

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Башкиров Алексей Викторович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты **Увайсов Сайгид Увайсович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский
технологический университет» (РТУ
МИЭРА), заведующий кафедрой
конструирования и производства
радиоэлектронных средств (г. Москва)

Данилова Евгения Анатольевна
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО
«Пензенский государственный
университет», доцент кафедры
«Конструирование и производство
радиоаппаратуры» (г. Пенза)

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники» (г. Томск)

Защита состоится «29» сентября 2022 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский просп., 14, конференц-зал (ауд. 216).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» <https://cchgeu.ru/>.

Автореферат разослан «10» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Федоров Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 позволят 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 V. 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 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».

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 ФГБОУ ВО «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 диссертции

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, предложены и обоснованы пути решения поставленных задач, приведено краткое описание работы, изложены основные научные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены особенности конструкции радиоэлектронных модулей на основе МПП, а также их материалы и области применения. Показана особенность проектирования радиоэлектронных модулей «кассетной» конструкции, наиболее часто встречающейся в аппаратуре спецназначения.

На рисунке 1 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 радиоэлектронного модуля 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.

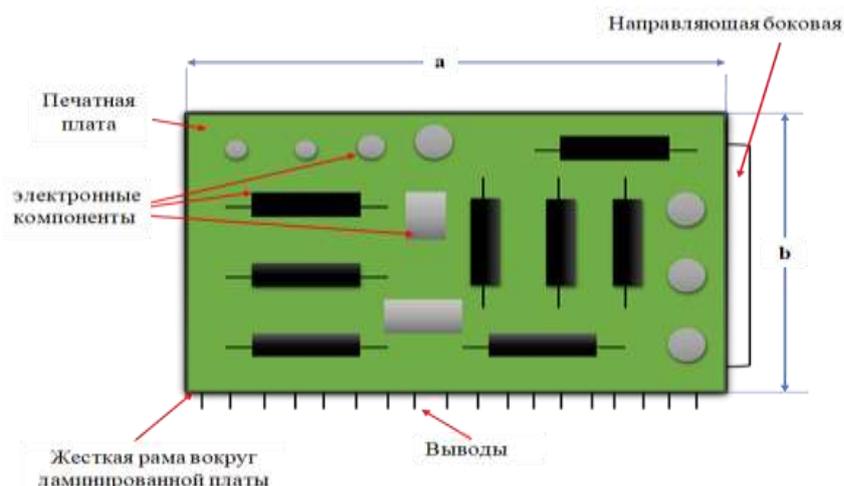


Рисунок 1 – Печатная плата блока «кассетной» конструкции, усиленная каркасом жесткости

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, так как нет возможности свободного выбора места фиксирующих винтов.

Для увеличения жесткости печатных плат также используются ребра. Ребра увеличивают жесткость печатной платы, что, в свою очередь, увеличивает резонансную частоту. Это уменьшает прогиб платы в условиях нагрузок, тем самым уменьшая напряжения, возникающие в электронных компонентах, установленных на печатной плате. Ребра могут быть скреплены винтами, заклепками, припаяны, приварены или отлиты как единое целое с пластинами радиатора.

При действии внешних механических нагрузок на радиоэлектронные модули компоненты, расположенные на МПП, особенно их паяные соединения, подвергаются повышенным деформациям. Так, у поверхностно-монтируемых компонентов 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. Значит, необходимо тщательно выбирать место установки таких компонентов для минимизации негативных последствий.

Для оценки устойчивости МПП к действию вибраций ударов и статических нагрузок широко применяют процесс инженерного анализа, основанный на численном моделировании. В радиотехнической промышленности наиболее распространены модули инженерного анализа, которые являются частью таких систем, как CREO, SolidWorks, ANSYS.

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 2 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.

Структурная схема процесса комплексного анализа механических характеристик РЭС представлена на рисунке 3.

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.

№	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

Рисунок 2 – Пример базы данных прочности и надежности паяных соединений различных корпусов компонентов

Во второй главе рассмотрены математические модели механических сил, действующих на МПП, а также математические модели для определения прогибов участков и собственных частот плат разной конструкции.

В МПП «кассетной» конструкции наиболее опасная ориентация длинного компонента - параллельно короткой стороне. Это связано с сильным изменением кривизны более короткой стороны печатной платы, чем длинной, что приводит к большему относительному прогибу между печатной платой и компонентом. В конечном итоге это увеличивает нагрузки и напряжения в выводах и паяных соединениях, как показано на рисунке 4. Относительная кривизна связана со смещением печатной платы, а смещение – с расположением компонента на печатной плате.

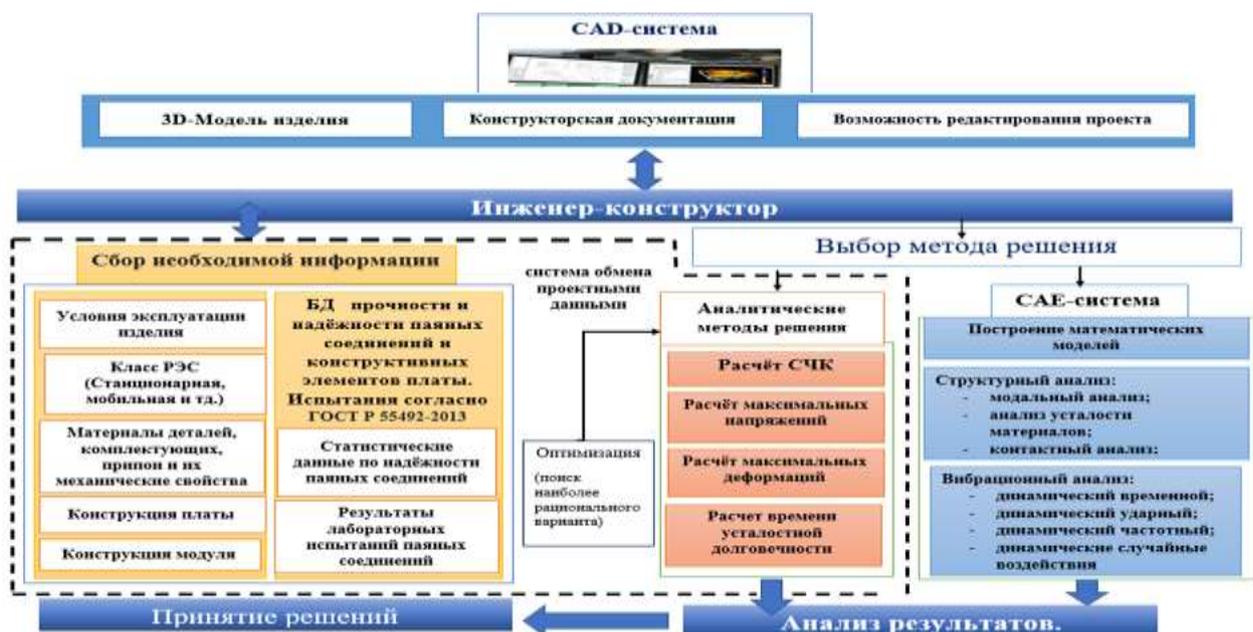


Рисунок 3 – Структурная схема процесса комплексного анализа механических характеристик радиоэлектронных модулей на основе МПП РЭС

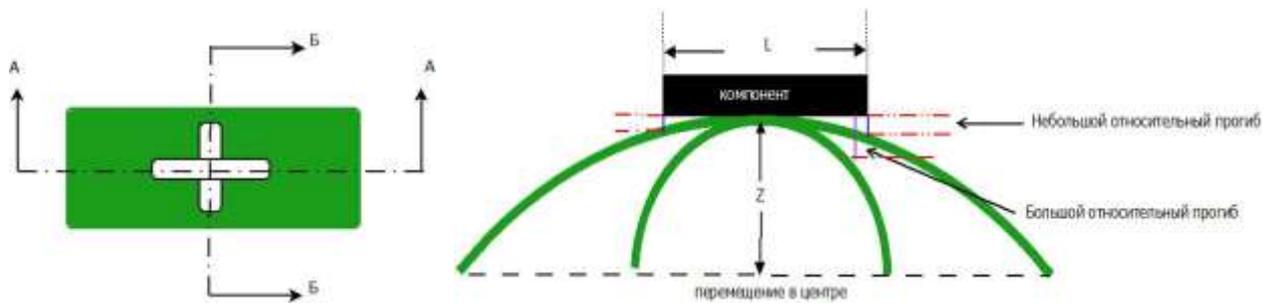


Рисунок 4 – Величина относительного прогиба между компонентом и печатной платой в условиях установки параллельно или поперечно длинному краю

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

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

где m, n - номера гармоники колебаний X, Y - координаты, A_m - амплитуда.

Обширные данные вибрационных испытаний печатных плат показывают, что большая часть повреждений происходит на первой гармонике, где смещения и напряжения наибольшие. Тогда смещение в любом месте печатной платы может быть определено из следующего соотношения:

$$z = z_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}. \quad (1)$$

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

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

Когда компонент расположен не по центру, а 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, где 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 окажет прямое влияние на надежность контактов. Таким образом, эти относительные смещения можно использовать для определения опасных мест на МПП «кассетной» конструкции.

При этом собственная частота такой конструкции будет:

$$f_n = \frac{\pi}{2} \left(\frac{D}{\rho} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{4a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \quad (3)$$

где a, b - длина и ширина пластины, м;

ρ - плотность кг/м³;

D -коэффициент жесткости пластины, Нм, определяемый по

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (4)$$

где E -модуль упругости материала платы, Н/м²;

μ – коэффициент Пуассона для материала платы;

h –толщина платы, м.

Жесткость печатной платы может быть увеличена без значительного увеличения массы, при этом собственная частота также увеличится и прогиб в центре платы заметно уменьшится. 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. Если два стальных ребра припаяны к плате симметрично по длине, печатная плата будет выглядеть так, как показано на рисунке 5.

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 .

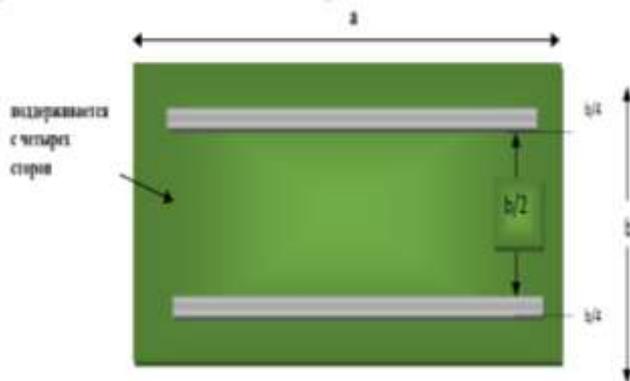


Рисунок 5 – Ребра жесткости припаяны к печатной плате

$$f_n = \frac{\pi}{2} \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{D_x}{a^4} + \frac{4D_x D_y}{a^2 b^2} + \frac{D_y}{b^4} \right) \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Здесь D_x -жесткость на изгиб многослойной платы вдоль оси X , а D_y - жесткость на изгиб вдоль оси Y .

В третьей главе представлена методика комплексного анализа механических характеристик радиоэлектронных модулей на основе МПП.

При использовании процесса моделирования предлагается предварительно до трассировки платы размещать компоненты и выявлять наиболее опасные участки с точки зрения 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.

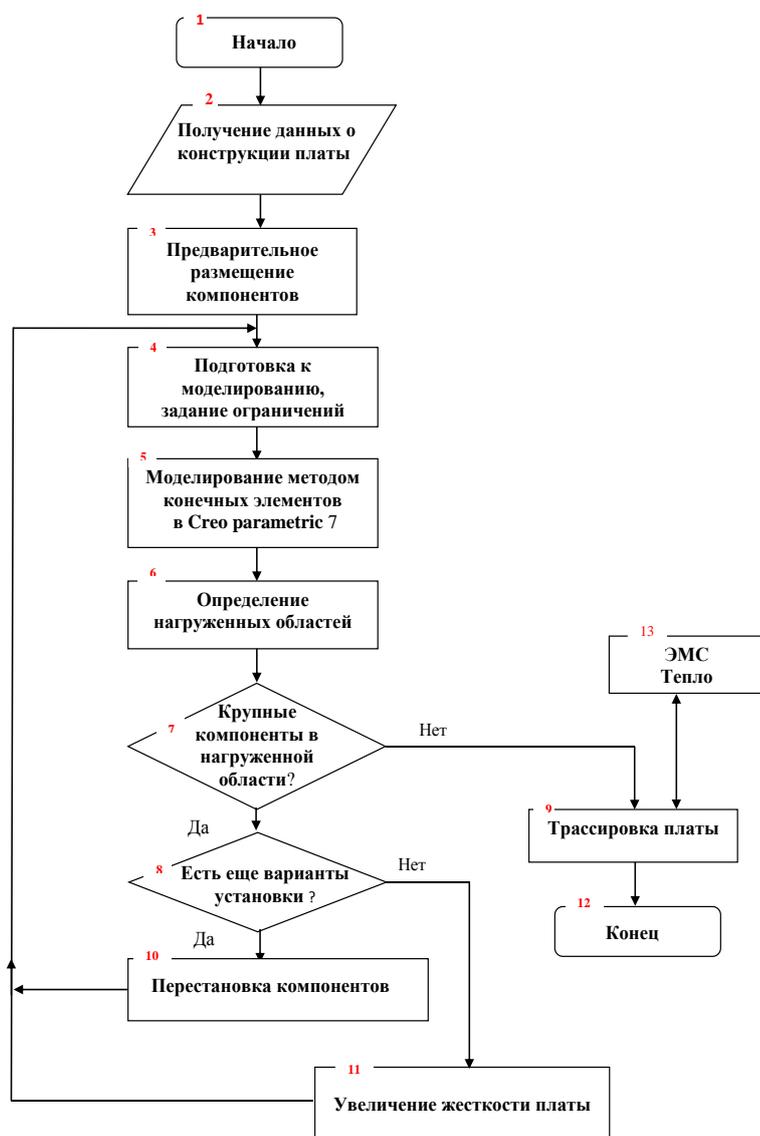


Рисунок 6 – Алгоритм проектирования МПП с учетом предварительного размещения

«кассетной конструкции» и эксперимента на вибросонде.

Для проверки точности моделирования механических характеристик печатных плат в CREO использовалась экспериментальная установка (вибросонд). Схематичное изображение основных элементов станда представлено на рисунке 8. Печатная плата устанавливается на предметный стол вибровозбудителя и фиксируется в нескольких местах. Акселерометр устанавливается в центре платы и на краях. Второй акселерометр размещается на самом вибровозбудителе.

В качестве платы использовалась ячейка преобразования сигнала технологической установки (рисунок 9). Материал платы – стеклотекстолит. Особенностью «кассетной» конструкции является закрепление платы по периметру с невозможностью закрепления центральных областей. Наименее предпочтительным является вариант размещения крупных компонентов на плате с точками, имеющими координаты внутри зоны с

Предлагаемый подход можно представить в виде алгоритма, изображенного на рисунке 6.

Конструкция 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 используются численные методы.

Существует несколько путей повышения жесткости платы, направленных на увеличение собственных частот и уменьшение внутренних напряжений при статических нагрузках. На рисунке 7 показан алгоритм методики увеличения жесткости многослойных печатных плат.

В четвертой главе проведен сравнительный анализ результатов моделирования характеристик МПП блока

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

Частотная характеристика показана на рисунке 10, а результаты моделирования и испытаний для основных частот МПП представлены в таблице 1. Результаты моделирования и тестирования для МПП хорошо согласуются. Следовательно, модель численного анализа достаточно адекватна.



Рисунок 10 – Частотная характеристика

Таблица 1 – 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. Такой подход позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на моделирование, так как отпадает необходимость построения очень сложной сети конечных элементов.

В заключении представлены основные результаты диссертационного исследования.

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 конкурентно способность изделий при сокращении сроков выхода изделий на рынок.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

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.– № 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.– № 6. – С. 169-172.

3. 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. – С. 30-36.

4. 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. – С. 101-102.

5. Модальный анализ многослойных печатных плат средствами САЕ анализа / З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Муратов, П.В. Иевлев, Т.Л. Тураева, А.В. Турецкий // Радиотехника. – 2018. – № 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. – № 6. – С. 54-57.

7. 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. – № 3. – 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 / З.Х.М. Аль-Араджи // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17. – № 3. – С. 114-120.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных:

9. 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, Et Al. // IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 1-3 December 2020, Jaipur, India. – 2020. – P. 1-5.

10. 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. 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. –№ 4. – P. 82-91.

12. Methodology for Predicting the Optimum Design of Radio-Electronic Devices / Z. H. Al-Araji, A. V. Bashkirov, N. A. Swaikat, A. Turetsky, E. A. Chunikhina and A. S. Samofalova // 4th International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), 2021.–P. 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 // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем [Электронный ресурс]: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж, 2014. – С. 276-280.

14. 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: тр. Международ. симпозиума. – Пенза, 2018. – Т. 1. – С. 224-227.

15. Аль-Араджи З.Х.М. Верификация результатов FEMанализа вибрационных свойств многослойной печатной платы / З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Турецкий, Ю.В. Худяков // Надежность и качество: тр. Международ. симпозиума. – Пенза, 2019. – Т. 2. – С. 71-73.

16. Al-Araji Z.H.M. Factors Affect Multilayer Printed Circuits Board's Bending Rigidity / Z.H.M. Al-Araji // Инновационные материалы и технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Минск, 2021. – С. 27-31.

17. Al-Araji Z.H.M. Overcoming the challenges of the QFN package by proper stencil generation choice (electro form stencils, nano-coat stencils) / Z.H.M. Al-Araji, A.V. Muratov, A.V. Turetsky // Инновационные материалы и технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Минск, 2020. – С. 178-182.

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

Патенты на полезную модель изарегистрированные программы для ЭВМ:

19. 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.

Подписано в печать 02.07.2022

Формат 60 × 84/16 Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,0 Тираж 80 экз. Заказ № 157

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж Московский просп., 14