

ПЕРШИН ЕВГЕНИЙ ОЛЕГОВИЧ

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДСИСТЕМЫ
АНАЛИЗА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ
ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Специальность 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования» (приборостроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук



МОСКВА 2011

Работа выполнена во Владимирском филиале Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шалумов А.С.

Научный консультант: кандидат технических наук, старший научный
сотрудник
Малютин Н.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Увайсов С.У.
кандидат технических наук, доцент
Носков В.Н.

Ведущее предприятие: Научно-исследовательский институт супер
ЭВМ (г. Москва)

Защита состоится «16» февраля 2012 г. в 10 часов на заседании диссертационного Совета Д 217.047.01 в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-исследовательский экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» (ФГУП НИИАЭ) по адресу: 105187, г. Москва, ул. Кирпичная, д. 39-41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП НИИАЭ по адресу: 105187, г. Москва, ул. Кирпичная, д. 39-41.

Автореферат диссертации разослан «30» января 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д217.047.01
доктор технических наук



О.О. Варламов

Актуальность темы исследований. Практически все современные автоматизированные технические системы и объекты имеют в своём составе радиоэлектронные средства (РЭС), осуществляющие функции управления, регулирования, координации и связи. При этом круг задач, решаемых с помощью РЭС, с каждым годом расширяется, а их сложность возрастает. Это привело к тому, что оснащённость РЭС таких объектов, как корабли, самолеты, спутники, чрезвычайно возросла, и отказ в работе хотя бы одного из устройств может привести к отказу всего объекта. Поэтому требования к надёжности радиоэлектронных средств постоянно растут.

Надёжность и стабильность работы радиоэлектронных средств значительно ухудшается при механических воздействиях - вибрациях, ударах, линейных перегрузках, акустических шумах. Источниками механических воздействий могут быть различные двигатели, в том числе и реактивные, дорожная тряска, быстро вращающиеся разбалансированные массы, взрывы и многие другие. Сложность задачи защиты электронных средств от механических воздействий обусловлена тем, что, несмотря на непрерывное повышение надёжности элементной базы (резисторов, конденсаторов, микросхем и других радиоэлементов), интенсивность механических воздействий возрастает быстрыми темпами из-за увеличения скоростей подвижных объектов. Нередко отказы РЭС при механических воздействиях связаны с выходом за пределы, установленные нормативно-технической документацией (НТД), механических характеристик конструкций РЭС – ускорений, перемещений, напряжений, что приводит к нарушению прочности и устойчивости работы аппаратуры. Кроме того, к нарушениям прочности РЭС приводит накопление усталостных повреждений в выводах радиоэлементов (РЭ) с последующим их разрушением, и именно усталость является основным источником отказов в работе РЭС при механических воздействиях.

В связи с этим время до усталостного разрушения выводов РЭ, которое не должно быть меньше суммарной длительности механических воздействий на аппаратуру в условиях эксплуатации, является важной механической характеристикой. С каждым днем в России разбивается все больше и больше самолетов. Как показывает анализ, одной из главных причин является выработка ресурса для старых самолетов, а для новых механические и тепловые перегрузки аппаратуры, располагаемой на борту. Это происходит потому, что не проводится моделирование РЭС. Проводят, как правило, только испытания, да и то не в процессе проектирования, а уже когда создан опытный образец. При этом при испытаниях никто не контролирует механические ускорения и напряжения на каждом радиоэлементе, а тем более время до усталостного разрушения. Анализ приблизительно 400 отчетов, собранных за 8 лет по результатам механических испытаний приборов и их комплектующих, показали, что усталость является причиной 80% отказов радиоэлементов.

Экспериментальные исследования РЭС при их проектировании являются трудоемкими и в большинстве случаев не позволяют оценить длительную работоспособность РЭ при механических воздействиях, так как время испытаний аппаратуры при номинальных нагрузках достигает десятков тысяч часов, что практически не реализуемо. Таким образом, в настоящее время весьма актуальна задача компьютерного моделирования РЭ в составе печатных узлов (ПУ) и блоков РЭС для анализа усталостной прочности радиоэлементов при механических воздействиях.

Практическое применение аналитических методов для решения задач динамики конструкций РЭС сопряжено с рядом трудностей. Конструкции современных РЭС представляют собой сложные механические системы с множеством упругих и жёстких связей, с неклассическими для строительной механики способами крепления отдельных конструктивных элементов. Кроме того, радиоэлементы представляют собой механические конструкции, в которых могут возникать резонансные колебания, усиливающие механические нагрузки в десятки раз.

Для такой механической системы сложно построить расчётную модель, достаточно простую и в то же время хорошо отражающую физические и динамические свойства. При составлении и решении уравнений движения конструкции возникает ряд математических трудностей.

Эти причины обуславливают необходимость применения численных методов для расчёта динамических параметров конструкций РЭС. Метод конечных элементов является одним из наиболее эффективных численных методов решения математических задач, описывающих состояние физических систем сложной структуры. В последние десятилетия он занял ведущее положение и получил широкое применение. В настоящее время существует множество программных реализаций метода конечных элементов. Это, прежде всего, так называемые «тяжелые» САЕ-системы, причем практика показывает, что большинство промышленных предприятий отдаёт предпочтение крупным универсальным САЕ-системам типа: NASTRAN, COSMOS-M, MARC, ANSYS.

Однако применение универсальных систем требует серьезных теоретических знаний и опыта использования данных программ. Кроме того, отсутствие специализированных баз данных по параметрам материалов конструкций РЭС, а также по параметрам радиоэлементов увеличивает время построения и ставит под сомнение адекватность моделей, создаваемых в универсальных программах. Другим существенным недостатком универсальных программ является ограниченность, либо полное отсутствие средств проведения усталостного анализа.

Решением задачи моделирования механических процессов в конструкциях РЭС занимались такие специалисты как Маквецев Е.Н., Тартаковский А.М., Кофанов Ю.Н., Кожевников А.М., Кришук В.Н., Шалумов А.С., Фадеев О.А., Ваченко А.С., Способ Д.А. и др. Но в данных работах отсутствует методика моделирования механических процессов в конструкциях РЭС на всех иерархических уровнях, включая уровень отдельных РЭ, позволяющая в минимальные сроки и с минимальными затратами проводить расчет на различные механические воздействия и принимать решение об обеспечении стойкости РЭС к механическим воздействиям. Кроме того, отсутствуют методы и алгоритмы расчёта времени до усталостного разрушения конструкций радиоэлементов произвольной геометрической конфигурации и варианта установки.

Цель работы. Целью работы является повышение показателей надежности разрабатываемых радиоэлектронных средств, отвечающих требованиям нормативно-технической документации по механическим характеристикам, сокращение сроков и стоимости их создания за счет применения средств автоматизации моделирования механических процессов в конструкциях РЭС и оценки времени до усталостного разрушения.

Задачи работы. Для реализации цели данной работы согласно вышеизложенным предложениям необходимо решить следующие задачи:

1. Исследование особенностей конструкций радиоэлементов, входящих в состав РЭС, с точки зрения моделирования механических процессов.
2. Разработка алгоритмов генерации конечноэлементных (КЭ) моделей типовых и нетиповых радиоэлементов с произвольными вариантами установки;
3. Разработка алгоритмов оценки времени до усталостного разрушения конструкций ПУ и РЭ при вибрационных и ударных воздействиях.
4. Разработка методов и интерфейсов визуализации результатов моделирования.
5. Практическая реализация разработанного метода и алгоритмов в виде автоматизированной подсистемы анализа усталостной прочности конструкций ПУ при механических воздействиях.
6. Разработка базы данных (БД) параметров материалов конструкций ПУ и РЭ, включающей усталостные свойства.
7. Разработка методики синтеза и анализа проектных решений по обеспечению защиты конструкций ПУ от усталостного разрушения при механических воздействиях с применением разработанной автоматизированной подсистемы.

8. Внедрение созданной методики в практику проектирования на промышленных предприятиях и в учебный процесс вузов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используется теория системного анализа, методы прикладной механики, теории прочности и разрушения, методы вычислительной математики и компьютерной графики.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в разработке:

- метода генерации конечноэлементных моделей печатных узлов и радиоэлементов, отличающегося от известных возможностью получать конечноэлементные модели типовых и нетиповых радиоэлементов (произвольной геометрической конфигурации и варианта установки) в полностью автоматическом режиме на основе твердотельной модели, созданной в подсистеме АСОНИКА-ТМ;

- алгоритмов расчёта времени до усталостного разрушения конструкций печатных узлов и радиоэлементов при воздействии гармонической и случайной вибрации, а также многократного удара, отличающихся от существующих возможностью непосредственной реализации средствами макропрограммирования ANSYS на основе результатов анализа на механические воздействия;

- структуры автоматизированной подсистемы анализа усталостной прочности конструкций печатных узлов на механические воздействия, отличающейся от существующих систем усталостного анализа интегрированностью в общий процесс автоматизированного проектирования конструкций РЭС и высокой степенью автоматизации, не требующей от пользователя специальных знаний в области усталостного разрушения;

- методики анализа и синтеза проектных решений по обеспечению защиты конструкций печатных узлов и радиоэлементов от усталостного разрушения при механических воздействиях, отличающейся от существующих включённостью в более общую методику обеспечения надёжности конструкций РЭС при механических воздействиях с применением системы АСОНИКА, позволяющая в минимальные сроки и с минимальными усилиями создавать КЭ модели печатных узлов, проводить расчет на механические воздействия, включая анализ усталости, и принимать обоснованное решение об обеспечении стойкости конструкций ПУ к механическим воздействиям.

Практическая полезность работы состоит в том, что использование созданных методических и программных средств позволяет повысить эффективность моделирования и сократить сроки и стоимость ранних этапов проектирования РЭС с соблюдением требований нормативной документации по механическим характеристикам.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы (метод, алгоритмы, методики и программное обеспечение) внедрены в практику проектирования и производства ОАО РКК «Энергия». Внедрение результатов подтверждено соответствующими актами.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Московского государственного института электроники и математики и используются при выполнении студентами специальности «Управление качеством» курсовых и дипломных работ.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на международных и российских конференциях: XV и XVI Международных научно-технических конференциях «Информационные системы и технологии. ИСТ-2009, ИСТ-2010» (г. Нижний Новгород, 2009 г., 2010 г.), Международных конференциях «Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в управлении инновационными проектами. Инноватика – 2009, Инноватика – 2010» (г. Сочи, 2009 г., 2010 г.), Всероссийских научно-методических конференциях «Повышение качества высшего профессионального образования» (г. Красноярск, 2009 г., 2010 г.), Девятом международном симпозиуме «Интеллектуальные системы. INTELS-2010» (г. Владимир, 2010 г.).

Публикации. По материалам диссертационных исследований опубликовано 15 научных работ, в том числе 9 статей, 5 из них в журналах из перечня ВАК.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка использованных источников и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи настоящей работы, отмечены её научная новизна и практическая ценность.

В первой главе проведён анализ проблемы моделирования механических процессов в конструкциях РЭС, дано обоснование её актуальности. Рассмотрены механические воздействия, которым могут подвергаться конструкции РЭС в процессе эксплуатации. Отмечено, что к усталостному разрушению приводят воздействия, которые могут быть приложены длительное время, а именно вибрации и многократные удары.

Рассмотрена существующая схема моделирования механических процессов в конструкциях РЭС на предприятиях, где это имеет место, но в подавляющем большинстве случаев, как показывает практика, моделирование РЭС не проводится.

Проведен анализ программного обеспечения, применяемого для моделирования механических процессов в РЭС. Рассмотрен перечень применяемых специализированных программ, а также универсальных конечно-элементных САЕ-систем для моделирования конструкций радиоэлектронных средств. Отмечены достоинства универсальных программ, заключающиеся в возможности построения моделей любой степени сложности. Однако применение универсальных систем требует серьезных теоретических знаний и опыта использования данных программ. Кроме того, отсутствие специализированных баз данных по параметрам материалов конструкций РЭС, а также по параметрам радиоэлементов увеличивает время построения и ставит под сомнение адекватность моделей, создаваемых в универсальных программах. Другим существенным недостатком универсальных программ является ограниченность, либо полное отсутствие средств проведения усталостного анализа.

Исследования процесса проектирования РЭС с применением компьютерного моделирования механических процессов и существующих специализированных программ моделирования, проведенные в первой главе диссертации, показали отсутствие на сегодняшний день необходимого программного и методического обеспечения, позволяющего разработчику РЭС в заданные сроки построить адекватную модель конструкции, провести расчет на механические воздействия, дать оценку времени до усталостного разрушения и принять решение по повышению надежности проектируемых РЭС. Это прежде всего связано с тем, что в специализированных программах, используемых для анализа механических характеристик конструкций РЭС на уровне блоков, моделирование механических процессов в выводах РЭ не проводится, а в программах, используемых на уровне ПУ и РЭ, предусмотрен только расчет механических напряжений в конструкциях отдельных типовых РЭ, но отсутствует возможность для оценки времени до усталостного разрушения. Отсутствуют расчетные модели РЭ, позволяющие провести оценку времени до усталостного разрушения, которые зависят от варианта установки, материала, геометрических размеров и формовки выводов.

Выход из сложившейся ситуации лежит в разработке методики, позволяющей с минимальными усилиями синтезировать математические модели радиоэлементов, входящих в состав ПУ и блоков РЭС. Данные модели должны отображать особенности геометрии типовых и нетиповых РЭ. Реализация методики предполагает создание пользовательских интерфейсов, автоматизирующих создание геометрических моделей РЭ, разработку специальных алгоритмов, преобразующих геометрические модели в конечноэлементные аналоги, которые

позволили бы использовать одну из универсальных САЕ-систем для проведения моделирования.

На основе проведенного анализа предложена схема моделирования, представленная на рис. 1, согласно которой взаимодействие конструктора РЭС с математическим аппаратом САЕ-системы осуществляется через набор специализированных интерфейсов на языке, доступном для разработчика аппаратуры. В данной схеме отсутствует посредничество аналитика-расчетчика между конструктором и системой анализа, что увеличивает эффективность моделирования. Средства автоматизации выполняют все типовые действия, характерные для моделирования механических процессов в конструкциях РЭС, снижая тем самым трудоемкость проведения анализа и участие пользователя в работе, легко поддающейся формализации. В данной схеме конструктор осуществляет анализ самостоятельно без посредничества аналитика. Участие в анализе расчетчика косвенное и сведено к минимуму. Расчетчик только исследует, создает и внедряет новые модели типовых элементов конструкций РЭС.

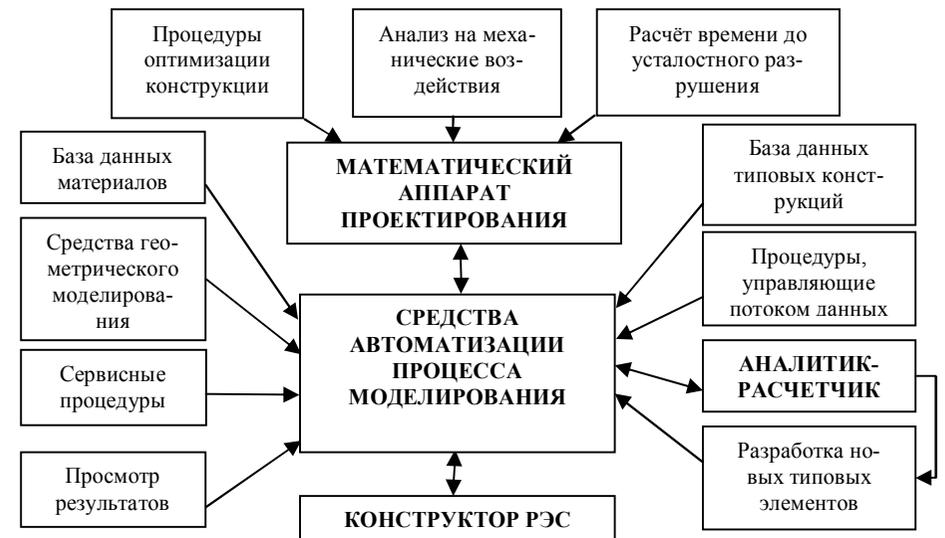


Рис. 1. Предлагаемая схема процесса моделирования конструкций РЭС

Обоснован выбор универсальной САЕ-системы ANSYS в качестве математического ядра, а также выбор специализированной программы АСОНИКА-ТМ в качестве системы геометрического моделирования конструкций печатных узлов и радиоэлементов.

Сформулированы цель работы и задачи, необходимые для достижения поставленной цели.

В конце первой главы дан обзор основных моделей и теорий, применяемых при усталостных расчётах и необходимых для разработки алгоритмов расчёта усталости конструкций радиоэлементов при механических воздействиях.

Усталостное разрушение представляет собой сложный физический процесс, с трудом поддающийся точному описанию на микроскопическом уровне, включающий стадии зарождения микротрещин и их последующего развития.

Несмотря на всю сложность данного явления, оценка степени усталостного повреждения в элементах конструкций и компонентов является в настоящее время неотъемлемой составляющей процесса проектирования.

Множество теорий, методов и гипотез было предложено, особенно в последнее время, для анализа усталости для различных типов нагружения. Среди них можно выделить:

– механизм непрерывного накопления повреждений (Continuum Damage Mechanics), рассматривающий процесс накопления повреждений как непрерывный интегральный процесс, вследствие чего отпадает необходимость введения понятия «цикл нагружения»;

– методы критических плоскостей (Critical Plane Approaches), постулирующие, что усталостное разрушение наступает преимущественно в отдельных плоскостях, называемых критическими, и поэтому рассматривающие накопление повреждений в пределах упомянутых плоскостей.

Однако большинство современных теорий ещё недостаточно проверены временем и опытом и их следует использовать с некоторой осторожностью. В частности, это касается методов анализа для сложного (многоосевого) нагружения.

Долгие годы экспериментальных исследований привели к двум основным подходам (или моделям) для оценки времени до усталостного разрушения:

1. Подход, основанный на напряжениях (stress-life approach S-N).

2. Подход, основанный на деформациях (strain-life approach e-N).

Первый подход предполагает наличие достаточно невысоких нагрузок (напряжений) и большого количества циклов. При этом деформации остаются по большей части упругими. Данную модель также называют многоцикловою усталостью (high-cycle fatigue).

Второй подход предполагает наличие довольно высоких нагрузок (напряжений и деформаций) и сравнительно небольшого количества циклов. При этом нельзя игнорировать пластическую составляющую полной деформации. Данную модель также называют малоцикловою усталостью (low-cycle fatigue).

При многоцикловою усталости может быть использовано т.н. уравнение Басквина:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_f' (2N_f)^b$$

где $\frac{\Delta\sigma}{2}$ – амплитуда напряжения в цикле,

N_f – число циклов до разрушения,

σ_f' – коэффициент усталостной прочности, зависящий от материала,

b – показатель усталостной прочности (показатель Басквина), зависящий от материала.

Уравнение Басквина является одним из основных уравнений, используемых при многоцикловою усталости, хотя на практике чаще используется следующая зависимость:

$$N_f = N_b \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_a} \right)^m$$

где N_f – число циклов до разрушения,

N_b – базовое число циклов (обычно принимается $N_b = 10^7$),

σ_0 – предел выносливости (или предел усталости) для материала,

σ_a – амплитуда напряжения в цикле,

m – параметр, зависящий от материала.

Основным уравнением при малоцикловой усталости служит уравнение Мэнсона-Коффина-Басквина:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c$$

где $\frac{\Delta \varepsilon}{2}$ – амплитуда полной деформации в цикле;

N_f – число циклов до разрушения;

σ_f' – коэффициент усталостной прочности (fatigue strength coefficient), зависящий от материала;

b – показатель усталостной прочности или показатель Басквина (fatigue strength exponent), зависящий от материала;

ε_f' – коэффициент усталостной пластичности (fatigue ductility coefficient), зависящий от материала;

c – показатель усталостной пластичности (fatigue ductility exponent), зависящий от материала;

E – модуль упругости.

Обе модели разрабатывались при испытании опытных образцов в условиях простого нагружения (циклическое растяжение-сжатие, кручение). В результате получались экспериментальные кривые, характеризующие зависимость циклически изменяющегося параметра (напряжения или полной деформации) от числа циклов до разрушения. При многоцикловой усталости данные кривые называют кривыми усталости или кривыми Веллера (Wöhler curves).

Для их применения в условиях сложного (многоосевого) нагружения применяются так называемые эквивалентные величины (эквивалентные напряжения или эквивалентные деформации). Например, чтобы применить кривую Веллера (построенную для опытного образца в условиях циклического растяжения-сжатия) для случая многоосевого циклического нагружения в опасной точке конструкции, необходимо вычислить амплитуду эквивалентного напряжения по одному из известных критериев. Число циклов до разрушения при данной амплитуде эквивалентного напряжения будет равно числу циклов до разрушения при циклическом растяжении-сжатии с той же амплитудой напряжения.

Существует множество критериев определения эквивалентных величин. Они основаны на применении статических критериев текучести для анализа усталости при сложном нагружении. Далее приведены наиболее известные критерии в терминах главных напряжений ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$):

1. Критерий максимального главного напряжения.

$$\sigma_1 = \sigma_e$$

2. Критерий максимального касательного напряжения (критерий Треска).

$$\left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right| = \tau_e$$

3. Критерий Мизеса.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_e$$

Если история нагружения представляет собой случайный процесс (т.е. не является циклической), то для применения моделей усталости существуют специальные методы и алгоритмы в зависимости от способа задания истории нагружения. В первой главе рассматриваются «дождевые» алгоритмы подсчета циклов, их преимущества, позволяющие учесть эффект от последовательности приложения циклов с различной амплитудой. Дается обоснование методов, позволяющих рассчитывать время до усталостного разрушения в случае, когда история нагружения характеризуется графиком зависимости спектральной плотности нагрузки от частоты. Эти методы позволяют проводить расчёт усталости при вероятностном анализе, таком как анализ на случайную вибрацию.

Во второй главе разрабатывается метод автоматической генерации конечноэлементных моделей печатных узлов на основе геометрических моделей, создаваемых в подсистеме АСОНИКА-ТМ. Рассматриваются особенности моделей радиоэлементов в АСОНИКА-ТМ, состоящих из набора геометрических примитивов различной формы.

Для генерации конечноэлементных ANSYS-моделей радиоэлементов необходимо в первую очередь преобразовать геометрические примитивы, составляющие модель АСОНИКА-ТМ, в аналогичные геометрические объекты системы ANSYS.

ANSYS-модель включает в себя две взаимосвязанные модели: твердотельную и конечноэлементную. Причём первая модель используется лишь как вспомогательное средство для генерации второй, так как для проведения анализа нужна лишь конечноэлементная модель.

Одной из основных проблем, возникающих при конечноэлементном разбиении, является обеспечение связности модели. Твердотельная модель состоит из набора геометрических объектов или объёмов различной формы. Если не затратить дополнительных усилий, то эти объёмы будут никак не связаны между собой, сосуществовая в пространстве как совокупность разрозненных объектов. На этапе конечноэлементного разбиения сетка элементов будет отдельно сгенерирована для каждого несвязанного объёма. В результате геометрическое расположение узлов сетки в местах касания объёмов окажется различным для каждого из соприкасающихся объёмов. Такая модель непригодна для анализа, поскольку не обеспечивает передачу нагрузок и деформаций между частями конструкции, моделируемыми разрозненными геометрическими объектами.

Для обеспечения связности на этапе твердотельного моделирования необходимо средствами логических операций состыковать разрозненные объекты в единую твердотельную модель, что автоматически обеспечит совпадение узлов сетки в местах касания. Использование логических операций зависит от варианта касания объёмов. Помимо касания, объекты также могут пересекаться, т.е. занимать общее пространство. В последнем случае нужно приложить дополнительные усилия путём усечения части одного из пересекающихся объёмов перед выполнением связывания.

Другие сложности, возникающие при создании конечноэлементных моделей, зависят от особенностей объектов моделирования. В связи с этим рассматриваются особенности конструкции и варианты установки радиоэлементов с точки зрения возможностей их разбиения на конечные элементы. Акцентируются вопросы обеспечения связности твердотельных моделей радиоэлементов в ANSYS.

После рассмотрения примеров моделей радиоэлементов можно сделать несколько заключений:

– Большинство выводов РЭ представляют собой трубную конструкцию круглого или прямоугольного сечения, состоящую из нескольких участков, разделённых местами перегиба. Вывод может касаться или пересекаться с корпусом или элементами крепления. Размеры кор-

пуга, как правило, значительно превышают размеры выводов. При этом отдельные модели РЭ могут содержать не один десяток выводов. Принимая всё это во внимание, а также то, что именно выводы являются наиболее уязвимыми частями конструкции РЭ с точки зрения усталостной прочности, необходимо создать оптимизированные алгоритмы КЭ разбиения геометрии выводов стандартной формы.

- Тонкие элементы конструкции (например, клеевое соединение, а также различные прокладки) могут быть отброшены при создании твердотельной модели без потери жесткости конструкции.

- Примитивы, из которых состоят модели радиоэлементов и печатной платы, могут иметь самые различные варианты геометрического контакта. Наибольшую сложность для обеспечения связности представляют варианты касания по прямой линии и пространственной кривой, а также взаимное пересечение примитивов.

Представлен общий алгоритм генерации конечноэлементных ANSYS-моделей печатных узлов с учётом геометрии радиоэлементов, реализация которого позволит осуществлять автоматический перенос геометрических моделей из АСОНИКА-ТМ в ANSYS.

Структура алгоритма генерации с указанием основных этапов и действий, выполняемых на каждом этапе, представлена на рис. 2.

Далее разрабатываются методы и алгоритмы расчёта времени до усталостного разрушения при вибрационных и многократных ударных воздействиях, легко реализуемые средствами макропрограммирования ANSYS на основе результатов анализа на механические воздействия.

Время до усталостного разрушения в произвольной точке конструкции при гармонической вибрации определяется простым делением числа циклов до разрушения на значение частоты. Число циклов до разрушения рассчитывается согласно одному из уравнений многоциклового усталости.

Задача расчёта времени до усталостного разрушения при гармонической вибрации достаточно тривиальна в связи со следующими обстоятельствами:

- амплитуда напряжений в точках конструкции постоянна, следовательно не требуются дополнительные алгоритмы подсчёта циклов с различной амплитудой, а также исключается использование гипотез суммирования усталостных повреждений;

- нет необходимости в дополнительной корректировке среднего значения напряжения в цикле, т.к. оно равно нулю.

В узлах конечноэлементной сетки, в которых соприкасаются конечные элементы, представляющие различные материалы, возникает определённая сложность при расчёте усталости. Дело в том, что различные материалы имеют различные усталостные свойства, и результаты расчёта в узле для двух примыкающих к нему элементов могут различаться на порядок. Поэтому, после осреднения результатов расчёта по всем примыкающим к узлу конечным элементам получится результат, лишённый всякого смысла. Здесь возможны различные подходы для преодоления указанного затруднения. Во второй главе подробно рассматривается один из таких подходов.

Алгоритм расчёта времени до усталостного разрушения при случайной вибрации гораздо более сложен. Одной из основных проблем является выбор эквивалентной величины. Рассчитываемые системой ANSYS эквивалентные напряжения затруднительно применять для анализа времени до усталостного разрушения, поскольку распределение эквивалентной величины по гипотезе Мизеса отличается от распределения компонент тензора напряжений (распределённых нормально). Это связано с нелинейностью гипотезы Мизеса. Тем более затруднительно для данной гипотезы получить распределение амплитуд или локальных экстремумов эквивалентной величины, необходимых для расчёта усталости.

1. Формирование твердотельной модели печатного узла без радиоэлементов.
<p>Получение геометрических характеристик ПУ и креплений; Получение информации о слоях ПУ, в том числе ортотропных свойств материала ПУ; Преобразование данных в макрокоманды, которые передаются препроцессору ANSYS для построения твердотельной модели ПУ.</p>
2. Формирование твердотельных моделей радиоэлементов, состоящих из отдельных геометрических примитивов.
<p>Просмотр таблицы геометрических примитивов модели АСОНИКА-ТМ; Каждая строка таблицы преобразуется в набор макрокоманд ANSYS, которые управляют созданием аналогичного геометрического примитива в системе ANSYS; Тонкие элементы, согласно некоторому критерию оптимизации, отбрасываются; ANSYS-модели радиоэлементов, построенные таким способом, будут состоять из набора объемов (ANSYS Volumes), никак не связанных между собой.</p>
3. Обеспечение связности твердотельной модели.
<p>Попарная проверка всего набора объемов на предмет касания/пересечения средствами логических операций ANSYS и выявление типа геометрического контакта; В случае геометрического пересечения (т.е. перекрытия) объемов – усечение части объема, имеющего меньший приоритет; Поиск вырожденных поверхностей в местах контакта объемов и корректировка модели; Связывание объемов средствами логических операций, выбор которых зависит от выявленного варианта геометрического контакта.</p>
4. Создание конечноэлементной модели.
<p>Задание свойств материалов для ПУ и РЭ, включая элементы РЭ (выводы, корпуса); Применение для отдельных частей твердотельной модели (например, для выводов стандартной формы) оптимизированных методов КЭ разбиения; КЭ разбиение остальных частей модели; Проверка формы полученных конечных элементов, используя внутренние команды проверки ANSYS; При обнаружении элементов "слабой формы" – повторное разбиение объемов с изменением опций команды разбиения (до тех пор, пока количество элементов "слабой формы" не станет равным нулю, либо не достигнет некоторого минимума).</p>

Рис. 2. Структура алгоритма генерации конечноэлементных моделей

При случайной вибрации воздействия в местах креплений – случайные величины, имеющие одинаковые статистические параметры, однако в каждый момент времени их мгновенные значения могут различаться. Это вызовет в произвольной точке конструкции сложное многоосевое, в общем случае непропорциональное нагружение. Другими словами, направление и пропорциональное соотношение главных напряжений (или деформаций) может изменяться во времени. Для анализа усталости в условиях такого напряженного состояния обычно используют методы критических плоскостей. Методы критических плоскостей рассматривают накопление усталостных повреждений в отдельных плоскостях, в которых предполагается, что разрушение наступит с наибольшей вероятностью. Во второй главе рассмотрены методы

определенной позиции критической плоскости, а также вопросы расчета спектральной плотности эквивалентной величины на основе критериев выбора позиции критической плоскости.

Поскольку результатом анализа на случайную вибрацию являются спектральные плотности напряжения в узлах конструкции, то для расчёта времени до усталостного разрушения нужно использовать спектральные методы. Для произвольной, в т.ч. широкополосной, случайной вибрации используются различные гипотезы, позволяющие рассчитать время до разрушения непосредственно из спектральной плотности эквивалентной величины. Подробно рассматриваются гипотезы Райхера и Дирлика.

Усталостное разрушение при ударном воздействии может наступить за очень короткое время вследствие высоких напряжений и значительных пластических деформаций. Поэтому модель многоциклового усталости здесь неприменима.

Использование модели малоциклового усталости наталкивается на определённые затруднения. Это связано, во-первых, с нециклическим характером нагрузки в узлах КЭ модели конструкции, т.к. форма ударного импульса может быть произвольной; а во-вторых – со сложностью моделирования пластического деформирования в системе ANSYS.

Для расчёта полных деформаций при ударе с учётом пластичности нужно выполнить в ANSYS нелинейный анализ переходных процессов. Нелинейный анализ сложных конструкций в ANSYS требует больших затрат времени. Во время анализа могут возникнуть проблемы со сходимостью результатов. Это приведёт к необходимости уменьшения шага интегрирования, изменения условий сходимости и т.п. Кроме того, для каждого материала нужно будет задавать кривую зависимости напряжения от деформации по точкам, а также модель упрочнения.

Существуют приближённые методы, позволяющие на основе линейного анализа, результатами которого являются упругие деформации, получить соответствующие значения полных деформаций с учётом пластической составляющей. Наиболее широко применяемый метод – использование правила Нойбера для коррекции пластичности.

Нециклическое нагружение при ударе подразумевает использование алгоритмов подсчёта циклов. Во второй главе подробно рассматривается вариант «дождевого» алгоритма подсчёта циклов, являющийся стандартом Американского Общества по Испытаниям и Материалам. Каждый цикл, выделенный из истории нагружения, вносит свой вклад в накопление усталостных повреждений. Для расчёта суммарного повреждения от всех найденных циклов нужно применить одно из правил суммирования усталостных повреждений. При этом правило Пальмгрена-Майнера является наиболее распространённым.

Помимо алгоритмов усталостного расчёта и генерации конечноэлементных моделей во второй главе также рассматривается принцип взаимодействия конструктора с системой моделирования механических процессов. Предложена схема взаимодействия в терминологии лингвистического обеспечения, которая позволяет проектировщику, не обладающему знаниями необходимыми для моделирования механических процессов, управлять мощным математическим ядром CAE-системы на доступном ему языке.

В третьей главе, согласно предложенной схеме моделирования и представленным во второй главе алгоритмам, разработана структура автоматизированной подсистемы анализа усталостной прочности конструкций печатных узлов при механических воздействиях.

Подсистема даёт возможность пользователю, не имеющему специальных знаний в области механики усталостного разрушения и конечноэлементного моделирования, успешно проводить усталостные расчёты в кратчайшие сроки. Данная подсистема реализована в составе комплексной автоматизированной системы обеспечения надежности и качества аппаратуры АСОНИКА, благодаря чему обеспечивается интегрированность процесса анализа усталостной прочности конструкций ПУ в общий процесс автоматизированного проектирования конструкций РЭС.

Структура автоматизированной подсистемы анализа усталостной прочности (рис. 3.) продиктована уровнем пользователя, ограниченными знаниями разработчика РЭС и необходимостью взаимодействия данной подсистемы со смежными программами.

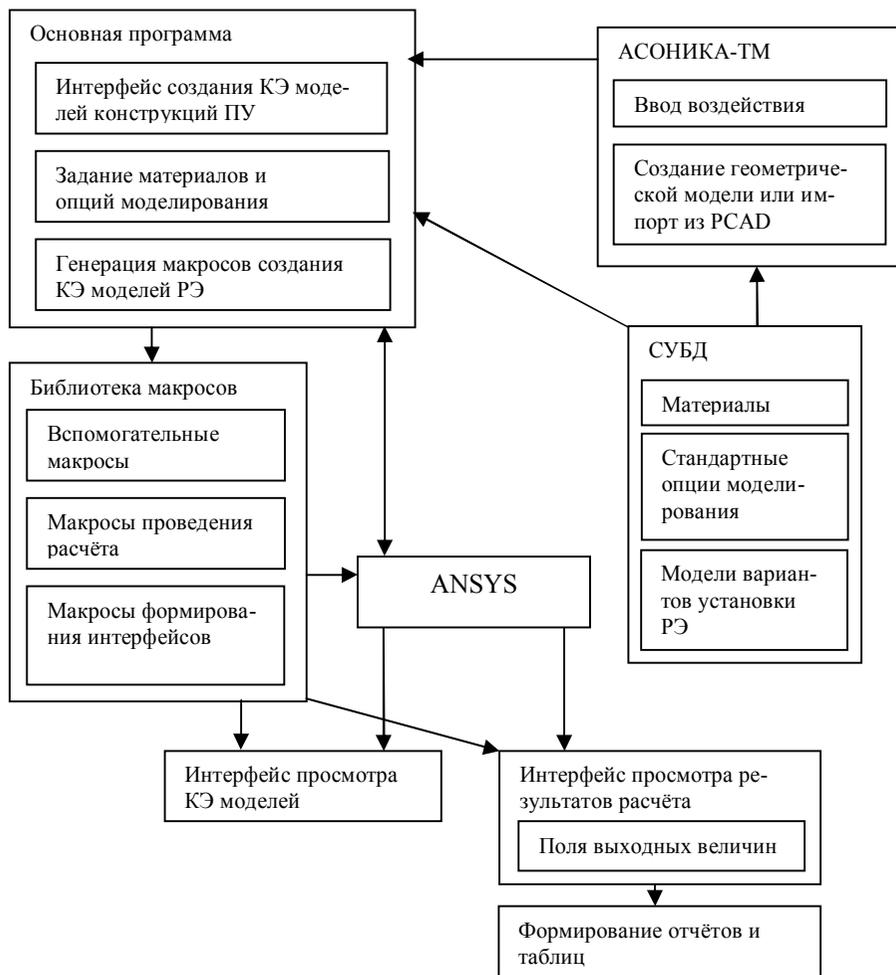


Рис. 3. Структура автоматизированной подсистемы анализа усталостной прочности конструкций печатных узлов

Процесс взаимодействия пользователя с автоматизированной подсистемой следует рассматривать как совокупность этапов преобразования исходной информации о моделируемом объекте. При этом участие разработчика РЭС сводится к минимуму, как при обращении к конечноэлементной САЕ-системе, так и при чтении и формировании входных и выходных

данных для обращения к специализированным программам, участвующим в процессе работы подсистемы.

В качестве САЕ-системы используется программный комплекс ANSYS. Благодаря развитым средствам макропрограммирования данного программного комплекса можно существенно автоматизировать процесс построения и конечноэлементного разбиения различных конструкций РЭ. ANSYS снабжен внутренним языком программирования APDL (ANSYS Parametric Design Language), который позволяет осуществлять взаимодействие с программой в командном режиме без участия пользователя. Кроме того, в ANSYS интегрирован интерпретатор скриптового языка tcl/tk, позволяющий создавать пользовательские интерфейсы непосредственно в ANSYS, а также существенно ускорить работу макросов.

Автоматизированная подсистема имеет в своем составе основную программу, которая обеспечивает связь между сервисной оболочкой подсистемы и программными модулями, входящими в систему. Основная программа дает возможность пользователю осуществить выбор задач, обеспечить программу входной информацией, организовать процесс управления программным обеспечением подсистемы. Интерфейс создания КЭ модели, входящий в основную программу, автоматизирует процесс построения и разбиения на конечные элементы конструкций ПУ любой сложности и опционально позволяет активировать автоматический режим, в котором КЭ модель формируется без участия пользователя. Обычно пользователя интересует время до усталостного разрушения отдельных РЭ, наиболее уязвимых к усталостному разрушению. Поэтому в подсистему реализована возможность выбора радиоэлементов, геометрия которых будет включена в результирующую КЭ модель ПУ. Генератор макросов создания КЭ моделей РЭ анализирует модель печатного узла, созданную в АСОНИКА-ТМ. На основе анализа создаётся набор управляющих макросов, которые передаются системе ANSYS в командном режиме. Эти макросы управляют созданием твердотельных ANSYS-моделей РЭ и их разбиением на конечные элементы. Настройки программы позволяют для сложных моделей РЭ применить средства оптимизации конструкции (например: упрощение сложных объёмов, удаление мелких деталей), а также задать особые параметры генерации сетки КЭ.

Структура автоматизированной подсистемы включает в себя, помимо основной программы, следующие основные блоки: библиотеку макросов, систему управления базами данных (СУБД) и интерфейсы отображения результатов.

Основу БД составляют модели вариантов установки РЭ, на основе которых, используя минимум параметров (размеры посадочного места и корпуса РЭ, сечения корпуса и выводов, параметры материалов выводов, клея или лака), автоматически рассчитываются остальные параметры (координаты установки выводов, длины участков выводов, площадь поверхности, тепловое сопротивление крепления, теплоемкость элемента и т.д.).

В базе данных содержатся стандартные опции генерации КЭ моделей для всех вариантов установки РЭ, что в большинстве случаев избавляет пользователя от необходимости их изменения вручную. Модели материалов, содержащихся в базе, уже содержат усталостные и механические свойства, и от пользователя требуется указать лишь названия материалов перед проведением расчёта.

Библиотека макросов, помимо различных вспомогательных макросов и макросов проведения расчёта на механические воздействия, содержит также пользовательские интерфейсы на языке tcl/tk, использующие для отображения результатов все графические возможности ANSYS. Основная программа контролирует данные интерфейсы лишь косвенно, через посредство библиотеки макросов.

Автоматизированная подсистема позволяет проводить анализ усталостной прочности конструкций ПУ при следующих механических воздействиях:

- 1) гармонической вибрации;
- 2) случайной вибрации;
- 3) многократном ударном воздействии.

Результатом расчёта являются поля следующих величин:

- 1) перемещений;
- 2) напряжений;
- 3) времени до усталостного разрушения.

В третьей главе также представлена реализация алгоритма генерации конечноэлементных моделей конструкций ПУ с учётом геометрии РЭ и рассмотрены особенности реализации алгоритмов расчёта времени до усталостного разрушения при механических воздействиях на базе результатов анализа в программном комплексе ANSYS.

В четвёртой главе разработана методика синтеза и анализа проектных решений по обеспечению защиты конструкций ПУ от усталостного разрушения с применением автоматизированной подсистемы, разработанной в третьей главе. Разработанная методика включена в более общую методику обеспечения надёжности конструкций РЭС при механических воздействиях с применением системы АСОНИКА.

Методика включает следующие этапы:

1. После создания модели ПУ в подсистеме АСОНИКА-ТМ осуществляется экспорт полученной модели в систему конечноэлементного моделирования ANSYS с помощью специального графического интерфейса пользователя.

1.1. Производится ввод механических и усталостных свойств материалов и опций моделирования. Ввод материалов и опций моделирования автоматизирован с помощью соответствующих баз данных.

1.2. Для экспорта в систему ANSYS выбираются РЭ в составе ПУ, представляющие наибольший интерес с точки зрения времени до усталостного разрушения.

1.3а. Пошагово в автоматизированном режиме осуществляется экспорт печатной платы и выбранных РЭ (см. 1.2.) в систему ANSYS и их разбиение на конечные элементы. На каждом шаге (т.е. после экспорта отдельного РЭ) возможен просмотр результата экспорта с помощью специального интерфейса просмотра ANSYS-моделей, а также изменение опций и материалов для отдельных РЭ.

1.3б. Вместо пошагового режима экспорта модели в ANSYS может быть использован автоматический режим. В данном случае просмотр доступен только после полного построения КЭ модели ANSYS.

2. Созданная КЭ модель рассчитывается на нужный вид механического воздействия. Воздействия автоматически импортируются из подсистемы АСОНИКА-ТМ, поэтому для их задания не требуется специальных действий пользователя.

3. Визуализация и анализ результатов. Пользователь просматривает поля и графики выходных механических характеристик (напряжений, перемещений, времени до усталостного разрушения).

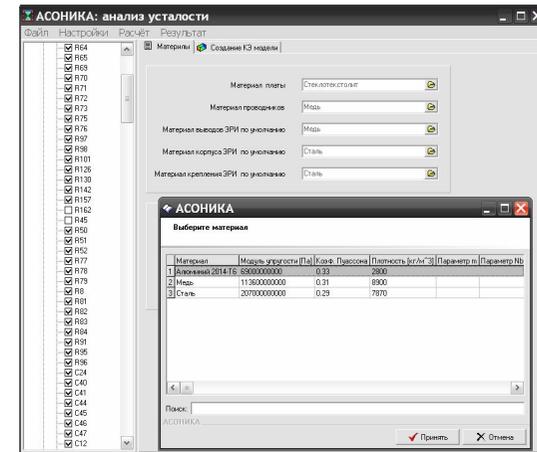
4. В случае превышения расчетными величинами допустимых значений, редактирование конструкции и проведение повторного расчёта до тех пор, пока не будут обеспечены требования к выходным параметрам (например, пока время до усталостного разрушения не станет больше допустимого значения). Можно выделить следующие варианты изменения конструкции:

- изменение толщины печатной платы,
- изменение вариантов установки отдельных РЭ,
- перерасположение отдельных РЭ в пределах печатной платы,
- добавление рёбер жесткости в конструкцию ПУ,
- изменение материалов платы и отдельных РЭ.

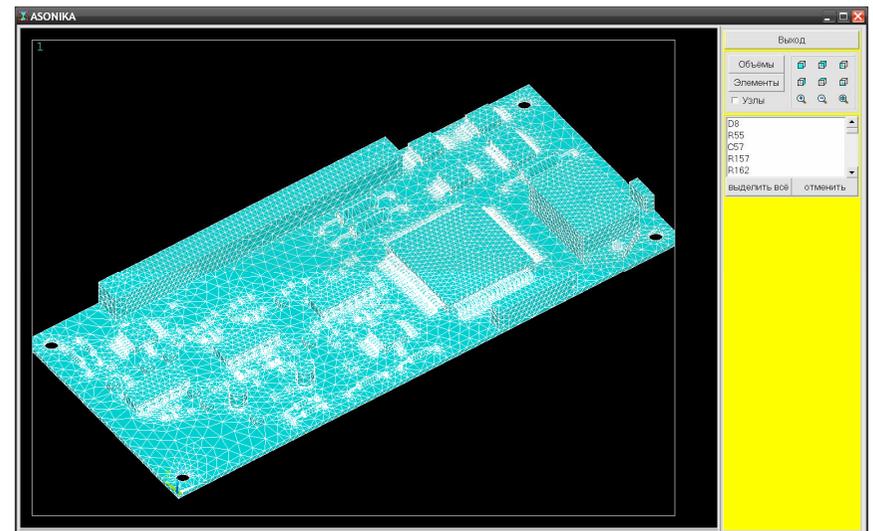
5. Сохранение результатов в табличной или графической форме.

Использование данной методики уменьшает влияние человеческого фактора на адекватность результатов моделирования, что приводит к увеличению надёжности разрабатываемой аппаратуры.

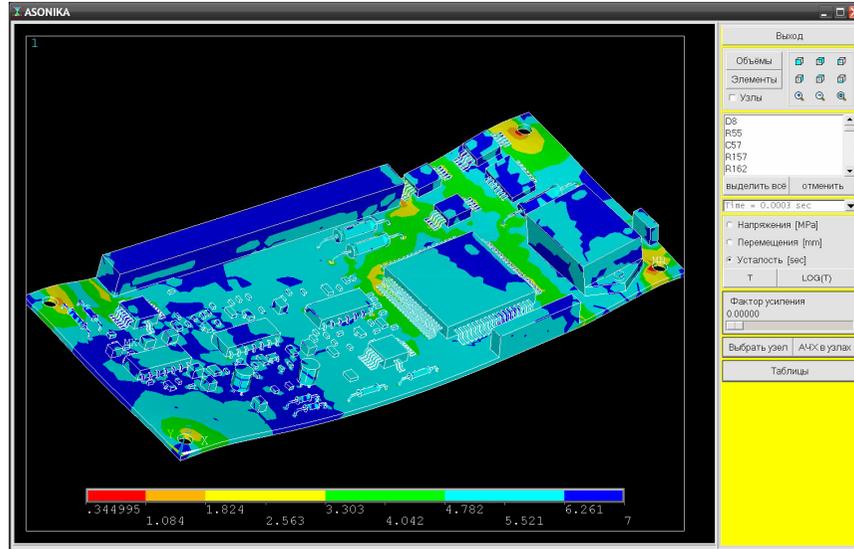
В четвёртой главе также приведён пример использования разработанной методики. На примере продемонстрированы малые временные затраты и относительная легкость процесса моделирования. Экранные формы по заданию исходных данных и выводу результатов представлены на рис. 4.



а) задание исходных данных



б) просмотр результатов конечноэлементного разбиения



в) просмотр результатов расчёта (поле логарифма времени до усталостного разрушения)

Рис. 4. Экранные формы автоматизированной подсистемы

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные научные, теоретические и практические результаты работы состоят в следующем:

1. Исследованы особенности конструкций радиоэлементов, входящих в состав РЭС, с точки зрения моделирования механических процессов и возможности их анализа методом конечных элементов.

2. Разработан метод генерации конечноэлементных моделей печатных узлов и радиоэлементов, отличающийся от известных возможностью получать конечноэлементные модели типовых и нетиповых радиоэлементов (произвольной геометрической конфигурации и варианта установки) в полностью автоматическом режиме на основе твердотельной модели, созданной в подсистеме АСОНИКА-ТМ.

3. Разработаны алгоритмы расчёта времени до усталостного разрушения конструкций печатных узлов и радиоэлементов при воздействии гармонической и случайной вибрации, а также многократного удара, отличающиеся от существующих возможностью непосредственной реализации средствами макропрограммирования ANSYS на основе результатов анализа на механические воздействия.

4. Разработаны интерфейсы визуализации результатов моделирования на основе средств ANSYS (а именно, встроенного интерпретатора tcl/tk), использующие большинство основных графических и постпроцессорных возможностей системы ANSYS.

5. Разработана структура и осуществлена программная реализация автоматизированной подсистемы анализа усталостной прочности конструкций печатных узлов на механические воздействия, отличающейся от существующих систем усталостного анализа интегрированностью в общий процесс автоматизированного проектирования конструкций

РЭС и высокой степенью автоматизации, не требующей от пользователя специальных знаний в области усталостного разрушения.

6. Разработана база данных материалов конструкций ПУ и РЭ, содержащая, помимо прочих механических свойств, также и усталостные свойства, позволяющие использовать обе модели усталости (малоцикловую и многоцикловую) при проведении анализа.

7. Разработана методика анализа и синтеза проектных решений по обеспечению защиты конструкций печатных узлов и радиоэлементов от усталостного разрушения при механических воздействиях, отличающаяся от существующих включённостью в более общую методику обеспечения надёжности конструкций РЭС при механических воздействиях с применением системы АСОНИКА, позволяющая в минимальные сроки и с минимальными усилиями создавать КЭ модели печатных узлов, проводить расчет на механические воздействия, включая анализ усталости, и принимать обоснованное решение об обеспечении стойкости конструкций ПУ к механическим воздействиям.

8. Проведено внедрение созданной методики моделирования механических процессов в конструкциях РЭС в практику проектирования на ряде промышленных предприятиях и в учебный процесс ВУЗа.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Першин Е.О., Шалумов А.С., Соловьёв Д.Б. Задача математического моделирования радиоэлементов в составе печатных узлов для оценки времени до усталостного разрушения выводов радиоэлементов // Успехи современной радиоэлектроники. - 2011. - №1. - С.35-41.

2. Соловьёв Д.Б., Шалумов А.С., Способ Д.А., Першин Е.О. Структурный анализ моделей шкафов радиоэлектронных средств с использованием подсистема АСОНИКА-М и рассмотрение возможности дальнейшей их оптимизации // Успехи современной радиоэлектроники. - 2011. - №1. - С.57-60.

3. Е.О. Першин, Д.Б. Соловьёв, А.С. Шалумов. Разработка средств автоматизации для усталостного анализа конструкций радиоэлектронных средств при механических воздействиях // Научные технологии. – 2011. - № 11. - С.14-24.

4. Д.Б. Соловьёв, А.С. Шалумов, Е.О. Першин. Моделирование механических процессов в шкафах радиоэлектронных средств в подсистеме АСОНИКА-М и идентификация физико-механических параметров модели // Научные технологии. – 2011. - № 11. - С.25-31.

5. Шалумов А.С., Кофанов Ю.Н., Куликов О.В., Травкин Д.Н., Соловьёв Д., Першин О. Динамическое моделирование сложных радиоэлектронных систем // Динамика сложных систем. – 2011. - № 3. - С.51-59.

6. Е.О. Першин, А.С. Шалумов, Д.Б. Соловьёв. Задача математического моделирования радиоэлементов в составе печатных узлов для оценки времени до усталостного разрушения выводов радиоэлементов // «Виртуализация проектирования и испытаний электронной аппаратуры» / Труды ОАО «Научно-исследовательский центр электронной вычислительной техники» / под ред. О.Ю. Мартынова, А.С. Шалумова, Н.В. Малютина, Ю.Н. Кофанова. – М.: Издательство «Радиотехника», 2011. - С.35-41.

7. Д.Б. Соловьёв, А.С. Шалумов, Д.А. Способ, Е.О. Першин. Структурный анализ моделей шкафов радиоэлектронных средств с использованием подсистемы АСОНИКА-М и рассмотрение возможности дальнейшей их оптимизации // «Виртуализация проектирования и испытаний электронной аппаратуры» / Труды ОАО «Научно-исследовательский центр электронной вычислительной техники» / под ред. О.Ю. Мартынова, А.С. Шалумова, Н.В. Малютина, Ю.Н. Кофанова. – М.: Издательство «Радиотехника», 2011. - С.56-60.

8. Першин Е.О., Шалумов А.С. Метод автоматической генерации конечноразмерных моделей электрорадиоизделий с произвольными вариантами установки // Интеллектуальные

системы: Труды Девятого международного симпозиума / Под ред. К.А. Пупкова. - М.: РУСАКИ, 2010. - С. 277-280.

9. Шалумов А.С., Куликов О.Е., Соколов А.Д., Соловьев Д.Б., Першин Е.О. Многокомпонентный программный комплекс АСОНИКА для анализа и обеспечения стойкости аппаратуры к внешним воздействующим факторам и надёжности // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: сборник научных трудов. Седьмой выпуск. - Ульяновск: УлГТУ, 2010. - С.179-191.

10. Першин Е.О., Шалумов А.С. Разработка методики прогнозирования работоспособности приборов с учетом усталостной прочности выводов электрорадиоизделий // «Информационные системы и технологии. ИСТ-2009» / Материалы XV Международной научно-технической конференции. - Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2009. - С.192-193.

11. Першин Е.О., Шалумов А.С. Методика прогнозирования работоспособности приборов с учетом усталостной прочности выводов электрорадиоизделий // «Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в управлении инновационными проектами (Инноватика – 2009)» / Материалы Международной конференции и Российской научной школы. Часть 1. - М.: Энергоатомиздат, 2009. - С.57-59.

12. Першин Е.О., Шалумов А.С. Применение технологии имитационного моделирования в задаче прочностного анализа печатных узлов при механических воздействиях с учётом усталостной прочности электрорадиоизделий // «Повышение качества высшего профессионального образования» / Материалы Всероссийской научно-методической конференции. Часть 3. - Красноярск: ИПК СФУ, 2009. - С.100-101.

13. Першин Е.О., Шалумов А.С. Автоматизация построения конечноэлементных моделей электрорадиоизделий с произвольными вариантами установки на печатных узлах // «Информационные системы и технологии. ИСТ-2010» / Материалы XVI Международной научно-технической конференции. - Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2010. - С.218-119.

14. Першин Е.О., Шалумов А.С. Анализ механических процессов в электрорадиоизделиях с произвольными вариантами установки на печатных платах // «Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в управлении инновационными проектами (Инноватика – 2010)» / Материалы Международной конференции и Российской научной школы. Часть 1. - М.: Энергоатомиздат, 2010. - С.63-65.

15. Першин Е.О., Шалумов А.С. Имитационное моделирование механических процессов в радиоэлектронных устройствах как средство обучения будущих специалистов // «Повышение качества высшего профессионального образования» / Материалы Всероссийской научно-методической конференции. Часть 1. - Красноярск: ИПК СФУ, 2010. - С.100-101.