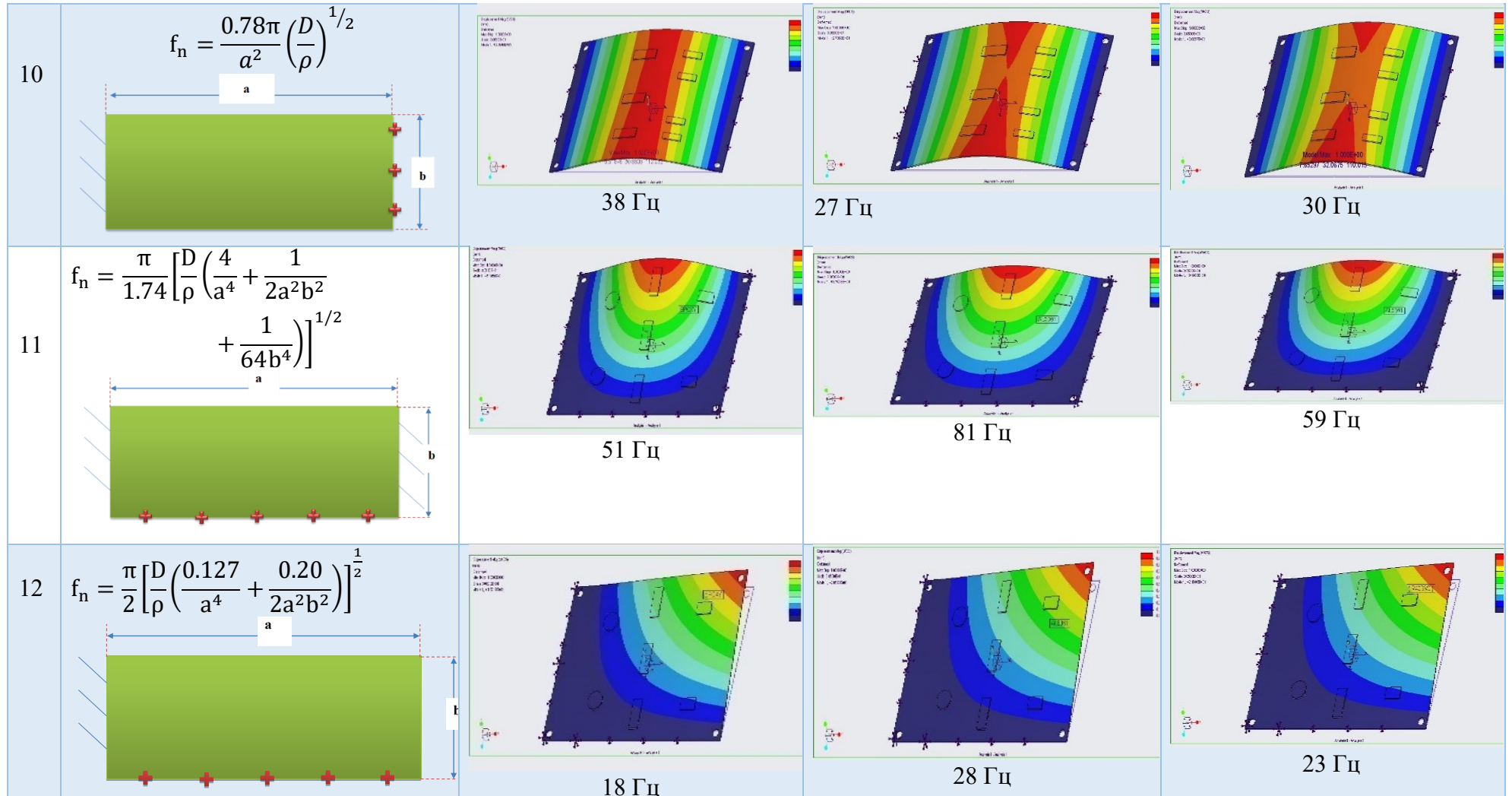
## Модальные характеристики МПП «кассетной» конструкции с разными схемами закрепления

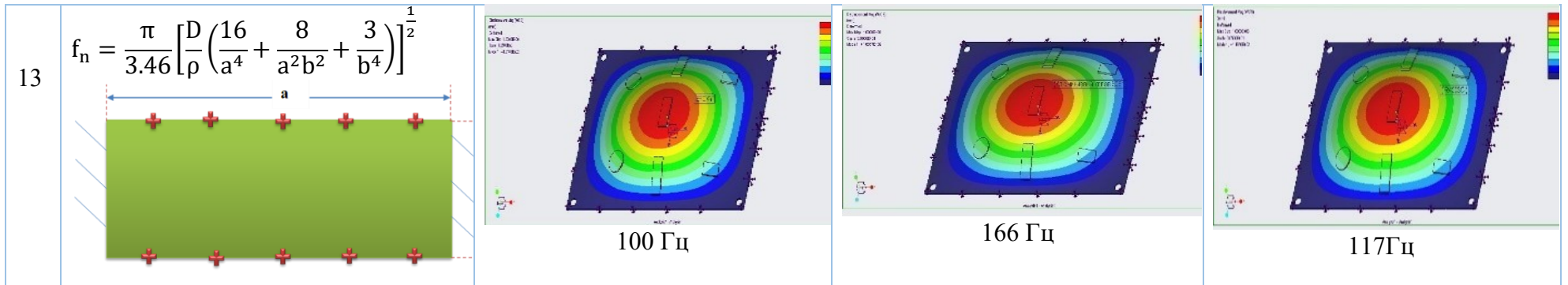
| Эскиз с граничными условиями  | Материал 1 Glass / Epoxy  | Материал 2 (Алюминиевый сплав 6061)  | Материал 3 (R4003C)  |
|---|---|--|--|
|   | Модуль Юнга - 18.14 ГПа.<br>Плотность – 1850кг/м3<br>Коэффициент Пуассона 0.12                    | Модуль Юнга - 68 ГПа.<br>Плотность – 27100 кг/м3<br>Коэффициент Пуассона 0.3                       | Модуль Юнга - 24 ГПа.<br>Плотность – 1790 кг/м3<br>Коэффициент Пуассона 0.118                      |
| <p>1</p> $f_n = \frac{3.55}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho}}$    |  <p>78 Гц</p>   |  <p>27 Гц</p>   |  <p>41 Гц</p>   |
| <p>2</p> $f_n = \frac{\pi}{2} \left[ \frac{D}{\rho} \left( \frac{2.45}{a^4} + \frac{2.68}{a^2 b^2} + \frac{2.45}{b^4} \right) \right]^{1/2}$  |  <p>90 Гц</p>   |  <p>72 Гц</p>   |  <p>114 Гц</p>  |
| <p>3</p> $f_n = \frac{\pi}{2a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho}}$    |  <p>33 Гц</p> |  <p>20 Гц</p> |  <p>29 Гц</p> |



|          |  |   |   |   |
|----------|--|---|---|---|
| <p>4</p> | $f_n = \frac{\pi}{3} \left[ \frac{D}{\rho} \left( \frac{0.75}{a^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{12}{b^4} \right) \right]^{1/2}$  |  <p>79 Гц</p>   |  <p>58 Гц</p>  |  <p>88 Гц</p>  |
| <p>5</p> | $f_n = \frac{\pi}{1.5} \left[ \frac{D}{\rho} \left( \frac{3}{a^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{3}{b^4} \right) \right]^{1/2}$    |  <p>100 Гц</p>  |  <p>70 Гц</p>  |  <p>114 Гц</p> |
| <p>6</p> | $f_n = \frac{\pi}{2} \left( \frac{D}{\rho} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)$                         |  <p>100 Гц</p> |  <p>70 Гц</p> |  <p>78 Гц</p> |







**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**Экспериментальные данные вибрационного анализа МПП**

|                                       |    |    |         |         |    |    |         |         |
|---------------------------------------|----|----|---------|---------|----|----|---------|---------|
| SineTestResults                       | 20 | 20 | 1.99079 | 1.76193 | 50 | 50 | 2.00712 | 2.14241 |
| Object:                               | 21 | 21 | 2.00790 | 1.97774 | 51 | 51 | 1.99263 | 2.47565 |
| TEST                                  | 22 | 22 | 1.98809 | 1.80460 | 52 | 52 | 2.01964 | 2.42467 |
| TaskFile:                             | 23 | 23 | 2.01055 | 1.77432 | 53 | 53 | 1.92475 | 2.25165 |
| C:\VIBRO\SINE_F\TASK\_225000          | 24 | 24 | 1.99530 | 1.77417 | 54 | 54 | 2.00479 | 2.22286 |
| 1.SF                                  | 25 | 25 | 2.00460 | 1.87428 | 55 | 55 | 1.91939 | 2.45934 |
| Spertrum - g^2, ampl - g, phase - rad | 26 | 26 | 2.01598 | 1.86360 | 56 | 56 | 1.91377 | 2.24110 |
|                                       | 27 | 27 | 1.99724 | 1.81410 | 57 | 57 | 2.02767 | 2.31617 |
| 735 - point number                    | 28 | 28 | 2.04442 | 1.75699 | 58 | 58 | 2.05998 | 2.34021 |
| 1 Гц - frequency band                 | 29 | 29 | 2.00200 | 1.76585 | 59 | 59 | 2.09770 | 2.17668 |
| n Fr[Гц] 1ch Sin 2ch Sin              | 30 | 30 | 1.99573 | 1.85977 | 60 | 60 | 1.92476 | 2.30948 |
| 1 1 0.00000 0.00000                   | 31 | 31 | 1.97913 | 1.96126 | 61 | 61 | 2.06293 | 2.05141 |
| 2 2 0.00000 0.00000                   | 32 | 32 | 1.98004 | 1.88393 | 62 | 62 | 1.91644 | 2.17922 |
| 3 3 0.00000 0.00000                   | 33 | 33 | 2.03553 | 2.11489 | 63 | 63 | 1.93691 | 2.12377 |
| 4 4 0.00000 0.00000                   | 34 | 34 | 2.01245 | 2.21091 | 64 | 64 | 2.05509 | 2.27812 |
| 5 5 0.24159 0.20476                   | 35 | 35 | 1.96846 | 2.26413 | 65 | 65 | 2.05422 | 2.31100 |
| 6 6 0.33723 0.33194                   | 36 | 36 | 2.02310 | 2.39750 | 66 | 66 | 2.06941 | 2.26654 |
| 7 7 0.44100 0.42302                   | 37 | 37 | 2.05095 | 2.17808 | 67 | 67 | 2.01974 | 2.25695 |
| 8 8 0.55667 0.54809                   | 38 | 38 | 1.96571 | 2.03081 | 68 | 68 | 2.03468 | 2.26623 |
| 9 9 0.70865 0.65380                   | 39 | 39 | 1.97065 | 2.21376 | 69 | 69 | 1.94986 | 2.25067 |
| 10 10 0.89022 0.87316                 | 40 | 40 | 2.06855 | 2.25350 | 70 | 70 | 2.05875 | 2.19855 |
| 11 11 1.03923 1.06595                 | 41 | 41 | 1.96635 | 2.15662 | 71 | 71 | 2.02380 | 2.13119 |
| 12 12 1.23767 1.23796                 | 42 | 42 | 2.06401 | 1.82301 | 72 | 72 | 2.05905 | 2.14479 |
| 13 13 1.37182 1.42613                 | 43 | 43 | 2.04441 | 2.00442 | 73 | 73 | 1.95032 | 2.14807 |
| 14 14 1.66084 1.79782                 | 44 | 44 | 2.02419 | 2.17680 | 74 | 74 | 1.92012 | 1.98306 |
| 15 15 1.91217 2.03443                 | 45 | 45 | 2.08018 | 2.01727 | 75 | 75 | 2.05338 | 1.86084 |
| 16 16 1.99577 2.11113                 | 46 | 46 | 2.04126 | 2.11769 | 76 | 76 | 2.00137 | 1.78040 |
| 17 17 2.00457 2.27528                 | 47 | 47 | 1.93049 | 2.18787 | 77 | 77 | 2.06529 | 1.48737 |
| 18 18 1.99487 2.14523                 | 48 | 48 | 1.98912 | 2.33134 | 78 | 78 | 2.00320 | 1.32269 |
| 19 19 1.98523 1.94801                 | 49 | 49 | 2.00565 | 2.03824 | 79 | 79 | 2.08959 | 3.81054 |

|     |     |         |          |     |     |         |          |     |     |         |          |
|-----|-----|---------|----------|-----|-----|---------|----------|-----|-----|---------|----------|
| 80  | 80  | 2.12384 | 4.40516  | 113 | 113 | 1.90345 | 7.86828  | 146 | 146 | 1.95054 | 13.45937 |
| 81  | 81  | 2.06048 | 4.33848  | 114 | 114 | 1.92114 | 9.43973  | 147 | 147 | 2.00272 | 12.14827 |
| 82  | 82  | 2.01093 | 3.78465  | 115 | 115 | 2.06249 | 9.44084  | 148 | 148 | 1.99130 | 9.84749  |
| 83  | 83  | 1.93465 | 3.47293  | 116 | 116 | 1.97952 | 9.92655  | 149 | 149 | 1.95398 | 10.21233 |
| 84  | 84  | 1.97477 | 3.40864  | 117 | 117 | 1.97399 | 11.06736 | 150 | 150 | 1.99315 | 9.14103  |
| 85  | 85  | 1.99765 | 3.37726  | 118 | 118 | 1.94169 | 11.74008 | 151 | 151 | 2.03271 | 8.42093  |
| 86  | 86  | 2.02787 | 3.18078  | 119 | 119 | 1.91594 | 11.65855 | 152 | 152 | 1.99702 | 13.38204 |
| 87  | 87  | 2.07004 | 3.07848  | 120 | 120 | 2.12966 | 13.52405 | 153 | 153 | 1.97265 | 8.20411  |
| 88  | 88  | 1.98895 | 2.69244  | 121 | 121 | 1.99621 | 13.78495 | 154 | 154 | 2.04404 | 10.75243 |
| 89  | 89  | 1.98790 | 2.66739  | 122 | 122 | 2.11429 | 15.29992 | 155 | 155 | 1.98055 | 9.81551  |
| 90  | 90  | 2.03189 | 2.46117  | 123 | 123 | 2.01109 | 17.60911 | 156 | 156 | 1.96406 | 8.95641  |
| 91  | 91  | 1.96310 | 2.15160  | 124 | 124 | 1.85182 | 20.37181 | 157 | 157 | 2.01755 | 9.09921  |
| 92  | 92  | 2.00667 | 2.11216  | 125 | 125 | 1.95280 | 24.60711 | 158 | 158 | 1.98877 | 8.34992  |
| 93  | 93  | 1.98254 | 2.96621  | 126 | 126 | 1.90593 | 30.65342 | 159 | 159 | 2.01549 | 8.22947  |
| 94  | 94  | 2.04409 | 8.68289  | 127 | 127 | 1.98921 | 27.43341 | 160 | 160 | 2.03222 | 7.25715  |
| 95  | 95  | 2.04972 | 18.12952 | 128 | 128 | 1.97928 | 27.48388 | 161 | 161 | 2.01423 | 6.96643  |
| 96  | 96  | 2.05129 | 14.15024 | 129 | 129 | 2.04412 | 26.40235 | 162 | 162 | 2.00134 | 7.38937  |
| 97  | 97  | 2.06052 | 11.80597 | 130 | 130 | 1.97025 | 23.88872 | 163 | 163 | 2.04226 | 6.77625  |
| 98  | 98  | 2.04812 | 10.10353 | 131 | 131 | 1.93826 | 20.66905 | 164 | 164 | 1.97588 | 6.49488  |
| 99  | 99  | 1.92845 | 7.84684  | 132 | 132 | 2.03500 | 17.13178 | 165 | 165 | 2.00852 | 5.76172  |
| 100 | 100 | 1.99953 | 8.48913  | 133 | 133 | 2.03318 | 13.25452 | 166 | 166 | 2.01442 | 5.68673  |
| 101 | 101 | 1.87583 | 7.96823  | 134 | 134 | 1.94278 | 10.14217 | 167 | 167 | 2.01719 | 5.13762  |
| 102 | 102 | 1.95842 | 7.58514  | 135 | 135 | 1.98899 | 8.46323  | 168 | 168 | 1.96676 | 5.10141  |
| 103 | 103 | 1.98066 | 7.04439  | 136 | 136 | 2.02104 | 7.39172  | 169 | 169 | 2.02679 | 4.96634  |
| 104 | 104 | 1.99452 | 7.31251  | 137 | 137 | 1.95252 | 6.06416  | 170 | 170 | 2.01978 | 4.59243  |
| 105 | 105 | 2.06834 | 7.45397  | 138 | 138 | 2.03443 | 7.52186  | 171 | 171 | 2.01892 | 4.66628  |
| 106 | 106 | 2.14260 | 7.81627  | 139 | 139 | 2.01602 | 9.43192  | 172 | 172 | 2.01732 | 4.89251  |
| 107 | 107 | 2.06167 | 6.82261  | 140 | 140 | 2.01397 | 14.52937 | 173 | 173 | 1.96235 | 4.19978  |
| 108 | 108 | 1.88206 | 7.75118  | 141 | 141 | 2.03001 | 17.27442 | 174 | 174 | 2.02668 | 3.78829  |
| 109 | 109 | 2.06491 | 8.17796  | 142 | 142 | 1.99106 | 20.98306 | 175 | 175 | 2.04814 | 3.61147  |
| 110 | 110 | 1.95579 | 8.35101  | 143 | 143 | 2.03858 | 20.02489 | 176 | 176 | 1.99172 | 3.68802  |
| 111 | 111 | 1.94669 | 9.31503  | 144 | 144 | 2.02877 | 17.64637 | 177 | 177 | 1.99587 | 3.12422  |
| 112 | 112 | 2.05545 | 8.96553  | 145 | 145 | 2.02439 | 15.02333 | 178 | 178 | 1.97853 | 3.72584  |

|     |     |         |         |     |     |         |         |     |     |         |         |
|-----|-----|---------|---------|-----|-----|---------|---------|-----|-----|---------|---------|
| 179 | 179 | 1.99179 | 3.44237 | 212 | 212 | 2.01944 | 1.01344 | 245 | 245 | 2.01027 | 2.63552 |
| 180 | 180 | 1.97991 | 3.53186 | 213 | 213 | 2.00973 | 1.38067 | 246 | 246 | 2.04205 | 2.51977 |
| 181 | 181 | 2.00021 | 3.13839 | 214 | 214 | 1.96416 | 1.10312 | 247 | 247 | 1.99317 | 2.62823 |
| 182 | 182 | 1.97067 | 2.69060 | 215 | 215 | 1.99022 | 0.99932 | 248 | 248 | 2.01954 | 2.71183 |
| 183 | 183 | 2.02837 | 2.97246 | 216 | 216 | 1.98778 | 0.86597 | 249 | 249 | 2.00561 | 2.36627 |
| 184 | 184 | 1.99207 | 2.92594 | 217 | 217 | 1.97174 | 0.66698 | 250 | 250 | 1.99946 | 2.60382 |
| 185 | 185 | 2.02505 | 2.83984 | 218 | 218 | 1.96530 | 1.15177 | 251 | 251 | 1.95959 | 2.16741 |
| 186 | 186 | 1.99387 | 2.75315 | 219 | 219 | 2.04642 | 0.71654 | 252 | 252 | 1.97503 | 2.22354 |
| 187 | 187 | 1.98872 | 2.57258 | 220 | 220 | 2.02259 | 0.63658 | 253 | 253 | 2.01339 | 2.45349 |
| 188 | 188 | 1.96529 | 2.31508 | 221 | 221 | 1.98218 | 0.60517 | 254 | 254 | 2.00575 | 2.11554 |
| 189 | 189 | 1.97743 | 2.62398 | 222 | 222 | 2.02474 | 0.65614 | 255 | 255 | 2.00775 | 2.28235 |
| 190 | 190 | 1.97706 | 2.35940 | 223 | 223 | 1.96355 | 0.77105 | 256 | 256 | 2.01112 | 2.14114 |
| 191 | 191 | 2.03884 | 2.15133 | 224 | 224 | 2.01947 | 1.01163 | 257 | 257 | 2.00321 | 2.12919 |
| 192 | 192 | 1.98522 | 2.05430 | 225 | 225 | 2.04187 | 1.33249 | 258 | 258 | 2.03829 | 2.10192 |
| 193 | 193 | 2.01513 | 1.96756 | 226 | 226 | 2.00601 | 1.97957 | 259 | 259 | 1.98352 | 2.08301 |
| 194 | 194 | 2.00919 | 2.09358 | 227 | 227 | 1.98627 | 2.74565 | 260 | 260 | 2.04208 | 1.98007 |
| 195 | 195 | 1.99027 | 2.04062 | 228 | 228 | 1.99762 | 4.18207 | 261 | 261 | 1.97317 | 2.26238 |
| 196 | 196 | 1.96540 | 1.67788 | 229 | 229 | 1.99288 | 5.16062 | 262 | 262 | 2.02916 | 2.01951 |
| 197 | 197 | 1.98389 | 1.81714 | 230 | 230 | 2.00715 | 6.47305 | 263 | 263 | 2.06090 | 1.98314 |
| 198 | 198 | 1.98746 | 1.63065 | 231 | 231 | 2.02446 | 7.06177 | 264 | 264 | 2.02194 | 1.99142 |
| 199 | 199 | 2.01618 | 1.95789 | 232 | 232 | 1.99575 | 6.90362 | 265 | 265 | 2.01499 | 1.96029 |
| 200 | 200 | 2.02363 | 1.83868 | 233 | 233 | 2.01162 | 5.81937 | 266 | 266 | 2.00020 | 1.75595 |
| 201 | 201 | 1.98062 | 1.57642 | 234 | 234 | 1.99489 | 5.10229 | 267 | 267 | 2.03364 | 2.02426 |
| 202 | 202 | 2.01618 | 1.42754 | 235 | 235 | 1.97366 | 4.77183 | 268 | 268 | 1.95829 | 1.92283 |
| 203 | 203 | 1.99582 | 1.82443 | 236 | 236 | 1.95877 | 4.47075 | 269 | 269 | 1.96773 | 2.08538 |
| 204 | 204 | 1.99268 | 1.56864 | 237 | 237 | 1.98261 | 4.18205 | 270 | 270 | 1.98382 | 2.39373 |
| 205 | 205 | 1.98059 | 1.38280 | 238 | 238 | 2.01209 | 3.89183 | 271 | 271 | 1.96771 | 1.77343 |
| 206 | 206 | 1.99138 | 1.65958 | 239 | 239 | 1.99841 | 3.57989 | 272 | 272 | 1.98373 | 1.05679 |
| 207 | 207 | 1.99503 | 1.70182 | 240 | 240 | 1.97914 | 3.20840 | 273 | 273 | 2.00054 | 1.02527 |
| 208 | 208 | 1.98068 | 1.34749 | 241 | 241 | 2.00930 | 3.28161 | 274 | 274 | 1.96666 | 0.52672 |
| 209 | 209 | 2.01708 | 0.99755 | 242 | 242 | 2.01813 | 3.12891 | 275 | 275 | 2.01465 | 1.12356 |
| 210 | 210 | 2.03817 | 1.24309 | 243 | 243 | 2.02109 | 3.06595 | 276 | 276 | 2.00749 | 0.99505 |
| 211 | 211 | 1.97677 | 0.99429 | 244 | 244 | 1.97886 | 2.78509 | 277 | 277 | 2.01971 | 1.25502 |

|     |     |         |         |     |     |         |         |     |     |         |         |
|-----|-----|---------|---------|-----|-----|---------|---------|-----|-----|---------|---------|
| 278 | 278 | 1.99783 | 1.37867 | 311 | 311 | 1.98908 | 0.81667 | 344 | 344 | 2.00614 | 1.18439 |
| 279 | 279 | 2.01119 | 1.10263 | 312 | 312 | 2.06231 | 1.13816 | 345 | 345 | 2.01502 | 1.37155 |
| 280 | 280 | 2.00226 | 1.02426 | 313 | 313 | 2.00831 | 1.13720 | 346 | 346 | 2.01066 | 1.61967 |
| 281 | 281 | 2.05351 | 1.21042 | 314 | 314 | 1.98942 | 1.15424 | 347 | 347 | 2.01848 | 1.66642 |
| 282 | 282 | 1.99959 | 0.90784 | 315 | 315 | 2.01400 | 0.62961 | 348 | 348 | 1.92934 | 1.91028 |
| 283 | 283 | 1.97971 | 1.21300 | 316 | 316 | 2.02396 | 0.32312 | 349 | 349 | 2.06088 | 1.71054 |
| 284 | 284 | 2.00830 | 1.29909 | 317 | 317 | 2.01067 | 0.81149 | 350 | 350 | 2.00735 | 2.06561 |
| 285 | 285 | 1.96864 | 1.66964 | 318 | 318 | 1.94960 | 0.35072 | 351 | 351 | 2.07199 | 2.57634 |
| 286 | 286 | 1.94941 | 0.89428 | 319 | 319 | 2.00190 | 0.58227 | 352 | 352 | 1.98213 | 2.58314 |
| 287 | 287 | 2.01902 | 1.70824 | 320 | 320 | 1.91894 | 1.08161 | 353 | 353 | 1.99436 | 3.39443 |
| 288 | 288 | 1.97893 | 1.37999 | 321 | 321 | 1.94366 | 1.07814 | 354 | 354 | 2.09129 | 4.57111 |
| 289 | 289 | 1.97534 | 1.54243 | 322 | 322 | 1.98272 | 0.64659 | 355 | 355 | 2.00274 | 6.08484 |
| 290 | 290 | 1.98646 | 1.51214 | 323 | 323 | 2.06809 | 0.89291 | 356 | 356 | 2.00029 | 5.88634 |
| 291 | 291 | 1.99063 | 1.43854 | 324 | 324 | 2.06747 | 1.13957 | 357 | 357 | 1.98393 | 5.52769 |
| 292 | 292 | 1.98895 | 1.34071 | 325 | 325 | 2.07639 | 0.75804 | 358 | 358 | 2.00520 | 6.28104 |
| 293 | 293 | 2.00642 | 1.09763 | 326 | 326 | 2.00027 | 0.74684 | 359 | 359 | 2.00958 | 6.00412 |
| 294 | 294 | 2.02992 | 1.47180 | 327 | 327 | 2.02004 | 1.20878 | 360 | 360 | 2.01062 | 8.04007 |
| 295 | 295 | 2.00894 | 0.88430 | 328 | 328 | 2.01331 | 0.82918 | 361 | 361 | 2.01167 | 6.17573 |
| 296 | 296 | 2.03728 | 1.41608 | 329 | 329 | 2.00774 | 0.84099 | 362 | 362 | 1.93431 | 6.57866 |
| 297 | 297 | 2.02205 | 1.26168 | 330 | 330 | 1.92227 | 1.04838 | 363 | 363 | 1.99902 | 5.64770 |
| 298 | 298 | 2.03781 | 1.31006 | 331 | 331 | 2.00462 | 0.83787 | 364 | 364 | 1.92827 | 6.01431 |
| 299 | 299 | 1.97701 | 1.01896 | 332 | 332 | 2.00990 | 0.61454 | 365 | 365 | 1.96500 | 5.11728 |
| 300 | 300 | 2.01663 | 1.07288 | 333 | 333 | 1.94140 | 0.76623 | 366 | 366 | 2.00408 | 4.91625 |
| 301 | 301 | 1.98809 | 1.05264 | 334 | 334 | 1.93402 | 0.54521 | 367 | 367 | 1.99882 | 3.48692 |
| 302 | 302 | 2.02362 | 1.11343 | 335 | 335 | 1.97183 | 0.86595 | 368 | 368 | 2.09094 | 3.56261 |
| 303 | 303 | 2.01311 | 1.47454 | 336 | 336 | 2.08211 | 0.74013 | 369 | 369 | 2.00244 | 3.50789 |
| 304 | 304 | 1.99478 | 1.43372 | 337 | 337 | 2.08321 | 1.03309 | 370 | 370 | 1.98893 | 3.31280 |
| 305 | 305 | 1.92027 | 0.94650 | 338 | 338 | 1.98434 | 1.05759 | 371 | 371 | 2.01419 | 3.03128 |
| 306 | 306 | 2.02275 | 1.01052 | 339 | 339 | 2.02112 | 1.01766 | 372 | 372 | 2.00481 | 3.75992 |
| 307 | 307 | 1.95136 | 1.17877 | 340 | 340 | 2.00432 | 1.01838 | 373 | 373 | 1.98469 | 3.33200 |
| 308 | 308 | 2.02221 | 1.31298 | 341 | 341 | 2.01913 | 1.20761 | 374 | 374 | 2.02051 | 3.37030 |
| 309 | 309 | 2.03732 | 1.02968 | 342 | 342 | 2.01570 | 0.95734 | 375 | 375 | 1.97943 | 3.87719 |
| 310 | 310 | 2.06097 | 1.00680 | 343 | 343 | 1.99889 | 1.52227 | 376 | 376 | 2.00428 | 4.25570 |



|     |     |         |         |     |     |         |         |     |     |         |         |
|-----|-----|---------|---------|-----|-----|---------|---------|-----|-----|---------|---------|
| 377 | 377 | 2.00280 | 4.09553 | 410 | 410 | 2.00310 | 2.67770 | 443 | 443 | 2.03754 | 2.49013 |
| 378 | 378 | 2.01677 | 4.83975 | 411 | 411 | 2.01144 | 3.08050 | 444 | 444 | 2.05278 | 2.30099 |
| 379 | 379 | 1.90806 | 4.53866 | 412 | 412 | 2.02101 | 2.74744 | 445 | 445 | 1.98872 | 2.67782 |
| 380 | 380 | 1.92290 | 3.97347 | 413 | 413 | 2.00195 | 2.90188 | 446 | 446 | 2.00980 | 2.87886 |
| 381 | 381 | 2.03669 | 4.20161 | 414 | 414 | 2.01495 | 2.80674 | 447 | 447 | 1.99094 | 2.45589 |
| 382 | 382 | 2.07882 | 3.72497 | 415 | 415 | 1.91840 | 2.63406 | 448 | 448 | 1.98750 | 3.13087 |
| 383 | 383 | 1.99327 | 3.86061 | 416 | 416 | 2.03957 | 2.48545 | 449 | 449 | 1.99404 | 2.98949 |
| 384 | 384 | 1.98703 | 3.80080 | 417 | 417 | 2.02728 | 2.50525 | 450 | 450 | 2.00698 | 2.67466 |
| 385 | 385 | 1.98439 | 4.03549 | 418 | 418 | 1.90546 | 2.44332 | 451 | 451 | 2.02620 | 3.08603 |
| 386 | 386 | 2.08981 | 3.80825 | 419 | 419 | 1.91141 | 2.36850 | 452 | 452 | 2.00599 | 2.80895 |
| 387 | 387 | 1.98792 | 4.02644 | 420 | 420 | 2.03615 | 1.96902 | 453 | 453 | 1.97756 | 3.09393 |
| 388 | 388 | 2.02184 | 3.98291 | 421 | 421 | 2.06723 | 2.27817 | 454 | 454 | 2.02898 | 2.61110 |
| 389 | 389 | 1.99114 | 3.87200 | 422 | 422 | 2.09644 | 2.28877 | 455 | 455 | 1.98679 | 2.49707 |
| 390 | 390 | 2.00025 | 3.37358 | 423 | 423 | 2.00047 | 2.39197 | 456 | 456 | 2.01192 | 2.64697 |
| 391 | 391 | 1.90559 | 3.17906 | 424 | 424 | 1.99202 | 2.16105 | 457 | 457 | 2.02612 | 2.73829 |
| 392 | 392 | 2.00144 | 3.33328 | 425 | 425 | 2.00165 | 2.52641 | 458 | 458 | 2.02219 | 2.75725 |
| 393 | 393 | 1.89366 | 3.35027 | 426 | 426 | 1.98963 | 2.20376 | 459 | 459 | 1.91202 | 2.23896 |
| 394 | 394 | 1.91508 | 3.27881 | 427 | 427 | 1.99492 | 2.12311 | 460 | 460 | 1.99592 | 2.41414 |
| 395 | 395 | 2.01716 | 3.31740 | 428 | 428 | 1.96275 | 2.13496 | 461 | 461 | 2.00060 | 2.54545 |
| 396 | 396 | 2.01701 | 2.99770 | 429 | 429 | 2.01178 | 2.24361 | 462 | 462 | 2.00145 | 2.63475 |
| 397 | 397 | 1.89853 | 2.99739 | 430 | 430 | 2.01209 | 2.09084 | 463 | 463 | 1.91474 | 3.63519 |
| 398 | 398 | 1.90737 | 3.24989 | 431 | 431 | 2.01604 | 1.94172 | 464 | 464 | 1.94278 | 2.44955 |
| 399 | 399 | 2.01872 | 3.33655 | 432 | 432 | 2.00871 | 2.30910 | 465 | 465 | 1.95834 | 2.03456 |
| 400 | 400 | 2.04888 | 3.59671 | 433 | 433 | 2.01485 | 1.69808 | 466 | 466 | 2.02516 | 3.45504 |
| 401 | 401 | 2.08155 | 3.19055 | 434 | 434 | 2.02191 | 2.01168 | 467 | 467 | 2.01969 | 2.40041 |
| 402 | 402 | 2.08138 | 3.25335 | 435 | 435 | 2.01510 | 1.71751 | 468 | 468 | 1.98004 | 3.15873 |
| 403 | 403 | 1.99088 | 3.11075 | 436 | 436 | 2.00788 | 2.09128 | 469 | 469 | 2.09674 | 2.51782 |
| 404 | 404 | 2.01297 | 2.84578 | 437 | 437 | 1.99633 | 1.98988 | 470 | 470 | 1.99705 | 2.53709 |
| 405 | 405 | 1.98324 | 3.19053 | 438 | 438 | 1.92160 | 1.63396 | 471 | 471 | 1.99103 | 3.57108 |
| 406 | 406 | 1.99355 | 3.01775 | 439 | 439 | 2.00103 | 1.98116 | 472 | 472 | 2.01764 | 4.09775 |
| 407 | 407 | 2.02354 | 2.90344 | 440 | 440 | 1.99375 | 2.05553 | 473 | 473 | 2.06105 | 2.33339 |
| 408 | 408 | 1.99933 | 2.87366 | 441 | 441 | 2.01613 | 1.87543 | 474 | 474 | 1.97486 | 2.36061 |
| 409 | 409 | 2.02338 | 3.19048 | 442 | 442 | 1.91419 | 2.29993 | 475 | 475 | 2.08167 | 2.84724 |

|     |     |         |         |     |     |         |         |     |     |         |         |
|-----|-----|---------|---------|-----|-----|---------|---------|-----|-----|---------|---------|
| 476 | 476 | 1.99993 | 2.20990 | 509 | 509 | 0.00000 | 0.00000 | 542 | 542 | 0.00000 | 0.00000 |
| 477 | 477 | 1.94722 | 1.62143 | 510 | 510 | 0.00000 | 0.00000 | 543 | 543 | 0.00000 | 0.00000 |
| 478 | 478 | 1.98731 | 2.02166 | 511 | 511 | 0.00000 | 0.00000 | 544 | 544 | 0.00000 | 0.00000 |
| 479 | 479 | 2.00158 | 3.07160 | 512 | 512 | 0.00000 | 0.00000 | 545 | 545 | 0.00000 | 0.00000 |
| 480 | 480 | 2.00409 | 1.95676 | 513 | 513 | 0.00000 | 0.00000 | 546 | 546 | 0.00000 | 0.00000 |
| 481 | 481 | 2.01876 | 1.54405 | 514 | 514 | 0.00000 | 0.00000 | 547 | 547 | 0.00000 | 0.00000 |
| 482 | 482 | 2.02513 | 0.90081 | 515 | 515 | 0.00000 | 0.00000 | 548 | 548 | 0.00000 | 0.00000 |
| 483 | 483 | 2.02166 | 2.22942 | 516 | 516 | 0.00000 | 0.00000 | 549 | 549 | 0.00000 | 0.00000 |
| 484 | 484 | 2.00471 | 1.65834 | 517 | 517 | 0.00000 | 0.00000 | 550 | 550 | 0.00000 | 0.00000 |
| 485 | 485 | 2.02328 | 2.33895 | 518 | 518 | 0.00000 | 0.00000 | 551 | 551 | 0.00000 | 0.00000 |
| 486 | 486 | 1.93769 | 1.87282 | 519 | 519 | 0.00000 | 0.00000 | 552 | 552 | 0.00000 | 0.00000 |
| 487 | 487 | 1.98955 | 2.40125 | 520 | 520 | 0.00000 | 0.00000 | 553 | 553 | 0.00000 | 0.00000 |
| 488 | 488 | 2.02143 | 1.41248 | 521 | 521 | 0.00000 | 0.00000 | 554 | 554 | 0.00000 | 0.00000 |
| 489 | 489 | 1.99971 | 2.40115 | 522 | 522 | 0.00000 | 0.00000 | 555 | 555 | 0.00000 | 0.00000 |
| 490 | 490 | 2.01566 | 1.60127 | 523 | 523 | 0.00000 | 0.00000 | 556 | 556 | 0.00000 | 0.00000 |
| 491 | 491 | 2.02571 | 0.22521 | 524 | 524 | 0.00000 | 0.00000 | 557 | 557 | 0.00000 | 0.00000 |
| 492 | 492 | 1.93916 | 1.45307 | 525 | 525 | 0.00000 | 0.00000 | 558 | 558 | 0.00000 | 0.00000 |
| 493 | 493 | 1.95228 | 1.44120 | 526 | 526 | 0.00000 | 0.00000 | 559 | 559 | 0.00000 | 0.00000 |
| 494 | 494 | 1.99138 | 1.08276 | 527 | 527 | 0.00000 | 0.00000 | 560 | 560 | 0.00000 | 0.00000 |
| 495 | 495 | 1.98939 | 1.44214 | 528 | 528 | 0.00000 | 0.00000 | 561 | 561 | 0.00000 | 0.00000 |
| 496 | 496 | 1.96222 | 1.76173 | 529 | 529 | 0.00000 | 0.00000 | 562 | 562 | 0.00000 | 0.00000 |
| 497 | 497 | 2.04001 | 2.05346 | 530 | 530 | 0.00000 | 0.00000 | 563 | 563 | 0.00000 | 0.00000 |
| 498 | 498 | 1.98305 | 1.76433 | 531 | 531 | 0.00000 | 0.00000 | 564 | 564 | 0.00000 | 0.00000 |
| 499 | 499 | 1.99898 | 1.08538 | 532 | 532 | 0.00000 | 0.00000 | 565 | 565 | 0.00000 | 0.00000 |
| 500 | 500 | 0.02778 | 0.08461 | 533 | 533 | 0.00000 | 0.00000 | 566 | 566 | 0.00000 | 0.00000 |
| 501 | 501 | 0.00000 | 0.00000 | 534 | 534 | 0.00000 | 0.00000 | 567 | 567 | 0.00000 | 0.00000 |
| 502 | 502 | 0.00000 | 0.00000 | 535 | 535 | 0.00000 | 0.00000 | 568 | 568 | 0.00000 | 0.00000 |
| 503 | 503 | 0.00000 | 0.00000 | 536 | 536 | 0.00000 | 0.00000 | 569 | 569 | 0.00000 | 0.00000 |
| 504 | 504 | 0.00000 | 0.00000 | 537 | 537 | 0.00000 | 0.00000 | 570 | 570 | 0.00000 | 0.00000 |
| 505 | 505 | 0.00000 | 0.00000 | 538 | 538 | 0.00000 | 0.00000 | 571 | 571 | 0.00000 | 0.00000 |
| 506 | 506 | 0.00000 | 0.00000 | 539 | 539 | 0.00000 | 0.00000 | 572 | 572 | 0.00000 | 0.00000 |
| 507 | 507 | 0.00000 | 0.00000 | 540 | 540 | 0.00000 | 0.00000 | 573 | 573 | 0.00000 | 0.00000 |
| 508 | 508 | 0.00000 | 0.00000 | 541 | 541 | 0.00000 | 0.00000 | 574 | 574 | 0.00000 | 0.00000 |

|     |     |         |         |
|-----|-----|---------|---------|
| 575 | 575 | 0.00000 | 0.00000 |
| 576 | 576 | 0.00000 | 0.00000 |
| 577 | 577 | 0.00000 | 0.00000 |
| 578 | 578 | 0.00000 | 0.00000 |
| 579 | 579 | 0.00000 | 0.00000 |
| 580 | 580 | 0.00000 | 0.00000 |
| 581 | 581 | 0.00000 | 0.00000 |
| 582 | 582 | 0.00000 | 0.00000 |
| 583 | 583 | 0.00000 | 0.00000 |
| 584 | 584 | 0.00000 | 0.00000 |
| 585 | 585 | 0.00000 | 0.00000 |
| 586 | 586 | 0.00000 | 0.00000 |
| 587 | 587 | 0.00000 | 0.00000 |
| 588 | 588 | 0.00000 | 0.00000 |
| 589 | 589 | 0.00000 | 0.00000 |
| 590 | 590 | 0.00000 | 0.00000 |
| 591 | 591 | 0.00000 | 0.00000 |
| 592 | 592 | 0.00000 | 0.00000 |
| 593 | 593 | 0.00000 | 0.00000 |
| 594 | 594 | 0.00000 | 0.00000 |
| 595 | 595 | 0.00000 | 0.00000 |
| 596 | 596 | 0.00000 | 0.00000 |
| 597 | 597 | 0.00000 | 0.00000 |
| 598 | 598 | 0.00000 | 0.00000 |
| 599 | 599 | 0.00000 | 0.00000 |
| 600 | 600 | 0.00000 | 0.00000 |
| 601 | 601 | 0.00000 | 0.00000 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации результатов  
интеллектуальной деятельности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020661840

Программа для обеспечения электронного документооборота

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (RU)*Авторы: *Аль-Араджи Зайнаб Хуссам Моса (IQ), Старцева Анна Сергеевна (RU), Самофалова Алевтина Сергеевна (RU)*

Заявка № 2020660761

Дата поступления 21 сентября 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 октября 2020 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Акты о внедрении результатов диссертации

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора,  
Промышленного факультета ВГТУ  
д-р техн. наук, профессор

15.04.2022  
И.И. Дроздов



АКТ

#### о внедрении результатов диссертации в учебный процесс Воронежского государственного технического университета

Наименование диссертации: Методика комплексного анализа механических характеристик радиоэлектронных модулей на основе многослойных печатных плат.

Автор: АЛЬ-АРАДЖИ Зайнаб Хуссам Моса.

Научный руководитель: Башкиров Алексей Викторович.

Диссертация выполнена в Воронежском государственном техническом университете на кафедре конструирования и производства радиоаппаратуры, в рамках основного научного направления - НИР 2019.17 «Исследование и разработка методов комплексного анализа и оптимального синтеза на этапах функционального и конструкторского проектирования РЭС».

Результаты диссертации **внедрены в учебный процесс ВГТУ** на основании решения кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры от «25» апреля 2022 года, протокол № 11.

1. Вид результатов внедрения в учебный процесс:

- математические модели определения прогиба участков МПП «кассетной» конструкции, позволяющие оценить механические нагрузки на паяные выводы компонентов и тем самым выявить опасные места для установки.

- методика проектирования радиоэлектронных модулей на основе МПП, охватывающая этапы от топологического проектирования до испытаний, включающая структуру обмена проектными данными..

- методика топологического проектирования МПП, в том числе «кассетной» конструкции, основанная на предварительном размещении компонентов на плате и моделировании вибрационных свойств, выявлении наиболее опасных мест для микросхем с корпусами большой площади, позволяющая определять оптимальные схемы закрепления и координаты точек закрепления, а также возможность применения ребер для увеличения жесткости;.

2. Область применения:

- лекционные, лабораторные и практические занятия, а также курсовое проектирование по дисциплине «Современные РЭС спецназначения: особенности проектирования и эксплуатации» по направлению подготовки магистров 11.04.03 "Конструирование и технология электронных средств".

3. Форма внедрения:  
- курс лекций;

4. Основные публикации по теме диссертации:

**Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Аль-Араджи З.М.Х. Моделирование И Экспериментальное исследование вибрационных свойств многослойной печатной платы / З.М.Х Аль-Араджи, А.В Муратов, А.В Турецкий // Радиотехника. – 2019. – Т. 83, N. 6. – С. 145-149.

2. Аль-Араджи З.Х.М. Математические модели механических характеристик многослойных печатных плат / З.Х.М. Аль-Араджи // Радиотехника. – 2019. – Т. 83, N. 6. – С. 169-172.

3. Аль-Араджи З.Х.М. Методика выбора оптимальной компоновки многослойных печатных плат с учетом внешних механических воздействий / З.Х.М. Аль-Араджи, О.Ю. Макаров, А.В. Муратов, А.В. Турецкий, Ю.В. Худяков // Радиотехника. – 2020. – Т. 84, N. 6. – С. 30-36.

4. Аль-Араджи З.Х.М. Моделирование механических характеристик многослойных печатных плат в PRO/ENGINEER /З.Х.М. Аль-Араджи, О.Ю. Макаров, А.В. Турецкий, В.А. Шуваев // Радиотехника. – 2014. – N. 3. – С. 101-102.

5. Аль-Араджи З.Х.М. Модальный анализ многослойных печатных плат средствами CAE анализа / З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Муратов, П.В. Иевлев, Т.Л. Тураева, А.В. Турецкий // Радиотехника. – 2018. – N. 7. – С. 40-45.

6. Аль-Араджи З.Х.М. Методика тестирования надежности межслойных соединений многослойных печатных плат при механических воздействиях / З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Турецкий, С.Ю. Белецкая // Радиотехника. – 2014. – N. 6. – С. 54-57.

7. Аль-Араджи З.Х.М. Методика выбора оптимального расположения компонентов на многослойных печатных платах с учетом внешних механических воздействий / З.Х.М. Аль-Араджи, О.Ю. Макаров, А.В. Муратов, А.В. Турецкий, Х.А. Суайкат // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16. – С. 65-72.

8. Аль-Араджи З.Х.М.. "методика оценки усталостного ресурса печатной платы с использованием принципа линейных накопленных повреждений при различных граничных условиях" Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 17. – С. 114-120.

*Работы в сборниках, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования:*

9. Al-Araji Z.H. The New Way Of Estimating The PCB's Lifetime Of Fatigue Using The Principle Of Linear Accumulated Damage In Various Boundary Condition / Z.H. Al-Araji, N.Swaikat, H. Souikat, EtAl. // IEEE International Conference On Recent Advances And Innovations In Engineering (ICRAIE), 1-3 December 2020, Jaipur, India. – 2020. – P. 1-5.

10. Al-Araji Z.H. Modeling And Experimental Research Of Vibration N Properties Of A Multi-Layer Printed Circuit Board / Z.H. Al-Araji, N.A. Swaikat, A.V.

Muratov, EtAl. // 4th Scientific International Conference Najaf (SICN), 29-30 April 2019, Al-Najef, Iraq. – 2019. – P. 43-47.

11. AL-Fadhli F.H.K. The Perfect Position Of Electrical Components On Pcb's In Communication System Industry From The Mechanical Aspects' Viewpoint / F.H.K. AL-Fadhli, Z.H. Al-Araji, N. Swaikat, A.V. Muratov, A.V. Turetsky // Journal Of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERE). – 2020. – Vol. 43, N. 4. – P. 82-91.

12. Z. H. Al-Araji, A. V. Bashkirov, N. A. Swaikat, A. Turetsky, E. A. Chunikhina and A. S. Samofalova, "Methodology for Predicting the Optimum Design of Radio-Electronic Devices," 2021 4th International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/CommNet52204.2021.9642007.

### Статьи и материалы конференций

13. Аль-Араджи З.Х.М. Финишные Покрытия МПП / З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Турецкий А.В // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем [Электронный Ресурс]: Межвузовский сборник научных труд. – 2014. – С. 276-280.

14. Аль-Араджи З.Х.М. Моделирование механических характеристик многослойных печатных плат средствами САЕ Анализа / З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Муратов, А.В. Турецкий, Ю.В. Худяков // Труды международного симпозиума «Надежность и качество», Пензенский государственный университет (Пенза). – 2018. – Т. 1. – С. 224-227.

15. Аль-Араджи З.Х.М. Верификация результатов FEMанализа вибрационных свойств многослойной печатной платы / Z.H. Al-Araji, A.V. Turetsky, Ю.В. Худяков // Труды международного симпозиума «Надежность и качество», Пензенский государственный университет (Пенза). – 2019. – Т. 2. – С. 71-73.

16. Al-Araji Z.H. Инновационные материалы и технологии – 2021 Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых / Z.H. Al-Araji // Factors Affect A Multilayer Printed Circuits Board's Bending Rigidity. – Г. Минск, Республика Беларусь: Министерство образования республики Беларусь учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет».

17. Аль-Араджи, З. Х.М. Международная научно-техническая конференция молодых ученых «Инновационные материалы и технологии – 2020» / Х. М. Аль-Араджи, З., А.В. Муратов, А. В. Турецкий // overcoming the challenges of the QFN package by proper stencil generation choice (electroform stencils, nano-coat stencils). – г. Минск, Республика Беларусь, 2020.

18. Аль-Араджи З.Х.М. Оптимизация способа закрепления печатной платы на алюминиевом основании / Аль-Араджи З.Х.М., Худяков Ю.В., Макаров О. Ю., Турецкий А. В. // Труды международного симпозиума «Надежность и качество», Пензенский государственный университет (Пенза). – 2021 – Т. 2. – С. 175-179.

**Зарегистрированная программа для ЭВМ:**

19. Аль-Араджи З.Х.М. Программа для обеспечения электронного документооборота / З.Х.М. Аль-Араджи, А.С. Старцева, А.С. Самофалова. – Российская Федерация,(Свидетельство): 2020661840.

5. Эффект от внедрения: повышение качества образования, достигаемого за счет новых знаний в области проектирования радиоэлектронных средств спецназначения. Развитие умений и навыков у магистров, благодаря применению методов проектирования радиоэлектронных модулей на основе многослойных печатных плат с учетом действия на них внешних механических нагрузок.

И.о. проректора по учебной работе:

 /Колосов А.И./  
(подпись, Ф.И.О.)

« 14 » 04 2022 г.

Декан факультета радиотехники и  
электроники

 /Небольсин В.А./  
(подпись, Ф.И.О.)

« 11 » 04 2022 г.

Заведующий кафедрой КИПР

 /Башкиров А.В./  
(подпись, Ф.И.О.)

« 11 » 04 2022 г.





Акционерное общество  
научно-внедренческое предприятие «ПРОТЕК»  
(АО НВП «ПРОТЕК»)  
Почтовый адрес: ул. Базовая, д. 6, г. Воронеж, 394028  
тел. (473)220-47-22, (473)220-47-23, факс (473)220-47-24  
Интернет-адрес: www.protek-vrn.ru E-mail: protek@protek-vrn.ru  
ОКПО 41211944 ОГРН 1023601555097 ИНН 3665017521 КПП 366301001

«УТВЕРЖДАЮ»  
Генеральный директор  
АО НВП «ПРОТЕК»  
кандидат технических наук,  
доцент  
В.А. Шуваев  
«25» мая 2022 г.

**Акт внедрения результатов диссертационной работы  
АЛЬ-АРАДЖИ Зайнаб Хуссам Моса**

«Методика комплексного анализа механических характеристик радиоэлектронных модулей на основе многослойных печатных плат», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Комиссия, назначенная распоряжением генерального директора АО НВП «ПРОТЕК», г. Воронеж от 17 мая 2022 года в составе:

председатель комиссии – главный конструктор по разработке систем специального назначения – заместитель генерального директора доктор технических наук, старший научный сотрудник Журавлев Александр Викторович;

члены комиссии:

начальник научно-технического управления №2 (разработка радиоэлектронной аппаратуры) кандидат технических наук, доцент Кузьменко Юрий Владимирович;

начальник отдела № 106 (разработка специального математико-программного обеспечения) кандидат технических наук Кожухов Евгений Алексеевич

настоящим актом подтверждает, что результаты диссертационной работы АЛЬ-АРАДЖИ Зайнаб Хуссам Моса:

- математические модели определения предельная участка МПП «кассетной» конструкции, позволяющие оценить механические нагрузки на паяные выводы компонентов и тем самым выявить опасные области для установки компонентов большой площади с учетом координат установки компонентов;

- методика топологического проектирования МПП, в том числе «кассетной» конструкции, позволяющая сократить время разработки путем выбора рациональной схемы закрепления платы и определения областей размещения компонентов большой площади на ней до этапа трассировки.

были использованы в работе предприятия при модернизации технологии серийного производства электронных модулей обработки данных из состава малогабаритных навигационных комплексов КС-100М ПРТК.462414.005 и «Ориентир» ПРТК.462414.007, предназначенных для координатно-временного обеспечения наземных мобильных средств образцов военной техники, принятых на снабжение Вооруженных Сил Российской Федерации.

Использование вышеуказанных результатов диссертационной работы АЛЬ-АРАДЖИ З. Х. М. позволило получить оцененный временной выигрыш для разработки радиоэлектронных модулей порядка 2 процентов. Что позволило снизить себестоимость изделий на 1,2 процента.

Председатель комиссии:

А.В. Журавлев

Члены комиссии:

Ю.В. Кузьменко

Е.А. Кожухов

Подписи председателя комиссии Журавлева А.В. и членов комиссии Кузьменко Ю.В. и Кожухова Е.А. заверяю:

Начальник отдела кадров и подготовки персонала  
АО НВП «ПРОТЕК»



И.Г. Орловская

«25» мая 2022 г.