

На правах рукописи

ТРАВКИН ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА РАННИХ ЭТАПАХ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

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 государственной службы и народного хозяйства при Президенте Российской Федерации

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор
Шалумов А.С.
- Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор
Глазунов В.А.
кандидат технических наук, доцент
Жаднов В.В.
- Ведущее предприятие:** Научно-исследовательский учебный центр новых технологий и материалов "АТОМ" (г. Москва)

Защита состоится «16» февраля 2012 г. в 12.00 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» декабря 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д217.047.01
доктор технических наук



О.О. Варламов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Конкурентоспособность вновь создаваемой радиоэлектронной аппаратуры в определяющей степени зависит от оперативности и качества ее разработки. Особенно остро эти проблемы стоят при проектировании радиоэлектронных средств (РЭС), имеющих сложные алгоритмы функционирования, к которым предъявляются требования повышенной надежности, высоких удельных массогабаритных показателей, высокой помехозащищенности, подвергающиеся воздействию широкого спектра дестабилизирующих факторов. На многих отечественных аппаратостроительных предприятиях разработчики РЭС затрачивают на их проектирование от 5 до 7 лет. При этом, несмотря на столь значительные сроки создания опытных образцов РЭС, освоение их серийного производства в первые годы эксплуатации сопровождается многочисленными доработками, целью которых является устранение различного рода недостатков, дефектов и отказов, обусловленных комплексным воздействием дестабилизирующих факторов.

Механические воздействия вызывают от 30 до 50% отказов РЭС. Подавляющее большинство отказов из-за механических воздействий связано с выходом за пределы, установленные нормативной документацией (НД), механических характеристик конструкций РЭС – ускорений, перемещений, напряжений, что приводит к механическим разрушениям и нарушениям устойчивости работы аппаратуры.

Отказы, связанные с механическими воздействиями, выявляются на завершающих этапах разработки и приводят к длительной доработке конструкции, что в конечном итоге сказывается на сроках и стоимости выполнения проектных работ. Применение математического моделирования механических процессов позволяет сократить количество промежуточных вариантов конструкции РЭС, сроки и затраты на проектирование.

Моделирование механических процессов в РЭС, в общем случае, заключается в следующем:

1) моделирование несущей конструкции с целью получить напряжения в конструкции, а также ускорения в местах крепления печатных узлов (ПУ), т.к. механические воздействия на опоры ПУ передаются именно через несущие конструкции;

2) моделирование ПУ РЭС с целью определить перемещения и напряжения в конструкции ПУ, ускорения на электрорадиоизделиях (ЭРИ), время до усталостного разрушения выводов ЭРИ.

Математическое моделирование механических процессов в РЭС требует взаимного учета целого ряда факторов: геометрической сложности и неоднородности конструкции; наличия в ПУ тысяч ЭРИ, механические характеристики которых необходимо определить; многообразия видов механических воздействий; нелинейности физических характеристик материалов конструкций.

На сегодняшний день объективные трудности в использовании математического моделирования механических процессов, протекающих в РЭС, как основного инструментария для целенаправленного выбора и анализа проектных решений, состоят в его значительной трудоемкости.

Применение существующих универсальных САЕ-систем для моделирования сложных конструкций РЭС на механические воздействия практически невозможно по следующим причинам.

1. Создание модели требуют больших временных затрат, применительно к РЭС – от нескольких часов до нескольких дней и месяцев, ввиду отсутствия специализированных графических интерфейсов для ввода элементов конструкций РЭС.
2. Отсутствие специализированных баз данных по параметрам конструкционных материалов РЭС, модулей идентификации неизвестных физико-механических параметров, увеличивает время построения модели, также ставит под сомнение адекватность построенных моделей.
3. Универсальные САЕ-системы требуют от разработчика РЭС специальных знаний в области математического моделирования механических процессов, каковыми он в подавляющем большинстве случаев не обладает.

4. Обучение работе с такими комплексами, в большинстве случаев, требует значительных затрат времени, даже для специалистов.

Помимо универсальных САЕ-систем, для математического моделирования механических процессов в РЭС, применим ряд специализированных программ: PRAC, автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры АСОНИКА, разработанная в Московском государственном институте электроники и математики (МИЭМ) и в ООО «CALS-технологии», программы по расчету механических характеристик, разработанные в Пензенском государственном техническом университете (ПГТУ), в Уральском государственном техническом университете (УГТУ) и в Запорожском государственном техническом университете (ЗГТУ).

Существующие специализированные программы моделирования механических процессов в РЭС также не достаточно развиты применительно к моделированию РЭС, не позволяют построить всю иерархию конструкций РЭС от шкафа до отдельного ЭРИ для передачи воздействий и результатов моделирования между отдельными уровнями иерархии РЭС, например, от блока к ПУ произвольной формы.

Решением задачи моделирования механических процессов в конструкциях РЭС занимались такие специалисты, как Маквецов Е.Н., Тартаковский А.М., Кофанов Ю.Н., Кожевников А.М., Шалумов А.С. и другие. Но в данных работах детально не рассматривались вопросы повышения эффективности моделирования конструкций РЭС средствами инструментария, сочетающего в себе преимущества универсальных и специализированных программ, обладающего минимальными требованиями по времени и сложности к освоению его теоретической и пользовательской базы.

Подсистема АСОНИКА-ТМ является неотъемлемой частью автоматизированной системы АСОНИКА. Данная подсистема по основным характеристикам (перечню решаемых задач, глубине выполняемого анализа, достоверности получаемых результатов, удобству пользования) существенно превосходит отечественные программные продукты и не уступает известным зарубежным системам аналогичного назначения. Она получила широкое распространение на предприятиях России и стран СНГ, используется как разработчиками сложных и ответственных РЭС народнохозяйственного и оборонного назначения, так и при проведении экспертных исследований, выполняемых заказчиками РЭС на ранних стадиях выполнения опытно-конструкторских работ по их разработке. Однако расчет ПУ сложной формы невозможен в подсистеме АСОНИКА-ТМ, что связано с особенностями математического аппарата, реализованного в этой подсистеме. Таким образом, существует необходимость в разработке подсистемы, позволяющей проводить анализ на механические воздействия для ПУ сложной формы.

Разрабатываемая подсистема моделирования механических процессов в конструкциях РЭС должна быть интегрирована с системой АСОНИКА, должен быть реализован двухсторонний обмен данными об элементах конструкции, характеристиках материалов, результатах проведенных расчетов. Тем самым будет обеспечено единство расчета элементов конструкции РЭС со всеми уровнями иерархии, что позволит повысить надежность проектируемых радиоэлектронных средств.

Таким образом, на сегодняшний день не достаточно развиты средства, позволяющие разработчику РЭС в соответствии с современным уровнем развития математического моделирования осуществлять эффективный анализ механических процессов в ПУ сложной формы на ранних этапах проектирования на уровне «проектировщик – система».

Целью работы является повышение эффективности процесса проектирования конструкций РЭС, отвечающих требованиям НД по механическим характеристикам, повышение показателей надежности разрабатываемых РЭС, сокращение сроков и стоимости их создания за счет применения средств математического моделирования для синтеза и анализа проектных решений, а также интеграции с автоматизированной системой научных исследований АСОНИКА.

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

1. Исследование особенностей конструкций ПУ РЭС с точки зрения моделирования механических процессов.
2. Разработка информационных моделей типовых элементов конструкций ПУ.

3. Разработка структуры автоматизированной подсистемы для моделирования механических процессов в ПУ сложной формы.

4. Практическая реализация моделей и алгоритмов в виде автоматизированной подсистемы моделирования механических процессов в ПУ сложной формы и её интеграция с подсистемой АСОНИКА-ТМ.

5. Разработка методики моделирования механических процессов в ПУ сложной формы.

6. Экспериментальная проверка адекватности разработанных моделей.

7. Внедрение разработанной методики моделирования механических процессов в ПУ сложной формы в практику проектирования на промышленных предприятиях и в учебный процесс вузов.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в разработке:

– алгоритмов автоматизированного создания математических моделей механических процессов в ПУ РЭС сложной формы, позволяющих в короткие сроки проводить анализ разработанных конструкций ПУ на механические воздействия в соответствии с требованиями НД по механическим характеристикам;

– алгоритмов учёта демпфирующих свойств конструкционных материалов ПУ РЭС, позволяющих повысить точность разрабатываемых математических моделей и, как следствие, адекватность результатов моделирования;

– структуры автоматизированной подсистемы моделирования механических процессов в ПУ РЭС сложной формы, обеспечивающей удобный проектировщику РЭС язык взаимодействия на базе графических интерфейсов ввода-вывода и позволяющей конструктору выполнять сложные математические расчеты без использования специальных знаний в области конечно-элементного анализа;

– методики моделирования механических процессов в ПУ РЭС на ранних этапах проектирования, позволяющей в минимальные сроки и с минимальными затратами осуществлять автоматизированное построение математических моделей ПУ сложной формы, проводить расчет на различные механические воздействия и принимать решение об обеспечении стойкости ПУ к механическим воздействиям.

Практическая значимость работы состоит в том, что использование созданных методических и программных средств позволяет повысить эффективность моделирования РЭС, обеспечить более высокие показатели надежности разрабатываемой аппаратуры, сократить сроки и стоимость проектных работ РЭС с соблюдением требований НД по механическим характеристикам. Для освоения разработанного программного и методического обеспечения для пользователей, не знакомых с автоматизированной системой АСОНИКА, требуется не более 8 рабочих дней, в то время как освоение универсальных САЕ-систем требует несколько месяцев и более. Достоинством разработанных методик следует отметить то, что, прежде всего, они позволяют значительно уменьшить количество ошибок, вызванных человеческим фактором при моделировании, за счет специализированных графических интерфейсов ввода исходных данных и вывода результатов моделирования.

Методы исследования основываются на теории системного анализа, прикладной механики, методах прикладной математики и компьютерной графики.

Реализация и внедрение результатов работы.

Основные результаты диссертационной работы (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 работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на X, XI Международных конференциях «Системные проблемы надёжности, качества, информационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика)» (Москва, 2005г., 2006г.), V, VI, VII всероссийских научно-практических конференциях «Современные информационные технологии в науке, образовании и практике» (Оренбург, 2006г., 2007г., 2008г.), Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии»

(Нижний Новгород, 2008г.), Международных конференциях «Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в управлении инновационными проектами. Инноватика – 2008, Инноватика – 2009, Инноватика – 2010» (г. Сочи, 2008 г., 2009 г., 2010 г.), Всероссийской научно-методической конференции «Повышение качества высшего профессионального образования» (г. Красноярск, 2010 г.), девятом Международном симпозиуме «Интеллектуальные системы. INTELS-2010» (Владимир, 2010г.).

Публикации. По материалам диссертационных исследований опубликовано 23 научных работы, в том числе 6 статей в журналах из перечня ВАК.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен анализ проблемы проектирования конструкций РЭС с учётом механических воздействий; анализ современных методов и подходов, существующих автоматизированных систем, используемых для моделирования механических процессов в конструкциях РЭС; рассмотрен спектр механических воздействий, которым подвергаются РЭС в процессе эксплуатации; показано влияние механических характеристик на показатели надежности разрабатываемых РЭС.

Актуальность моделирования на механические воздействия возрастает с каждым днем, так как, с одной стороны, повышается интенсивность механических воздействий, а с другой стороны, сокращается время, отводимое разработчику на проектирование.

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 в полном объеме не проводится. Исследование данной схемы выявило ее недостатки и показало отсутствие в настоящий момент:

- методики визуализации исходных данных и результатов моделирования РЭС при механических воздействиях, позволяющей минимизировать влияние человеческого фактора на адекватность результатов моделирования и позволяющей в минимальные сроки вводить конструкцию РЭС в программу моделирования и анализировать результаты посредством доступных разработчику графических интерфейсов ввода-вывода, а также самих графических интерфейсов;

- методики автоматизированного создания математических моделей механических процессов в конструкциях РЭС, понятной разработчику РЭС и требующей минимальное время на освоение.

Проведен анализ программного обеспечения, применяемого для моделирования механических процессов в РЭС. Рассмотрен перечень применяемых специализированных программ: PRAC, автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры АСОНИКА, разработанная в Московском государственном институте электроники и математики и в ООО «CALS-технологии», программы по расчету механических характеристик, разработанные в Пензенском государственном техническом университете, в Уральском государственном техническом университете и в Запорожском государственном техническом университете. Существующие специализированные программы не позволяют моделировать конструкции РЭС на все виды механических воздействий и получать все необходимые характеристики для принятия проектного решения, слабо или вообще не развиты по отношению к моделированию несущих конструкций РЭС, не позволяют построить всю иерархию конструкций РЭС от шкафа до отдельного ЭРИ для передачи воздействий и результатов моделирования между отдельными уровнями иерархии РЭС, например, от блока к ПУ. В подсистеме АСОНИКА-ТМ расчет ПУ сложной формы недоступен, что связано с особенностями математического аппарата, реализованного в этой подсистеме.

Рассмотрено также применение универсальных конечно-элементных CAE-систем для моделирования несущих конструкций РЭС: NASTRAN, COSMOS-M, MARC, ANSYS. Отмечены достоинства универсальных программ, заключающиеся в возможности построения сложных и более адекватных моделей, наличием необходимых для полноценного и эффективного анализа

типовых процедур моделирования: оптимизация, допусковый анализ и анализ чувствительности, большого количества типов конечных элементов. Однако применение универсальных САЕ-систем для моделирования несущих конструкций РЭС усложняется рядом факторов:

- отсутствием специализированных графических интерфейсов для ввода конструкций РЭС;
- отсутствием специализированных баз данных по параметрам материалов конструкций РЭС, модулей идентификации неизвестных физико-механических параметров модели;
- отсутствием интеграции со специализированными программами моделирования тепловых и механических процессов в ПУ и программами расчета систем виброизоляции, необходимой для автоматизированной передачи исходных данных и результатов моделирования между различными конструктивными уровнями иерархии РЭС.

Кроме того, применение универсальных САЕ-систем повышает влияние человеческого фактора на адекватность результатов моделирования, требует серьезных теоретических знаний и опыта использования данных систем, а на их освоение требуются месяцы, а то и годы.

Исследования процесса проектирования РЭС с применением компьютерного моделирования механических процессов и существующих универсальных и специализированных программ моделирования, проведенные в диссертации, показали недостаточность на сегодняшний день необходимого программного и методического обеспечения, позволяющего конструктору РЭС в сжатые сроки проводить моделирование и принимать решение об обеспечении стойкости РЭС к механическим воздействиям и о повышении показателей надежности разрабатываемой аппаратуры.



Рис.1. Предлагаемая схема моделирования

Выход из создавшегося положения лежит в необходимости разработки нового математического ядра, основанного на методике автоматизированного создания математических моделей механических процессов радиоэлектронных средств, и реализации математического аппарата, интегрированного с подсистемой АСОНИКА-ТМ. Данное решение позволяет

значительно расширить возможности моделирования механических процессов в ПУ, тем самым повысить эффективность процесса проектирования радиоэлектронных средств. Методика применения программы должна основываться на технологии хранения и управления данными о РЭС (*PDM-технология*). В диссертации приведена структура такой PDM-системы.

На основе проведенного анализа предложена схема моделирования, приведенная на рис. 1, согласно которой конструктор РЭС взаимодействует с расчётным ядром через препроцессоры и постпроцессоры, представляющие собой графические интерфейсы ввода-вывода, алгоритмы синтеза моделей типовых и нетиповых конструкций РЭС и моделей механических процессов, адаптирующие данную систему применительно к моделированию механических процессов в конструкциях РЭС. В данной схеме отсутствует аналитик-расчетчик, а также посредничество между конструктором и САЕ-системой, что приводит к сокращению итераций отработки конструкции и, как результат, к сокращению сроков и затрат на проектирование, уменьшению влияния человеческого фактора на адекватность результатов моделирования.

В качестве расчетного ядра предлагается разработанная автоматизированная подсистема для моделирования механических процессов в конструкциях РЭС. Возможность работать с математическим ядром реализована посредством встроенного интерпретатора макрокоманд.

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

Во второй главе проведено исследование наиболее распространенных типовых элементов конструкций РЭС и разработаны их информационные модели для проведения математического моделирования при механических воздействиях и визуализации исходных данных, результатов.

Получены матрицы жесткости, масс и демпфирования для балочного и оболочечного элементов, являющимися основными элементами при моделировании конструкций РЭС.

На основе анализа конструкций РЭС сделаны допущения на модели типовых элементов, выявлен требуемый уровень детализации моделей, необходимый для получения приемлемого для ранних этапов проектирования результата.

Рассмотрены задачи динамики конструкций РЭС. Из множества возможных формулировок задач динамики механических систем для исследования динамического деформирования, используя метод конечных элементов, наиболее удобным является использование принципа возможных перемещений в сочетании с принципом Даламбера.

Итоговая система уравнений движения конструкции выглядит следующим образом:

$$[M]\{\ddot{r}\} + [C]\{\dot{r}\} + [K]\{r\} = \{F\},$$

где $\{r\}$ - вектор узловых перемещений;

$[M]$, $[C]$, $[K]$ - матрицы масс, вязкого демпфирования и жесткости соответственно;

$\{F\}$ - вектор внешних воздействий.

Проведены исследования свободных колебаний. Собственными, или свободными, колебаниями называется движение при отсутствии внешних сил и сил демпфирования. Система уравнений, которые описывают такое движение, сводится к следующей алгебраической задаче:

$$[K]\{r\} - \omega^2[M]\{r\} = 0.$$

Такая задача в линейной алгебре называется обобщенной задачей на собственные значения, и её целью является нахождение ряда значений ω_i , и векторов $\{r_i\}$, удовлетворяющих уравнению. Число таких значений ω_i равно порядку системы уравнений, их последовательность в порядке возрастания называется спектром собственных значений, и соответствующие векторы $\{r_i\}$ называются собственными векторами.

Для решения обобщенной задачи на собственные значения в общем случае существует довольно большое количество методов. Однако их прямое применение не оправдано в задачах рассматриваемого класса (исследование свободных колебаний конструкций РЭС). Это объясняется тем, что, сложная задача определения всего спектра собственных частот является излишней, и вполне достаточно ограничиться определением лишь части спектра, которая соответствует минимальным значениям ω . Для решения этой частичной проблемы собственных значений в диссертационной работе рассматривается модифицированный метод Ланцоша со спектральной трансформацией.

При анализе на гармоническую вибрацию наибольшие амплитуды перемещений возникают на частотах, близких к собственным частотам конструкции. Поэтому наиболее рациональным при выполнении анализа на гармоническую вибрацию является использование переменного шага при выборе частот, на которых выполняется расчет. Плотность посева частот должна быть наибольшей в окрестностях собственных частот конструкции и зависеть также от заданных параметров демпфирования, т.к. резонансные пики тем острее, чем меньше демпфирована система.

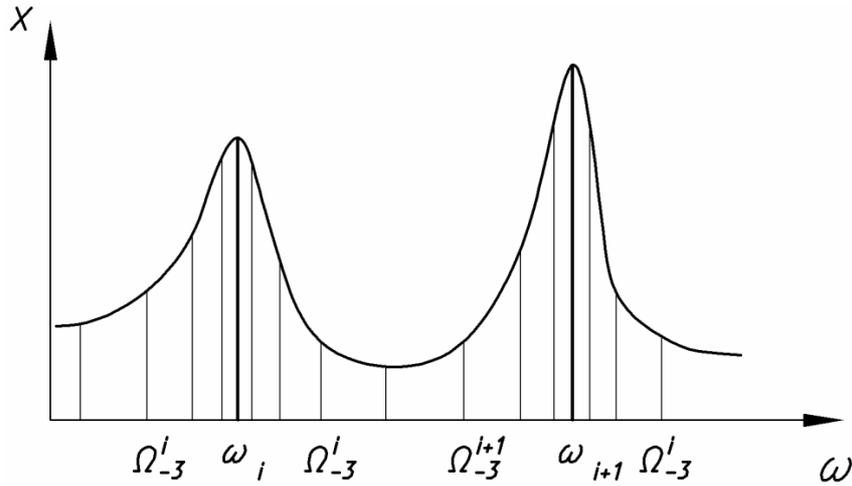


Рис. 2 Переменный шаг частот при гармоническом анализе

На рисунке 2 представлен пример зависимости амплитуд перемещений от частоты при анализе на гармоническую вибрацию и выбор частот в соответствии с резонансами. Частоты, на которых выполняется расчет, определяются по формулам:

$$\Omega_{-j}^i = \omega_i / a_{ij},$$

$$\Omega_{+j}^i = \omega_i a_{ij},$$

где Ω_{-j}^i - частоты меньшие, чем собственная частота ω_i ;

Ω_{+j}^i - частоты большие, чем собственная частота ω_i ;

a_{ij} - коэффициент, определяющий плотность расположения частот Ω , определяющийся по формуле:

$$a_{ij} = 1 + \xi^b,$$

$$b = \frac{2(N - j)}{N - 1},$$

где ξ - заданный коэффициент демпфирования;

N - целочисленная константа, определяющее количество частот Ω ;

$j = 1, 2, 3, \dots, 2N$.

Описанный подход позволяет уменьшить время расчета при анализе на гармоническую вибрацию за счет меньшего количества частот, на которых производится расчет, без потери точности.

Для анализа конструкций РЭС при воздействии случайной вибрации используется следующее соотношение между выходной спектральной плотностью и спектральной плотностью воздействия:

$$S_d = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \varphi_j \varphi_k \left[\sum_{l=1}^q \sum_{m=1}^q \frac{\varphi_{lj} \varphi_{mk}}{M_j M_k} \times H_j^*(\omega) H_k(\omega) S_{P_l P_m}(\omega) + \right.$$

$$\left. + \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r \Gamma_{lj} \Gamma_{mk} \times H_j^*(\omega) H_k(\omega) S_{\ddot{u}_{l\ddot{u}_m}}(\omega) \right],$$

где S_d - динамическая компонента выходной спектральной плотности ускорений;

n - число используемых собственных частот конструкции;

- q - число степеней свободы, соответствующих незакрепленным узлам, где приложено воздействие;
- r - число степеней свободы, соответствующих закрепленным узлам, где приложено воздействие в виде ускорения;
- φ_j - форма колебаний конструкции на j -й собственной частоте;
- φ_{ij} - ij -й элемент матрицы форм колебаний конструкции на собственных частотах;
- $S_{P_i P_m}$ и $S_{\ddot{u}_i \ddot{u}_m}$ - спектральная плотность воздействия приложенного к свободным узлам конструкции и спектральная плотность ускорений, приложенная к закрепленным узлам;
- ω - круговая частота воздействия;

$$H_j(\omega) = \frac{1}{\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\omega_j \xi_j \omega} - \text{комплексная модальная передаточная функция на } j\text{-й}$$

собственной частоте, связывающая входное воздействие в форме ускорений и реакцию системы в форме перемещений.

Среднеквадратическое ускорение незакрепленных узлов элементов конструкции определяется выражением:

$$\sigma_{f_i}^2 = \int_0^{\infty} S_{d_i}(\omega) d\omega.$$

При анализе на случайную вибрацию конструкций воздействие обычно задается в виде спектральной плотности ускорений, которая является линейной (логарифмической) функцией скорости. При таком задании входного воздействия возможно представить подынтегральное выражение $S(\omega)$ в виде рациональной дроби $p(\omega)/q(\omega)$, где $p(\omega)$ - полином с действительными членами, а $q(\omega)$ - с комплексными. Полином $q(\omega)$, имеющий N комплексных корней Ω_R можно разложить на сумму простых дробей:

$$\frac{1}{q(\omega)} = \sum_{R=1}^N \frac{a_R}{(\omega - \Omega_R)}, \quad \text{где } a_R = \frac{1}{\prod_{J=1, J \neq R}^N (\Omega_R - \Omega_J)}.$$

Таким образом, становится возможным аналитическое вычисление интегралов при определении среднеквадратической реакции системы.

Рассмотрен вопрос учета демпфирующих свойств материала, т.к. данные свойства в существенной степени влияют на динамическую напряженность и виброактивность элементов конструкций РЭС, ограничивая амплитуды их колебаний. Основы несовершенной упругости материала при колебаниях механических систем заложены в работах Н.Н. Давиденкова, Е.С. Сорокина и Г.С. Писаренко. Однако в настоящее время не представляется возможным назвать отечественные или зарубежные методики, которые могли бы полностью решить проблему полного учёта демпфирования.

Для учета демпфирующих свойств материала при динамическом нагружении в диссертационной работе предлагается использовать формулу Е.С. Сорокина, представляющую эллиптическую петлю гистерезиса (рисунки 3):

$$\sigma = E \left(\varepsilon \pm \delta(\varepsilon_0) \pi^{-1} \varepsilon_0 \sqrt{1 - \varepsilon^2 / \varepsilon_0^2} \right),$$

где σ , – нормальное напряжение;

ε - относительная деформация

ε_0 – амплитудное значение относительной деформации ε ;

E – модуль упругости материала;

δ - логарифмический декремент затухания колебаний.

Следует отметить, что указанная формула справедлива лишь в случае установившихся (стационарных) колебаний. При исследовании знакопеременных переходных процессов данную формулу можно рассматривать как приближенную, заменяя в ней амплитуду деформации

ε_0 значением $|\varepsilon_m|$ на каждом полупериоде колебаний, где ε_m - относительная деформация в точках реверса кривых деформирования материала.

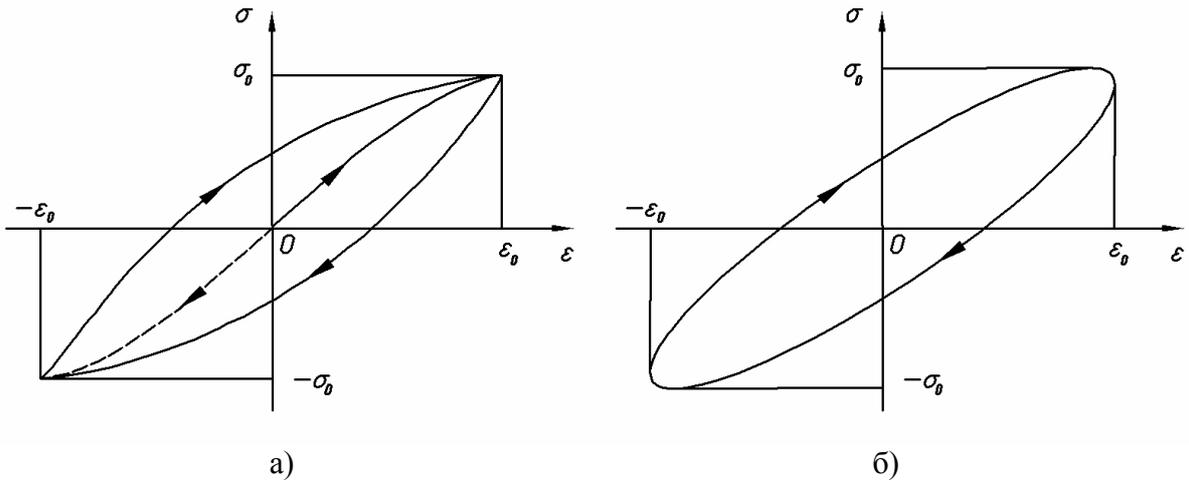


Рис. 3 Вид петли гистерезиса а) получаемой экспериментально; б) в соответствии с теорией Е.С. Сорокина

Реакция конечно-элементной модели конструкции с учетом амплитудно-зависимого рассеяния энергии в материале определяется дифференциальным уравнением движения

$$[M]\{\ddot{x}\} + [\bar{K}(t)]\{x\} = \{F(t)\},$$

где $[M]$ – матрица масс;

$[\bar{K}(t)]$ – нелинейная матрица жесткости;

$\{x\}$ – вектор перемещений;

$\{F(t)\}$ – вектор внешних сил.

Нелинейная матрица жесткости конструкции получается путем объединения нелинейных матриц жесткости всех конечных элементов. Нелинейная матрица жесткости элемента определяется в общем случае по следующей формуле:

$$[\bar{K}]_e = \int_V [B]^T [\bar{D}] [B] dV,$$

где $[B]$ – матрица, связывающая внутри элемента перемещения и деформации;

$[\bar{D}]$ – нелинейная матрица упругости элемента, связывающая напряжения и деформации.

Уравнение движения конструкции, записанное в этой форме, решается одним из шаговых методов численного интегрирования и может использоваться без каких либо ограничений для исследования всевозможных динамических процессов.

При циклическом деформировании материала более выгодно применять частную формулировку, основанную на гипотезе Е.С. Сорокина о комплексном внутреннем трении:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} + i [K_g]\{x\} = e^{i\omega t} \{F_0\},$$

где $[K]$ – матрица жесткости конструкции;

$[K_g] = [\bar{K}] - [K]$ – матрица гистерезисного демпфирования;

ω – частота внешнего гармонического воздействия;

$\{F_0\}$ – вектор, содержащий амплитуду внешнего воздействия.

Следует отметить, что элементы матрицы $[K_g]$ в уравнении содержат логарифмический декремент материала δ , зависящий от соответствующих амплитуд деформаций конечных элементов, а последние при формировании уравнения неизвестны. Поэтому для решения данного уравнения необходимо использовать итерационные методы.

Таким образом, в результате получены уравнения динамического поведения конструкции с учётом несовершенной упругости материала, соответствующие гипотезе внутреннего трения, заключающейся в амплитудной зависимости демпфирования.

В третьей главе, согласно предложенным математическим моделям типовых элементов РЭС, разработана автоматизированная подсистема для моделирования механических процессов в конструкциях РЭС.

Рассмотрены вопросы решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с разреженными матрицами, вопросы хранения разреженных матриц в памяти ЭВМ. Рассмотрены разработанные алгоритмы сборки глобальной матрицы жесткости и переупорядочивания элементов в этой матрице для более эффективного разложения матриц.

Для оценки работоспособности всей конструкции РЭС, разработчику необходимо знать такие параметры, как перегрузку по ускорениям, прочность выводов и т.п., так как выход из строя даже одного ЭРИ может привести к отказу всего изделия. Одним из способов снижения размерности решаемой задачи при моделировании механических воздействий в конструкциях радиоэлектронных средств с учетом трехмерности представления ЭРИ, является использование суперэлементов для моделей ЭРИ. Под этим подразумевается разбиение конструкции на ряд неперекрывающихся подконструкций. При этом в начале располагаются внутренние для каждой подсистемы уравнения, а затем – интерфейсные (т.е. уравнения, относящиеся к узлам, принадлежащим стыкам подконструкций). Метод суперэлементов особенно эффективен при моделировании конструкций ПУ, т.к. в них имеется множество одинаковых частей. Матрицы жесткости и масс одинаковых ЭРИ равны, их можно заранее вычислить, т.е. алгоритмы по их нахождению применяются только один раз. Поэтому применение суперэлементов при моделировании механических процессов в радиоэлектронных средствах является очень эффективным средством снижения вычислительных затрат.

Разработана структура автоматизированной подсистемы для моделирования механических процессов в конструкциях РЭС. При её разработке был выбран подход, основанный на применении интегрированного программного обеспечения. В основу подсистемы легли описанные в диссертационной работе алгоритмы и математические модели типовых элементов РЭС. Разработанная подсистема является частью проблемно-ориентированной подсистемы АСОНИКА-ТМ, и также может быть интегрирована с другими подсистемами АСОНИКИ в качестве механического процессора.

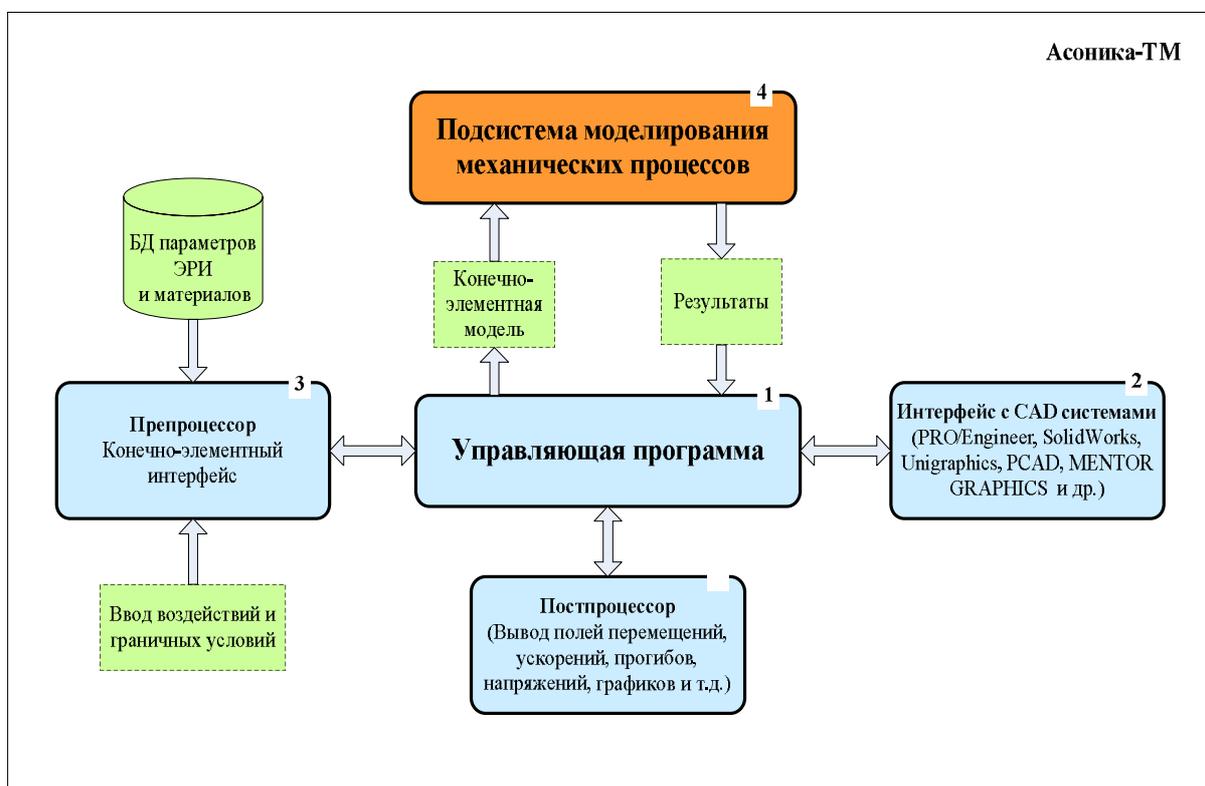


Рис.4 Место разработанной подсистемы моделирования механических процессов в структуре подсистемы АСОНИКА-ТМ

Основу подсистемы составляют следующие модули: управляющая программа (1), интерфейс с САД системами (2), препроцессор (3), подсистема моделирования механических процессов (4) и постпроцессор (5).

Управляющая программа осуществляет автоматизированную передачу данных между препроцессором, подсистемой моделирования механических процессов и постпроцессором подсистемы. Управляющая программа осуществляет взаимодействие с PDM-системой хранения и управления данными о РЭС. Управляющая программа имеет интерфейс связи с различными САД системами и системами топологического проектирования печатных плат PCAD, MENTOR GRAPHICS, из которых может быть передан перечень ЭРИ, координаты размещения ЭРИ на плате, а также геометрия самой платы, что значительно сокращает время на ввод модели печатного узла.

В препроцессоре при помощи графических интерфейсов автоматизированного синтеза макромодели печатного узла, графического интерфейса ввода механических воздействий и базы данных параметров ЭРИ и материалов формируется информационная модель печатного узла с точки зрения визуализации исходных данных.

Автоматизированная подсистема моделирования механических процессов выполняет роль механического процессора в подсистеме АСОНИКА-ТМ.

В постпроцессоре результаты моделирования отображаются в доступном пользователю виде. На основе полученных результатов разработчиком может быть принято проектное решение об обеспечении стойкости несущих конструкций РЭС к механическим воздействиям.

В случае превышения расчетных напряжений элементов конструкции или расчетных ускорений на ЭРИ над допустимыми возможна корректировка конструкции.

На рисунке 4 представлена структура разработанной автоматизированной подсистемы для моделирования механических процессов в конструкциях РЭС.

Взаимодействие между подсистемой для моделирования механических процессов в конструкциях РЭС и АСОНИКОЙ-ТМ организовано через формирования файла макрокоманд. Файл макрокоманд формируется на основе выходных данных, которые подготавливаются на основе следующей информации:

- техническое задание на разработку изделия;
- эскизы или сборочные чертежи конструкции;
- спецификация;
- перечень элементов;
- параметры механических воздействий.

Файл макрокоманд обрабатывается внутренним интерпретатором. По полученным входным данным вычисляются сначала локальные матрицы жесткости, масс и демпфирования для каждого элемента и сборка глобальным матриц, по алгоритмам описанным во второй главе. В зависимости от типа заданного механического воздействия проводятся либо анализ на произвольное динамическое воздействие, либо анализ на случайную вибрацию. Анализ на произвольное динамическое воздействие выполняется с учетом заданной зависимости демпфирующих свойств материала от механических напряжений, поэтому данный тип анализа выполняется итерационно.

На основе параметров механических воздействий и выходной информации в постпроцессорах подсистемы АСОНИКА-ТМ автоматически рассчитываются остальные механические характеристики, необходимые для принятия проектного решения об обеспечении стойкости РЭС к механическим воздействиям и о повышении показателей надежности разрабатываемой аппаратуры.

Проектное решение принимается на основе сравнения расчетных характеристик с допустимыми по ТУ:

- максимальные допустимые напряжения на изгиб материалов конструкции;
- максимальные допустимые ускорения гармонической вибрации, одиночного и многократного ударов, линейного ускорения.

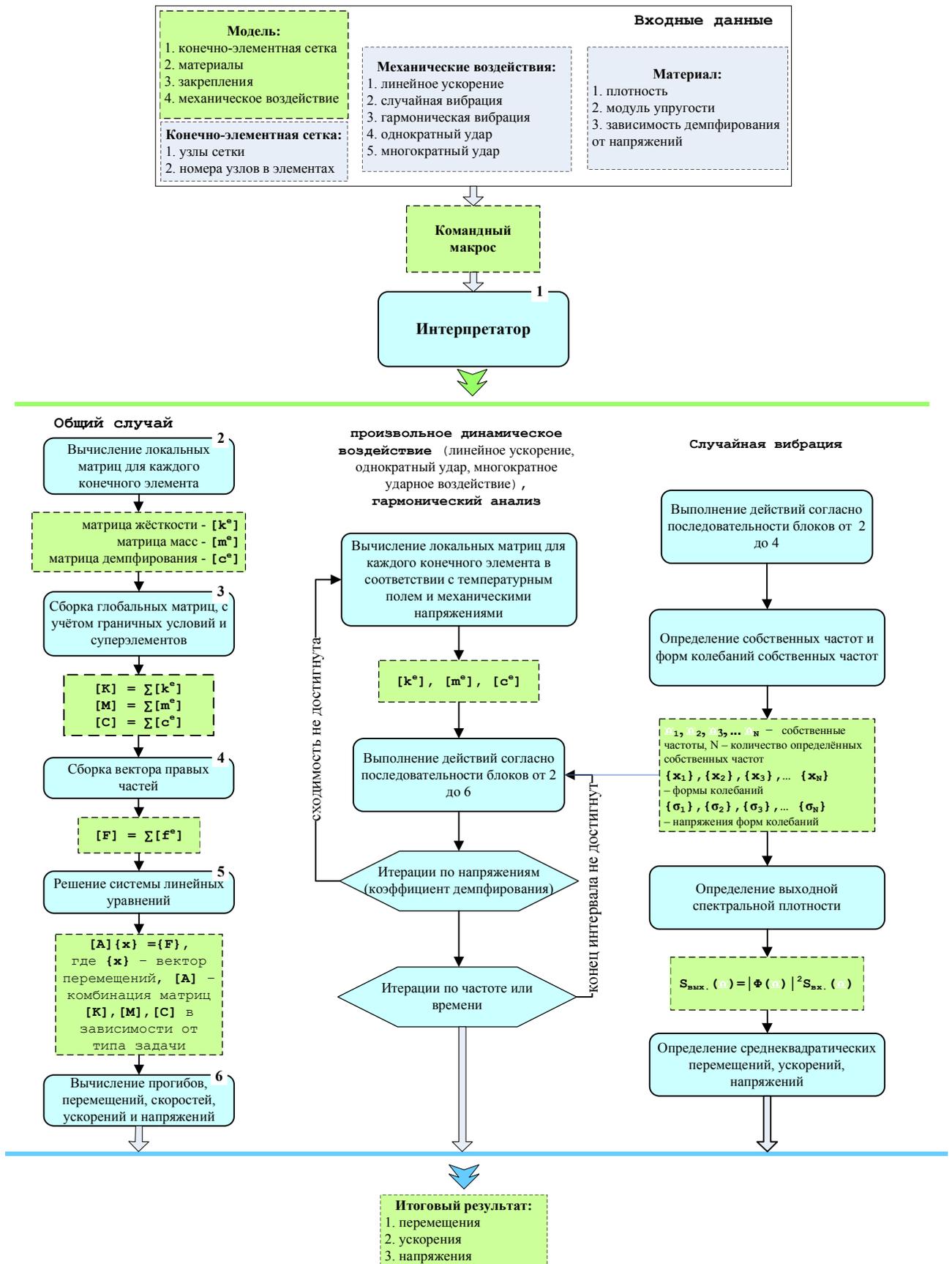


Рис.5 Структурная схема автоматизированной подсистемы для моделирования механических процессов в конструкциях РЭС

В четвёртой главе разработана методика моделирования механических процессов в ПУ сложной формы на ранних этапах проектирования, позволяющая в минимальные сроки и с минимальными затратами осуществлять автоматизированный синтез конечно-элементных моделей ПУ, проводить расчет на различные механические воздействия и принимать решение об обеспечении стойкости ПУ к механическим воздействиям. Разработанная методика моделирования механических процессов в ПУ на основе средств компьютерного моделирования, отличается от существующих наличием доступного разработчику языка взаимодействия на базе графических интерфейсов автоматизированного синтеза моделей типовых и нетиповых конструкций ПУ и универсального графического интерфейса вывода результатов моделирования, позволяет в минимальные сроки и с минимальными затратами принимать решение об обеспечении стойкости ПУ к механическим воздействиям.

Методика предоставляет меньшую трудоемкость операций ввода и редактирования конструкций ПУ и анализа результатов моделирования. Сокращение времени при этом, по сравнению с использованием универсальной CAE-системы, составляет до 95% на ввод конструкции и до 80% на анализ результатов в зависимости от опыта пользователя.

Разработанная методика уменьшает влияние человеческого фактора на адекватность моделирования, что приводит к повышению показателей надежности разрабатываемой аппаратуры.

Ниже представлены основные положения разработанной методики:

1. Согласно требованиям ТЗ формируется первоначальная информация о проекте: основные конструктивные решения, применяемый материал, эскиз конструкции, тип и параметры механического воздействия, используемые типовые элементы конструкции ПУ.

2. Синтез геометрии конструкции, задание параметров материалов элементов конструкции с допустимыми значениями напряжений, параметров сетки разбиения конструкции на конечные элементы, задание параметров закрепления конструкции на объекте при помощи специализированных графических интерфейсов ввода.

3. Задание механических воздействий по осям координат.

4. Выбор вида механического воздействия и проведение расчета.

5. Анализ полученных результатов с применением универсального графического интерфейса вывода и их сохранение в PDM-системе.

6. Принятие решение об обеспечении стойкости конструкции и ЭРИ к механическим воздействиям.

7. В случае превышения расчетных напряжений над допустимыми редактирование геометрии конструкции, изменение параметров материалов или конструкции.

8. В случае корректировки конструкции повторение расчета и анализ результатов моделирования. Корректировка конструкции продолжается до тех пор, пока не будут обеспечены требования к стойкости конструкции ПУ к внешним механическим воздействиям.

9. Формирование отчета и его сохранение в PDM-системе хранения и управления данными о РЭС.

10. Формирование карт режимов механических режимов работы ЭРИ и их сохранение в PDM-системе.

11. Формирование отчета и его сохранение в PDM-системе.

Рассмотрен пример применения методики моделирования механических процессов в ПУ. Определены механические характеристики ПУ сложной формы, созданного в системе MENTOR GRAPHICS. На данном примере продемонстрированы малые временные затраты и относительная легкость операции создания новой модели за счет автоматизации большинства трудоемких операций, таких как экспорт модели из системы MENTOR GRAPHICS, задание параметров ЭРИ, создание конечно-элементной сетки. Такая методика обеспечивает пользователя оперативными возможностями по исследованию и анализу новых моделей конструкций ПУ.

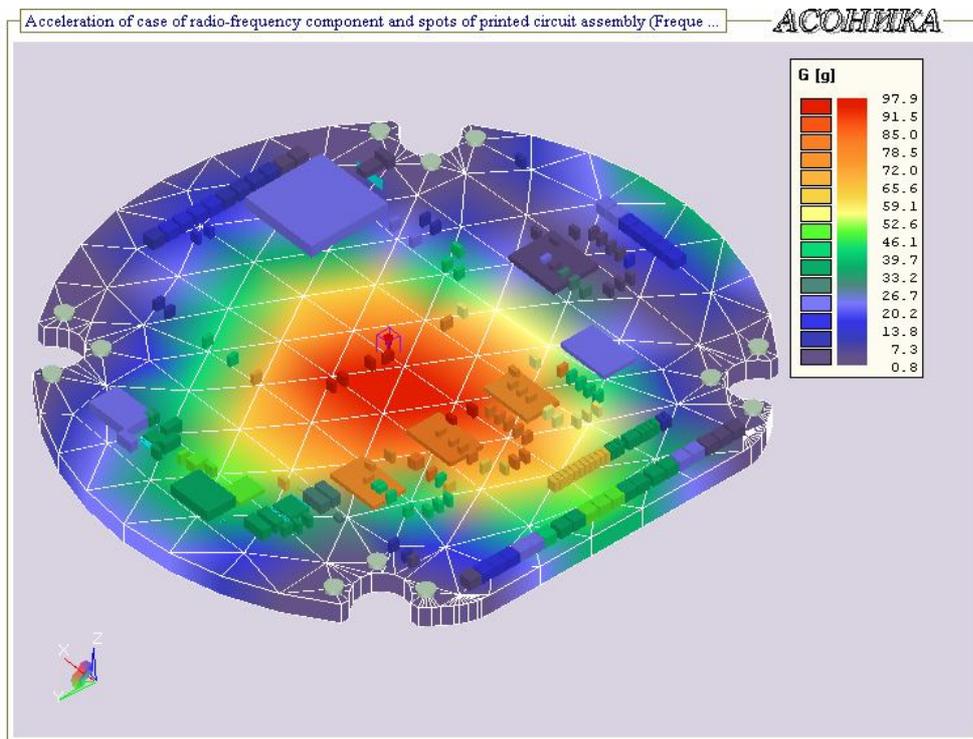


Рис.6. Поле ускорений на резонансной частоте при гармонической вибрации

Представлено описание экспериментальных исследований. Погрешность результата по сравнению с экспериментальными данными по амплитуде составила не более 30-40%, по резонансной частоте не более 14-20%. Полученная точность доказывает адекватность моделей и позволяет их применять на ранних этапах проектирования конструкций РЭС и обеспечивать устойчивость функционирования аппаратуры.

В диссертации рассмотрены примеры применения разработанной методики анализа ПУ сложной формы. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в практику проектирования ряда предприятий и в учебный процесс высшего учебного заведения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Главным результатом работы является повышение эффективности процесса проектирования конструкций РЭС, отвечающих требованиям НД по механическим характеристикам, повышение показателей надежности разрабатываемых РЭС, сокращение сроков и стоимости их создания за счет применения средств математического моделирования для синтеза и анализа проектных решений, а также интеграции с автоматизированной системой научных исследований АСОНИКА.

Основные научные теоретические и практические результаты работы состоят в следующем.

1. Исследованы особенности конструкций ПУ сложной формы с точки зрения моделирования механических процессов.

2. Разработаны алгоритмы автоматизированного создания математических моделей механических процессов в ПУ РЭС сложной формы, позволяющие в короткие сроки проводить анализ разработанных конструкций ПУ на механические воздействия в соответствии с требованиями НД по механическим характеристикам.

3. Разработаны алгоритмы учёта демпфирующих свойств конструкционных материалов ПУ РЭС, позволяющие повысить точность разрабатываемых математических моделей и, как следствие, адекватность результатов моделирования.

4. Разработана структура автоматизированной подсистемы моделирования механических процессов в ПУ РЭС сложной формы, обеспечивающая удобный проектировщику РЭС язык взаимодействия на базе графических интерфейсов ввода-вывода и позволяющая конструктору выполнять сложные математические расчеты без использования специальных знаний в области конечно-элементного анализа.

5. Разработана методика моделирования механических процессов в ПУ РЭС на ранних этапах проектирования, позволяющая в минимальные сроки и с минимальными затратами осуществлять автоматизированное построение математических моделей ПУ сложной формы, проводить расчет на различные механические воздействия и принимать решение об обеспечении стойкости ПУ к механическим воздействиям.

6. Проведено внедрение созданной методики моделирования механических процессов в ПУ РЭС в практику проектирования на ряде промышленных предприятий и в учебный процесс вуза.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Травкин Д.Н.. Разработка автоматизированной подсистемы для моделирования механических процессов в конструкциях БРЭС // Научные технологии. – 2011. - № 11. - С.38-45.

2. Урюпин И.С., Травкин Д.Н. Анализ печатной платы на механические и тепловые воздействия в подсистеме АСОНИКА-ТМ // Научные технологии. – 2011. - № 11. - С.62-69.

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

4. Волков В.А., Травкин Д.Н. Допусковый анализ прецизионных печатных плат // Динамика сложных систем. – 2011. - № 4. - С.62-68.

5. Травкин Д.Н. Учет несовершенной упругости материала в конечно-элементных моделях тонкостенных конструкций при механических колебаниях // Качество. Инновации. Образование. – 2009. № 6(49) - С.27-32.

6. Шалумов А.С., Назаров П.Е., Осипов А.С., Травкин Д.Н. Автоматизированный синтез составных конструкций радиоэлектронных средств. // Системные проблемы надёжности, качества, информационных и электронных технологий. / Материалы X Международной конференции и Российской научной школы. – Москва: Радио и связь, 2005. - С.81-83.

7. Шалумов А.С., Ваченко А.С., Назаров П.Е., Травкин Д.Н., Евдокимов М.А. Автоматизация прочностных расчетов радиоэлектронных средств. // Системные проблемы надёжности, качества, информационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика-2006). / Материалы Международной конференции и Российской научной школы. Часть 1. – М.: Радио и связь, 2006. - С.52-53.

8. Шалумов А.С., Ваченко А.С., Травкин Д.Н. Применение метода суперэлементов при моделировании механических процессов в радиоэлектронных средствах. // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике. / Материалы пятой всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2006. - С.14-16.

9. Ваченко А.С., Травкин Д.Н., Шалумов А.С. Существующие подходы к моделированию механических процессов в радиоэлектронных средствах. // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике. / Материалы пятой всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2006. - С.61-63.

10. Травкин Д.Н., Ваченко А.С. Переупорядочивание методом приближенной минимальной степени для решения систем линейных алгебраических уравнений. // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике. / Материалы VI всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2007. - С.36-38.

11. Ваченко А.С., Травкин Д.Н. Решение задачи собственных значений модифицированным методом Ланцоша. // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике. / Материалы VI всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2007. - С.126-128.

12. Ваченко А.С., Травкин Д.Н. Эффективное LDL-разложение больших разреженных положительно определенных матриц при решении систем алгебраических уравнений в методе

конечных элементов. // Информационные системы и технологии. ИСТ-2008. / Материалы международной научно-технической конференции. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2008. - С.179-180.

13. Ваченко А.С., Травкин Д.Н. Динамический расчёт конструкций радиоэлектронных изделий с учётом несовершенной упругости материала. // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике. / Материалы VII всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Оренбург: ОГУ, 2008. - С.292-295.

14. Ваченко А.С., Травкин Д.Н., Шалумов А.С. Модель учета рассеяния при циклических механических воздействиях на радиоэлектронную аппаратуру // Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в управлении инновационными проектами (Инноватика – 2008) / Материалы Международной конференции и Российской научной школы. Часть 1. - М.: Энергоатомиздат, 2008. - С.66-67.

15. Ваченко А.С., Травкин Д.Н. Моделирование механических процессов в радиоэлектронных изделиях с учетом рассеивания энергии в материале // «Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий»: Материалы научно-практической конференции / Под ред. В.Г. Домрачева, С.У. Увайсова. – М.: МИЭМ, 2008. - С.88-89.

16. Ваченко А.С., Травкин Д.Н. Анализ на случайную вибрацию конструкций радиоэлектронных изделий методом конечных элементов // Информационные системы и технологии. ИСТ-2009 / Материалы XV Международной научно-технической конференции. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2009. - С.194-195.

17. Ваченко А.С., Травкин Д.Н. Определение эквивалентных напряжений по Мизесу при анализе конструкции на случайную вибрацию методом конечных элементов // Информационные системы и технологии. ИСТ-2009 / Материалы XV Международной научно-технической конференции. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2009. - С.196-197.

18. Ваченко А.С., Травкин Д.Н. Амплитудно-зависимое рассеяние энергии в материале при нестационарных режимах деформирования // 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.48-50.

19. Ваченко А.С., Кофанов Ю.Н., Травкин Д.Н. Использование суперэлементов при моделировании конструкций радиоэлектронных средств методом конечных элементов // Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика – 2010) / Материалы XV Международной конференции и Российской научной школы. Часть 1. - М.: Энергоатомиздат, 2010. - С.33 - 34.

20. Ваченко А.С., Травкин Д.Н. Оптимизация параметров анализа гармонического воздействия в курсовом проектировании // Повышение качества высшего профессионального образования: материалы Всероссийской науч.-метод. конф.: в 2 ч. / отв. ред. С. А. Подлесный. – Красноярск: СФУ, 2010. - С.115-117.

21. Ваченко А.С., Травкин Д.Н. Один метод аппроксимации в конечных элементах в лабораторном практикуме // Повышение качества высшего профессионального образования: материалы Всероссийской науч.-метод. конф.: в 2 ч. / отв. ред. С. А. Подлесный. – Красноярск: СФУ, 2010. - С.117-119.

22. Ваченко А.С., Травкин Д.Н. Эффективные методы решения задачи на собственные значения в курсовом проектировании // «Повышение качества высшего профессионального образования»: материалы Всероссийской науч.-метод. конф.: в 2 ч. / отв. ред. С. А. Подлесный. – Красноярск: СФУ, 2010. - С.162-164.

23. Ваченко А.С., Травкин Д.Н., Елизаров А.Г., Шалумов А.С. Сборка глобальной матрицы жесткости при моделировании механических процессов в радиоэлектронных средствах методом конечных элементов // Интеллектуальные системы / Труды Девятого Международного симпозиума / под ред. К.А. Пупкова. – М.: РУСАКИ, 2010. - С.190-192.