

*На правах рукописи*

**СТАСЕВИЧ**  
Сергей Павлович

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИЙ РЭС**

Специальность: 05.12.13 - Устройства радиотехники и средств связи

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



*На правах рукописи*

**СТАСЕВИЧ**  
**Сергей Павлович**

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИЙ РЭС**

Специальность: 05.12.13 - Устройства радиотехники и средств связи

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

**ЛЬВОВ - 1993**

Львівський політехнічний інститут  
Львів

Работа выполнена во Львовском политехническом институте

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00815147 (Q)

Научные руководители:

доктор технических наук,  
профессор **Смердов А.А.**  
кандидат физико-математических наук,  
доцент **Когут В.М.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор **Зиньковский Ю.Ф.**  
кандидат технических наук,  
доцент **Крыщук В.Н.**

Ведущее предприятие:

Львовский научно-исследовательский  
радиотехнический институт

Защита диссертации состоится 22 июня 1993 г. в 14 час. 00 мин. на заседании специализированного совета К 068.36.01 Львовского политехнического института по адресу: г. Львов, ул. Ст. Бандеры, 12.

290646

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Автореферат разослан « 18 » 05 1993 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

Романишин Ю.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность проблемы.* Анализ источников отечественной и зарубежной литературы по радиоэлектронике показывает, что больше половины отказов бортовых радиоэлектронных средств (РЭС) составляют отказы под воздействием механических нагрузок, механических деформаций, различного рода вибраций и ударов. Мало изученным явлением следует считать результат воздействия гиперзвуковых механических колебаний на кремниевые пластины БИС и СБИС радиоэлектронных средств и вызванное этим искажение информации, обрабатываемой интегральными схемами. Постоянные воздействия механических деформаций на элементы конструкций РЭС усиливают усталостные и другие деградационные процессы, что ведет к возрастанию постепенных отказов устройств.

С этой точки зрения изучение влияния различного рода механических воздействий на конструкции РЭС в процессе их функционирования и прогнозирование времени устойчивого функционирования аппаратуры в этих сложных условиях эксплуатации является чрезвычайно актуальной проблемой.

Использование традиционных методов проектирования конструкций РЭС (макетирование, натурные испытания) приводит к удлинению сроков разработки, снижению технико-экономической эффективности изделий и ухудшению их качественных показателей. Выходом из создавшегося положения является использование автоматизированных методов проектирования РЭС с применением современной электронно-вычислительной техники, а также совершенствование организации проектных работ.

Математическое моделирование динамического поведения конструкции РЭС при воздействии механических факторов позволяет на ранних этапах проектирования существенно сократить затраты на проведение технологического цикла испытаний и разработку новой техники. Проведение многошагового поиска конструкторского решения на этапе проектирования РЭС позволяет оптимизировать динамические характеристики и уменьшить динамические коэффициенты передачи тех элементов конструкции, которые наиболее подвержены воздействию механических нагрузок.

Для решения динамических задач конструкций РЭС, как в нашей стране, так и за рубежом, активно используются численные методы расчета собственных частот колебаний конструкций и переходных затуханий в них при моделировании воздействий ударных нагрузок. Однако, в этих методах используются упрощенные математические модели анализа динамических свойств конструкций РЭС, эксплуатируемых в условиях внешних механических воздействий, которые в большинстве случаев не

учитывают структурную неоднородность конструкции, анизотропию современных конструкционных материалов и т.п. И получаемые по упрощенным моделям результаты дают только первое приближение физических процессов, протекающих в изделиях в заданных условиях эксплуатации, что, в свою очередь, требует при организации проектно-конструкторских работ уделения значительного места на проведение длительных стендовых и натурных испытаний.

Кроме этого, следует отметить, что аналитические методы расчета, позволяющие эффективно прогнозировать поведение конструкций РЭС в условиях механических нагрузок, пока ограничивались исследованием элементарных форм (стержни, пластины). При этом аналитические решения обладают рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с численными методами, главные из которых: малый объем вычислений, простота анализа получаемых результатов, простота ввода и вывода информации, возможность решения задачи синтеза. Малый объем вычислений дает возможность применения аналитических решений в диалоговых системах машинного проектирования РЭС. Поэтому особо важными представляются исследования по дальнейшей разработке эффективных методик аналитического решения рассматриваемого класса динамических задач.

*Целью настоящей работы является разработка математических моделей и методов для анализа динамических свойств вибропрочных конструкций РЭС, получение методик аналитических решений и исследование на их основе динамических задач несущих пластинчатых конструкций с системой присоединенных элементов.*

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- проведение анализа динамических воздействий и изучение их влияния на работоспособность РЭС;
- разработка методики расчета систем виброизоляции блоков РЭС при вибрационном и ударном нагружении;
- построение аналитических решений динамических задач пластинчатых несущих конструкций (ПНК) и гибких монтажно-коммутационных оснований (МКО);
- разработка методики расчета вибропрочности крепления радиоэлементов к несущему основанию;
- исследование влияния механических воздействий на электрические параметры радиоэлементов РЭС;
- на основании разработанных математических моделей проведение исследований несущих конструкций (НК) РЭС на механические воздействия в зависимости от физико-механических и геометрических характеристик НК, веса и координат присоединенных элементов;

- проведение проверки адекватности разработанных математических моделей анализа динамических свойств конструкций РЭС.

*Методы исследований.* Изложенные в работе теоретические и экспериментальные исследования основываются на использовании теории и практики конструирования РЭС, методов математической физики, теории обобщенных функций, вариационного и операционного исчисления.

*Научная новизна полученных в диссертации результатов состоит в следующем:*

- применение принципа поэтапного моделирования дало возможность разработать «сквозную» аналитическую модель блока РЭС, которая отражает иерархию построения конструкции и обеспечивает требуемую детализацию анализа поведения элементов конструкции при невысоком уровне увеличения сложности модели;

- разработанные математические модели и полученные аналитические решения задач анализа динамического поведения пластинчатых конструкций РЭС учитывают ортотропность и конечную сдвиговую жесткость конструкционных материалов, большие прогибы, вес и координаты крепления присоединенных элементов;

- на основе полученных аналитических решений проведен анализ динамического поведения конструкций РЭС в зависимости от влияния геометрических и физико-механических параметров плат, веса и координат присоединенных элементов;

- впервые в практике радиоаппаратостроения получены нормальные и тангенциальные поля перемещений и усилий, которые более полно отражают физическую модель; учет и анализ амплитуд перемещений, усилий и моментов, возникающих в тангенциальных плоскостях, особенно важен в устройствах функциональной и микро-электроники, как наиболее чувствительных к такому виду воздействий;

- разработанная методика расчета вибропрочности крепления радиоэлементов к несущему основанию позволяет прогнозировать время эксплуатации паяных соединений в условиях вибрационных нагрузок.

*Научные положения, выносимые на защиту:*

1. Построена «сквозная» аналитическая модель блоков РЭС, позволяющая:

- производить расчет систем виброизоляции блоков РЭС при вибрационном и ударном воздействии;

- результаты анализа динамических свойств блока РЭС (поля перемещений и частотные зависимости) использовать как возмущающие воздействия на НК, входящие в общую конструкцию блока РЭС, для анализа динамики ПНК И МКО с системой присоединенных элементов;

- перемещения и напряжения, возникающие в несущих конструкциях, использовать как вынуждающие воздействия на элементы, закрепленные на НК, для их динамического анализа с учетом физико-механических и геометрических параметров этих элементов.

2. Для нового класса конструктивов - гибких монтажно-коммутационных оснований построена математическая модель, в геометрических соотношениях которой учтены нелинейные члены, что дает возможность учитывать большие прогибы и более адекватно отразить сущность данной физической модели.

3. Использование вариационных принципов, функционального анализа и обобщенных функций позволяет построить методику получения аналитических решений динамических задач пластинчатых конструктивов, несущих присоединенные элементы.

4. Математическая модель и методика расчета вибропрочности крепления радиоэлементов дает возможность анализировать напряженно-деформированное состояние в местах скачкообразного изменения жесткости несущего основания и прогнозировать долговечность паяных соединений.

*Практическая ценность работы.* В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены следующие практические результаты:

- разработанные математические модели и методики решения задач используются при разработке и прогнозировании динамических свойств различного вида конструкций РЭС на ранних этапах проектирования;

- разработанные методики позволяют анализировать переходные процессы и динамическое поведение конструкций в любом диапазоне частот, что особенно важно для элементов функциональной электроники и полупроводниковых интегральных схем, внутренние и установочные резонансы которых находятся в верхнем диапазоне частот;

- при жестком креплении на плате бескорпусных элементов предложенные методики дают возможность определять не только инерционные нагрузки и нормальные перемещения, но и сдвиговые деформации, к которым особенно чувствительны кристаллы ИС;

- предложенная инженерная методика позволяет определять напряженно-деформированное состояние в местах крепления выводов ЭРЭ к монтажному основанию и прогнозировать долговечность паяных соединений при заданных условиях эксплуатации РЭС;

- разработанная методика анализа амплитудно-частотных характеристик и напряженно-деформированного состояния нового класса несущих конструктивов - гибких монтажно-коммутационных оснований (плетеных плат), несущих присоединенные радиокомпоненты, и созданный на ее основе программный комплекс позволяет анализировать динамическое состоя-

ние в случае колебаний с большими прогибами;

- применение разработанного комплекса прикладных программ позволяет сократить сроки и снизить трудоемкость проектирования, а также количество стендовых и натурных испытаний радиоэлектронной аппаратуры, эксплуатируемой в условиях внешних механических воздействий.

*Реализация и внедрение результатов работы.* Исследования выполнялись на кафедре «Конструирование и технология производства радиоаппаратуры» Львовского политехнического института в рамках госбюджетной и хоздоговорной тематик в соответствии с целевыми научно-техническими программами КНП-2000 и программы Минвуза УССР «Создание и развитие САПР и их подсистем», а также по специальным планам отраслевых министерств. В частности, результаты диссертационной работы использовались при проектировании ряда монтажно-коммутационных структур (дец. № ЕГ 6.640.063, НК 6.644.154), используемых при создании новых образцов техники в рамках ОКР «ЭПРЦ-200», и специальных телевизионных приемников.

Суммарный подтвержденный годовой экономический эффект от внедрения результатов исследовательских работ составил 77.478 тыс. руб (в ценах 1990 г.). Годовой экономический эффект от внедрения комплекса прикладных программ составил 78.2 тыс. руб. (в ценах 1992 года).

Материалы диссертационной работы и разработанные на их основе программные средства используются в учебном процессе при изучении ряда инженерных дисциплин специальности 23.03 Львовского политехнического института, а также в исследовательской работе студентов, в курсовом и дипломном проектировании.

*Апробация работы.* Результаты работы докладывались и обсуждались на:

- Второй Всесоюзной конференции по механике неоднородных структур, Львов, 1987 г.;

- научно-технической конференции «Автоматизация конструкторского проектирования», Пенза, 1988 г.;

- Шестой Всесоюзной конференции по управлению в механических системах, Львов, 1988 г.;

- Зональной конференции «Методы прогнозирования надежности проектируемых РЭА и ЭВА», Пенза, 1988 г.;

- научно-технической конференции «Методы оценки и повышения надежности РЭА», Пенза, 1989 г.;

- научно-технической конференции в Дальневосточном институте бытового обслуживания населения, Владивосток, 1990 г.;

- Всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы обеспечения высокой надежности микроэлектронной аппаратуры», Запорожье, 1990 г.;

- Третьей Всесоюзной конференции «Механика неоднородных структур», Львов, 1991 г.;
- школе-семинаре «Опыт разработки и применения приборо-технологических САПР», Львов, 1991 г.;
- Всесоюзной конференции «Методы и средства повышения надежности приборов, средств и систем», Пенза, 1992 г.;
- научно-технической конференции «Опыт разработки и применения приборо-технологических САПР в микроэлектронике», Львов, 1993 г.;
- ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Львовского политехнического института в 1987-1993 г.г.

*Публикации по работе.* По материалам диссертационных исследований опубликовано 12 научных работ. В ВНИИЦ зарегистрировано 4-е научно-технических отчета по научно-исследовательских работах, связанных с темой диссертации.

*Объем и структура работы.* Диссертация состоит из ВВЕДЕНИЯ, четырех разделов, ЗАКЛЮЧЕНИЯ, списка использованной литературы (156 наименований), ПРИЛОЖЕНИЯ. Основное содержание работы изложено на 155 страницах машинописного текста, иллюстрировано 23 рисунками и 4 таблицами.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* к диссертационной работе обосновывается актуальность проблемы, цель и основные задачи исследования, сформулированы новые научные результаты и научные положения, выносимые на защиту, указана практическая значимость и реализация результатов проведенных исследований.

*В первой главе* проанализировано воздействие на аппаратуру в процессе эксплуатации различных возмущающих факторов (климатических, механических, тепловых), снижающих уровень ее надежности и стабильности выходных параметров; механические дестабилизирующие факторы (вибрация, удар, линейное ускорение, акустическое воздействие) являются основной причиной отказов РЭС, которые достигают до 50 % от общего числа отказов для бортовой аппаратуры, а характерными отказами для печатных узлов (как наиболее чувствительных элементов блоков РЭС) при значительных уровнях вибрационных и ударных нагрузок являются: отрывы ЭРЭ от печатных плат, обрывы выводов в местах паяк; и жесткое закрепление компонентов на плате (с помощью пайки или клейки) при динамических воздействиях обеспечивает при этом передачу деформации изгибных колебаний несущей конструкции на ЭРЭ. При деформациях полупроводниковых приборов возникают тензорези-

стивные, тензоемкостные и пьезоэлектрические эффекты, которые могут приводить к резкому увеличению тока через малые сечения, следствием чего являются локальные перегревы полупроводника и изменение его свойств.

Большой вклад в исследование динамики конструкций РЭС внесли ученые: Карпушин В.Б., Ильинский В.С., Маквцов Е.Н., Фролов В.А. и другие. В настоящее время вопросами, связанными с расчетом динамических свойств конструкций РЭС занимаются научные коллективы Новосибирска, Пензы, Москвы, Владимира и другие.

В разработанных этими коллективами программных комплексах математические модели для анализа динамических свойств конструкций РЭС построены в основном с использованием гипотез Кирхгофа-Лява, решение задач проводится, как правило, численными методами.

Решение проблемы защиты бортовой аппаратуры от динамических воздействий производится путем использования специальных мероприятий, основными из которых являются: увеличение жесткости конструкции, демпфирование колебаний, вибро- и ударозащита аппаратуры с помощью виброизоляторов.

Моделирование динамических свойств виброизолированных блоков РЭС строится на принципе поэтапного моделирования, состоящего в том, что амортизированный блок заменяется эквивалентной абсолютно жесткой монолитной массой, имеющей одинаковые с реальным изделием массу и моменты инерции относительно главных центральных осей. В результате расчета его динамических свойств получено шесть собственных частот колебаний, а также перемещение и ускорения в каждой точке блока. Эти данные выступают как вынуждающие воздействия, действующие на отдельные элементы конструкции блока РЭС, например, печатные платы. После этого производится исследование динамического поведения отдельных радиокомпонентов, установленных на монтажных платах, для которых поля перемещений и напряжений, полученные в результате динамического анализа печатной платы, выступают как вынужденные воздействия на каждый радиокомпонент.

*Во второй главе* в соответствии с принципом поэтапного моделирования решена задача расчета системы виброизоляции блоков РЭС.

Расчет системы виброизоляции блоков РЭС производится в следующем порядке. При работе системы амортизации в зарезонансной области для развязывания колебаний по шести обобщенным координатам (т. е., чтобы вынуждающие колебания по одной из координат не вызывали колебаний по остальным координатам) выбираются схемы нагружения с симметричным расположением амортизаторов относительно плоскостей, проходящих через центр тяжести блока, а для эффективного демпфирования

резонансных колебаний обеспечивается связанность поступательных и угловых колебаний амортизируемого блока за счет соответствующих несимметричных схем нагружения.

Согласно выбранной схеме нагружения амортизаторов рассчитываются реакции в амортизаторах и компенсирующие прокладки для устранения перекосов, вызванных различной статической деформацией амортизаторов. Для уравнений движения системы амортизации блока РЭС записана характеристическая матрица, из детерминанта которой определены шесть собственных частот колебаний виброизолированного блока.

Получены часовые зависимости перемещений и ускорений любой точки блока РЭС в резонансной и зарезонансной областях в случае вибрационного и ударного нагружения; определены амплитуды линейных и угловых перемещений произвольной точки блока в зарезонансной области при воздействии вибрации в случае установившихся колебаний. Методом последовательных приближений произведен расчет перемещений и ускорений системы виброизоляции со слабым демпфированием, работающей в резонансной области.

По приведенной выше схеме расчета составлена программа «AMORT», которая позволяет производить:

- выбор схемы нагружения (пространственной или однонаправленной) и типоразмеров амортизаторов в соответствии с рассчитанными значениями их статических реакций, а также компенсирующих прокладок для устранения перекосов, вызванных разностью статических деформаций амортизаторов;

- расчет собственных частот колебаний системы амортизации блока РЭС;

- расчет линейных и угловых перемещений и ускорений в каждой точке блока РЭС (в местах крепления контура печатной платы) в случае вибрационного и ударного воздействия.

*Третья глава* посвящена разработке методов расчета динамических свойств пластинчатых несущих конструкций РЭС.

Показано, что тонкостенные элементы конструкций различной конфигурации с присоединенными радиоэлементами являются неотъемлемой частью современного аппарата. Так как тонкостенные конструкции и элементы, установленные на них, наиболее чувствительные к вибрационным и ударным воздействиям, то и обеспечение их надежной работы должно быть первостепенным.

Наличие у конструктора иммитационной модели пластинчатой конструкции на этапе проектирования дает ему возможность произвести расчет и прогнозирование ее динамических параметров при заданных условиях

эксплуатации.

В главе на основании проведенного анализа литературных источников дается характеристика существующих моделей и методов расчета динамических свойств пластинчатых несущих конструкций. Отмечено, что задача динамики таких объектов тесно связана с учетом анизотропных свойств применяемых материалов, а также с вопросом взаимодействия несущего основания с системой присоединенных элементов.

Сделан вывод, что в существующих САПР анализа динамических свойств вибропрочных РЭС заложены «грубые» математические модели, которые в основном строятся на классической гипотезе прямых нормалей и пригодны для анализа динамики ПНК с высокими сдвиговыми характеристиками (типа стальной пластинки). Радиоэлементы в таких конструкциях учитываются с помощью поправочных коэффициентов.

В нашем случае печатный узел рассматривается как взаимосвязанная система, состоящая из несущего основания и расположенных на нем радиоэлементов, представленных как сосредоточенные массы и описанных с помощью обобщенных функций. Контур несущего основания движется по закону, определяемому при расчете полей перемещений виброизолированного блока РЭС.

В основу построения математической модели анализа динамических параметров ПНК положена гипотеза, предложенная акад. Амбарцумяном.

Удельный вес ПНК с присоединенными элементами представлен следующим образом:

$$\rho = \rho_0 \left[ 1 + \sum_{n=1}^S \gamma_n \delta(x - x_n) \delta(y - y_n) \right]$$

где:

$$\gamma_n = \frac{m_n}{M}$$

$x_n$

$y_n$

$\rho_0$

$m_n$

$M$

$S$

- относительный удельный вес присоединенного элемента;
- точки крепления присоединенных радиоэлементов;
- удельный вес собственно ПНК;
- масса присоединенного элемента;
- масса платы;
- количество радиоэлементов на плате.

Для пластинчатой несущей конструкции, шарнирно закрепленной по контуру, записана разрешающаяся система дифференциальных уравнений. Разделение переменных полученной системы пяти дифференциальных уравнений произведено методом Бубнова-Галеркина. Решение системы уравнений относительно временного аргумента проведено операторным методом. Получены зависимости для определения частоты собственных колебаний, а также полей перемещений, усилий и мо-

ментов для всей ПНК как в нормальной, так и в тангенциальной плоскостях.

Для нового класса монтажно-коммутационных оснований - плетеных плат с присоединными элементами построена математическая модель, в геометрических соотношениях которой сохранены нелинейные члены. Такая постановка задачи даст возможность анализировать динамику МКО в случае больших прогибов последней. Решение системы дифференциальных уравнений в случае шарнирного закрепления МКО к несущей рамке ищем в виде двойных тригонометрических рядов. После соответствующих преобразований и применения к системе дифференциальных уравнений метода Бубнова-Галеркина получены зависимости, которые решаются численно-аналитическим методом. В результате решения задачи численным методом находится амплитуда и частота собственных колебаний платы (с использованием эллиптического интеграла второго рода), а амплитуда вынужденных колебаний определяется по методу Ритца.

На основании разработанных математических моделей составлен комплекс прикладных программ «NELIN» и «VIBR», которые позволяют:

- определять весь спектр собственных частот как в нормальном так и в тангенциальных направлениях платы;
- анализировать переходные и установившиеся процессы колебаний (поперечных и продольных) под воздействием внешней возмущающей нагрузки;
- находить усилия и моменты в локальной точке платы, а также определять поля их распределения по всей плате;
- полученные аналитические решения позволяют достаточно просто строить алгоритмы оптимизации и синтеза вибропрочной печатной платы;
- исследовать зависимости собственных частот, полей перемещений, усилий и моментов от:

- а) геометрических размеров несущего основания;
- б) веса и координат размещения присоединенных элементов;
- в) физических параметров материала платы.

*Четвертая глава посвящена решению следующих задач:*

- определению напряженно-деформированного состояния выводов монтажных элементов и расчета вибропрочности паяных соединений;
- исследованию влияния механических напряжений на электрические параметры полупроводниковых приборов;
- экспериментальным исследованиям.

Полученные при решении задачи динамического анализа пластинчатой конструкции поля перемещений выступают как вынужденные воздействия на присоединенные к ПНК радиоэлементы.

Для расчета прочности контакта ЭРЭ и ИС с печатной платой при инженерных расчетах целесообразно применять простые механические модели,

которые представляются в виде плоских и пространственных стержневых систем со сосредоточенными массами. В главе разработана математическая модель, которая дает возможность определять напряжения в выводах элементов в случае равномерного и неравномерного распределения их по длине контакта.

Для обеспечения условий механической прочности при вибрационных и ударных воздействиях механические напряжения в выводах не должны превышать предела выносливости паяных соединений.

Для подтверждения адекватности разработанных математических моделей реальным физическим объектам и подтверждения полученных теоретических результатов проведены многочисленные экспериментальные исследования. Была создана специальная установка для определения спектра собственных частот пластинчатых НК. Измерения проводились пьезоэлектрическим методом. Исследовались образцы прямоугольной формы из стеклопластика (СВАМ) и алюминиевого сплава (Д16-АТ) при шарнирном закреплении контура. Исследования позволили определить погрешность при расчете собственных частот по классической и сдвиговой теории. Установлено, что увеличение толщины несущего основания и уменьшение его сдвиговой жесткости приводит к увеличению относительной ошибки определения собственной частоты пластинчатой конструкции по классической теории, что подтверждает результаты теоретических исследований. Причем с возрастанием номера гармоники ошибка увеличивается. Ошибка определения частоты собственного тона составила 10-14 % (для обеих теорий). Связана она с идеализацией условий закрепления, подтверждением чему является уменьшение ошибки при определении частоты по сдвиговой теории для высших форм колебаний. Проводились также измерения амплитудно-частотных характеристик реальных конструкций функциональных ячеек на динамической виброиспытательной установке ST 5000/300/1 в режиме синусоидальных возбуждений. Ошибка определения амплитуды колебаний в центре несущей ПП не превышала 18 %, а ошибка определения основной частоты колебаний конструкции - 12 %, что связано с разбросом физико-механических характеристик конструкционных материалов, идеализацией условий закрепления и игнорированием в математической модели аэродинамическими и конструкционными потерями.

*В приложении* приведены результаты экспериментальных исследований, проведены расчеты, дополняющие работу и результаты программной реализации предложенных расчетов, а также документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы в промышленности.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Выполненная работа является завершенным научным исследованием, в которой разработаны методики проектирования виброударопрочных конструкций РЭС современных типов, включающие в себя: блоки, пластинчатые несущие конструкции, гибкие монтажно-коммутационные основания.

Основные результаты диссертационной работы можно свести к следующему:

1. Проведен анализ динамических воздействий и изучено их влияние на работоспособность РЭС, работающих в условиях внешних механических воздействий:

- для РЭС наиболее опасными являются: зона резонансов конструктивных элементов и зона установочных и внутренних резонансов ЭРЭ;

- подавляющая часть отказов в РЭС вызвана усталостными явлениями в элементах конструкций;

- микроминиатюризация элементной базы современных РЭС ведет к увеличению частот внутренних и установочных резонансов.

2. На основании принципа поэтапного моделирования разработана «сквозная» математическая модель анализа динамики блока РЭС, работающего в условиях внешних механических воздействий, которая отражает иерархию построения его конструкции и обеспечивает требуемую детализацию анализа.

3. Предложена методика расчета системы виброизоляции блоков РЭС и разработан комплекс прикладных программ «AMORT», который позволяет конструктору на этапе проектирования РЭС:

- на основании заданного вибрационного воздействия производить выбор монтажной схемы амортизации и типоразмеров амортизаторов из банка данных;

- производить динамический расчет системы амортизации, который включает: расчет собственных частот системы, расчет на вибрационные воздействия в резонансной и зарезонансной областях, расчет на ударные воздействия.

4. Построены аналитические решения задач динамического анализа пластинчатых конструкций РЭС с системой присоединенных элементов, при этом:

- применен вариационный метод Бубнова-Галеркина для определения частот, полей напряжений и перемещений пластинчатых несущих конструкций с присоединенными ЭРЭ;

- с помощью двойных тригонометрических рядов произведено разделение переменных в дифференциальных уравнениях движения ортотропных

вязкоупругих НК;

- для решения дифференциальных уравнений с часовым аргументом применен операторный метод и метод Рунге;

- электрорадиоэлементы учтены как сосредоточенные массы и описаны с помощью обобщенных функций.

5. Для прямоугольной пластинчатой конструкции получено аналитическое решение и разработана программа «VIBR» для определения всего спектра собственных частот и полей перемещений в нормальном и тангенциальном направлениях печатной платы в зависимости от физико-механических и геометрических характеристик платы, веса и координат крепления электрорадиоэлементов.

6. Построена математическая модель, получено аналитическое решение и разработана программа «NELIN» для анализа динамических свойств гибких монтажно-коммутационных оснований с учетом больших прогибов.

7. Предложен метод расчета вибропрочности крепления ЭРЭ на монтажных основаниях. Решена задача определения долговечности паяных соединений выводов ЭРЭ при вибрационных нагрузках.

В результате проведенных исследований разработана методология построения математических моделей и методики их решения, а созданное на их основе прикладное программное обеспечение позволило значительно сократить затраты при проектировании виброударопрочных РЭС, а также сократить сроки проведения технологических операций стендовых и натуральных испытаний радиоаппаратуры.

В дальнейшем разработанные математические модели могут быть использованы при создании гибких монтажно-коммутационных структур на тканном основании, а также для анализа многослойных структур в области функциональной и микро-электроники, так как позволяет прогнозировать напряженно-деформированное состояние в каждом отдельном слое многослойного конструктива.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Когут В.М., Стасевич С.П., Шишка А.В. Оптимальные управления напряженным состоянием с помощью тепловых источников. //Деп.сб. «Совершенствование методов проектирования производства РЭА» в УкрНИИ-ИНТИ, 1986, N 1043Ук-86. - С.70-78.

2. Когут В.М., Стасевич С.П., Шишка А.В. Математическая модель для исследования динамики пластинчатых конструкций с присоединенными массами. //Тез.Всесоюзн.конф., Пенза, 1986, С.23 -24.

3. Когут В.М., Сорока И.И., Стасевич С.П. Оптимальное проектирование

печатных плат при внешних механических воздействиях.// Вестн. Львов. политехн. ин-та. 1988. N 226. С. 56-58.

4. Когут В.М., Стасевич С.П., Костюк И.В., Сорока И.И., Шишка А.В. Математическая модель колебаний пластинчатых конструкций РЭА при больших прогибах. - Деп. в УкрНИИНТИ, 1988, N 2304-Ук88. - 10 с.

5. Когут В.М., Стасевич С.П. Динамический расчет системы виброизоляции блоков РЭС.//Тез. докл. школы-семинара «Опыт разработки и применения приборно-технологических САПР», Львов, 1991. - С. 17.

6. Когут В.М., Костюк И.В., Стасевич С.П. Автоматизированное моделирование динамического поведения амортизированных блоков РЭС.//Труды Всесоюзн. научн.-техн. конф. «Методы и средства оценки повышения надежности приборов, устройств и систем», Пенза, 1992. - С. 23-25.

7. Когут В.М., Стасевич С.П. Вынужденные колебания этажерочной конструкции пластин с присоединенными элементами.//Вестн. Львов. политехн. ин-та. 1988. N 245. С.43-46.

8. Когут В.М., Стасевич С.П., Рымар Н.В. Автоматизация проектирования пластинчатых конструкций РЭА, подвергающихся внешним механическим воздействиям.//Вестн. Львов. политехн. ин-та. 1989. N 236. - С.64-67.

9. Когут В.М., Костюк И.В., Сорока И.И., Стасевич С.П. Моделирование температурного поля монтажно-коммутационного основания при пайке ИК-излучением.//Научн.техн. конф., Владивосток, 1990. - С.142-149.

10. Стасевич С.П., Зарецкий В.И. Моделирование оптимальных температурных полей предварительно напряженных плат.//Вестн. Львов. политехн. ин-та. 1987. N 215. - С.43-45.

11. Стасевич С.П., Костюк И.В., Оптимальное управление температурным полем пластинчатой конструкции.// Труды 6 Всесоюзн. конф. по управлению в механических системах. - Львов, 1988. - т.2. - С. 142.

12. Когут В.М., Костюк И.В., Стасевич С.П., Воблий О.М. Моделирование механических полей багатощарових ІС та мікроборок.//Наук.-техн. конф. «Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці». - Львів, 1993.- С.29.



AB 27.559

**AB 27.559**