

На правах рукописи



Бовсуновский Александр Борисович

**МЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ БОРТОВОЙ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», в лаборатории 102 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Бутов Владимир Григорьевич

Официальные оппоненты:

Черепанов Олег Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра электронных средств автоматизации и управления, заведующий кафедрой

Усманов Давид Бисенович, кандидат физико-математических наук, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева», ведущий инженер

Ведущая организация:

ОАО «Научно-производственный центр «Полус», г. Томск

Защита диссертации состоится 27 декабря 2013 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (корпус 10, аудитория 239).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан 22 ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Христенко
Юрий Фёдорович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Процесс создания космического аппарата (КА) включает в себя этапы, связанные с проектированием, изготовлением и экспериментальной отработкой отдельных агрегатов, систем и аппарата в целом. На всех этапах проводится большое количество испытаний, различных по целям, задачам, методам, уровню проведения и стоимости. При этом затраты на проведение испытаний могут составлять до 80% от стоимости всех работ.

Постоянное усложнение и повышение стоимости современных КА требуют соответствующих изменений как в стратегии проектирования, так и в программах экспериментальной отработки. Как следствие, все больше внимания уделяется повышению эффективности технологии проектирования, производства и испытаний бортовой аппаратуры ракетно-космической техники. Среди требований, предъявляемых к приборам космического назначения, важное место занимают характеристики стойкости и долговечности при воздействии механических нагрузок. В современных условиях до 40% возникающих проблем механической надежности решаются при помощи испытаний в рамках наземной экспериментальной отработки (НЭО). Совершенствование средств математического моделирования процессов деформирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) постепенно уменьшает эту долю, выводя решение ряда проблем в область проектирования. Современный опыт и технологии проектирования РЭА показывают, что использование математической модели изделия позволяет не только существенно сократить сроки разработки, но также и снизить объемы НЭО за счет сокращения итераций доводки опытных образцов до конечного продукта.

Задачи моделирования на этапах проектирования и отработки имеют индивидуальные особенности, связанные как с различиями в объеме информации об изделии, так и с целями исследований. Зачастую эти задачи решаются при помощи различных инструментов и методик, что затрудняет использование полученных результатов и полезных наработок на смежных этапах приборного производства. В этой связи актуальной задачей является создание и применение единых средств и методик математического моделирования как на этапах проектирования, так и на этапах НЭО.

Конструктивная сложность ракетно-космической техники, многоплановость схмотехнических решений и обилие специальной элементной базы затрудняют использование унифицированных программных средств моделирования механических процессов. Требуется дополнительная адаптация функционала этих систем к специфике того или иного производства, организация взаимодействия со смежными системами,

автоматизация решения типовых задач и выполнения стандартных процедур. Возникающие при этом трудности удается частично решить за счет встроенных средств автоматизации и обмена данными, но остается нерешенным и целый ряд важных проблем:

- сложность или невозможность использования собственных методических и теоретических разработок;
- ограниченная или отсутствующая возможность гибкой настройки комплекса для решения новых специфичных задач;
- порой неприемлемо высокая стоимость создания и обслуживания вычислительных ресурсов достаточной мощности для решения масштабных задач.

В этой связи актуальными являются как разработка эффективной методики механического анализа конструкции РЭА на вычислительных машинах средней мощности, так и реализация этой методики в виде комплекса программных средств, которые могут быть встроены в существующую информационную инфраструктуру предприятия и повысить эффективность ее функционирования.

Степень разработанности темы исследования. Среди работ, связанных с различными аспектами моделирования механических воздействий на РЭА, включая автоматизацию типовых задач механического анализа (МА), можно отметить работы Шалумова А.С., Фадеева О.А., Кофанова Ю.Н. и Ваченко А.С. Указанные авторы ведут активные исследования в области создания и совершенствования новых средств автоматизированного проектирования и анализа РЭА. В их работах обсуждается широкий спектр вопросов: использование различных аналитических и численных методов, применение принципов CALS-технологий, оптимизация алгоритмов поиска решения комплексных задач. Создаваемые при этом программные средства направлены на решение специальных задач определенного типа и имеют существенные ограничения по использованию сложной геометрии моделей.

Другое направление исследований представлено работами Хвалько А.А., Морозова Е.А., Леонтьева Н.В. В указанных работах также рассматриваются принципы синтеза модели конструкции на базе типовых элементов, а также представлен ряд практических методик автоматизации процесса моделирования, но на основе развитой коммерческой САЕ-системы. Таким образом, основное внимание исследований сосредоточено на задачах практического моделирования, а не на проблемах оптимизации расчетных алгоритмов и разработки новых численных методик решения. Главными недостатками этого подхода являются ограничения по сложности модели, поддающейся расчету на имеющихся вычислительных системах. В частности, в работах А.А. Хвалько в основном рассматриваются задачи

моделирования несущих конструкций РЭА без детального исследования поведения отдельных электрорадиоизделий (ЭРИ). Между тем, оценка стойкости ЭРИ к механическим воздействиям в составе прибора имеет большую важность и может оказывать определяющее влияние на выбор того или иного схемотехнического решения, а также на конфигурацию несущих конструкций разрабатываемого изделия.

Научное исследование, представленное в данной диссертационной работе, является развитием принципов, предложенных Хвалько А.А. в направлении разработки математической модели РЭА и реализации расчетной методики, позволяющей производить оценку стойкости к механическим воздействиям как базовых и коммутационных несущих конструкций (БНК и КНК), так и полного спектра применяемых ЭРИ.

Цель работы и задачи исследований. Главной целью работы является разработка математической модели РЭА и эффективной методики расчета, применимых на всех стадиях проектирования и экспериментальной отработки, позволяющих получать характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих, коммутационных конструкций РЭА, входящих в ее состав радиоизделий, а также производить комплексную оценку стойкости РЭА к заданным механическим воздействиям. Данная методика должна обеспечивать приемлемую точность результатов и соответствовать ресурсным возможностям вычислительных систем класса рабочих станций.

В соответствии с целью работы сформулированы следующие задачи исследований:

- а) провести анализ типовых процессов проектирования и НЭО с целью выработки единых требований к математическому моделированию РЭА;
- б) определить средства понижения ресурсоемкости задач МА РЭА и разработать эффективную методику моделирования;
- в) определить структуру базы данных, а также архитектуру программных средств, реализующих разработанную методику;
- г) реализовать и апробировать комплекс программных средств проведения МА.

Научная новизна работы. Автором в процессе проведения исследований получены следующие новые научные результаты:

- а) на основе метода конечных элементов решения задач деформирования твердого тела разработана методика двухуровневого анализа, заключающаяся в выделении анализа БНК и КНК в подзадачу верхнего уровня, а анализа ЭРИ – в подзадачу нижнего уровня;

- б) исследованы различные способы обработки исходных геометрических моделей для задач обоих уровней и выработаны критерии их эффективного упрощения;
- в) определены критерии необходимости решения задач нижнего уровня, исходя из результатов решения задачи верхнего уровня;
- г) исследованы различные способы задания граничных условий в задачах нижнего уровня и разработана методика, позволяющая достигать высокой точности в сравнении с эталонной моделью на верхнем уровне;
- д) выработаны дополнения к типовым методикам планирования и проведения экспериментальной отработки РЭА, призванные повысить их эффективность за счет использования средств математического моделирования, а также методика верификации и адаптации математической модели по результатам испытаний опытного образца;
- е) разработаны алгоритмы автоматизации подготовки расчетной модели, проведения расчета и интерпретации результатов;
- ж) разработана база данных типовых конструктивных элементов РЭА, а также комплекс программных средств двухуровневого механического анализа;
- з) на основе разработанной методики проведено комплексное исследование параметров механической надежности образца РЭА.

Теоретическая и практическая значимость работы. На основе нестационарной линейной системы уравнений механики сплошных сред и метода конечных элементов разработана и оптимизирована комбинированная модель РЭА, включающая в себя три вида приближений конструктивных элементов: подробный (объемная модель), плоский (оболочечная модель) и массовый (массогабаритная модель). Данная модель позволяет получать оценки стойкости всех составных частей РЭА к заданным механическим воздействиям со значительной экономией времени и вычислительных ресурсов.

Структура и свойства модели делают эффективным ее использование как на этапах проектирования, так и на различных этапах НЭО, позволяя выявлять механически ненадежные конструктивы и схмотехнические решения на ранних стадиях разработки. Интерфейс (настраиваемые параметры) модели позволяет производить ее адаптацию по результатам стендовых испытаний без существенного перестроения и усложнения. Это, в свою очередь, позволяет с большей точностью прогнозировать как результаты последующих стендовых испытаний, так и поведение приборов в условиях, воспроизведение которых на испытательном оборудовании затруднено или не представляется возможным.

Создан комплекс программных средств, автоматизирующий создание и настройку комбинированной модели РЭА, проведение расчетов и анализ результатов. Данный комплекс позволяет отслеживать конструктивные и схемотехнические изменения, пересчитывать параметры НДС и запасы прочности конструктивных элементов РЭА с минимальным участием пользователя.

Увеличение показателей надежности готовых изделий РЭА в сочетании с сокращением трудовых затрат на производство, доводку и испытания позволят не только увеличить качество и конкурентоспособность продукции ракетно-космической отрасли, но и высвободить дополнительные ресурсы на проведение перспективных научно-практических исследований.

Программный комплекс проведения МА на основе предлагаемой модели РЭА и алгоритмы автоматизации расчетов были использованы в опытно-конструкторской работе (ОКР), выполненной в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 для ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф.Решетнева».

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялся конечно-элементный метод решения задач механики деформируемого твердого тела. Исследование отклика конструкции РЭА на динамические воздействия (гармоническая и широкополосная случайная вибрация, а также ударное воздействие) проводилось с использованием собственных форм колебаний, полученных в результате модального анализа. В алгоритмах переноса граничных условий из модели верхнего уровня в модель нижнего уровня использовался метод линейной интерполяции узловых параметров. При вычислении критериев необходимости проведения МА нижнего уровня использовалась разностная аппроксимация второй производной по узлам расчетной сетки.

Положения, выносимые на защиту:

- а) предложения по оптимизации технологии проектирования, а также дополнения к типовым методикам планирования и проведения экспериментальной отработки РЭА;
- б) методика двухуровневого МА конструкции РЭА;
- в) комбинированная модель РЭА для расчета показателей механической надежности изделия на различных этапах проектирования и НЭО;
- г) методика верификации и адаптации модели двухуровневого МА РЭА по результатам стендовых испытаний;
- д) комплекс программных средств проведения двухуровневого МА РЭА.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов основана на использовании фундаментальных уравнений механики сплошных сред, использовании апробированных численных методов решения задач деформирования твердого тела, а также сравнении результатов расчета с данными стендовых испытаний образца РЭА.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. XV Международная научная конференция "Решетневские чтения" (г. Красноярск, СибГАУ, 2011);
2. X Международная конференция пользователей программного обеспечения ANSYS – ANSYS/CADFEM (г. Санкт-Петербург, ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс», 2013);
3. VIII Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, НИИ ПММ ТГУ, 2013)

Материалы диссертации отражены в 6 опубликованных работах, в том числе 4 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, получено 1 авторское свидетельство о регистрации базы данных.

Вклад автора в проведенное исследование.

Личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве с А.А. Хвалько и А.А. Ящуком, заключается в непосредственном его участии на всех этапах исследований: обсуждение физики процессов, постановка задач, разработка алгоритмов и программ, проведение параметрических расчетов, анализ и интерпретация результатов, написание статей. Основные результаты, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. Постановка задач исследований осуществлена автором работы как единолично, так и в соавторстве с научным руководителем.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, основного текста, заключения, списка сокращений и списка литературы. Основной текст разбит на 4 главы и содержит 14 таблиц и 45 рисунков. Список литературы включает 110 наименований. Общий объем работы – 132 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, изложены основные научные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены общие вопросы моделирования механических воздействий на бортовую РЭА космических аппаратов.

Приведен обзор современных средств проведения МА РЭА, из которого следует, что все больше производителей РЭА специального назначения переходят от поддержки собственных программных средств моделирования к использованию унифицированных систем инженерного анализа, реализующих метод конечных элементов.

Проведен анализ типовых задач проектирования и наземной экспериментальной отработки в рамках приборного производства, обозначены ключевые характеристики и требования к математическому моделированию и использованию его результатов на различных стадиях разработки и испытаний изделий.

На этапах проектирования и лабораторной отработки средствами математического моделирования предложено определение зон безопасного расположения ЭРИ для построения и отработки схемотехнических решений с учетом требований механической надежности.

На этапах конструкторской доводки и предварительных испытаний предложен ряд шагов, обеспечивающих предварительную верификацию и адаптацию математической модели. Средствами интерфейса математической модели (ее настраиваемых параметров) предложено проведение исследования разброса характеристик, связанных с различными вариантами упрощения, а также корректировка параметров модели по результатам стендовых испытаний. К наиболее эффективным инструментам адаптации модели РЭА отнесены настройки параметров КНК и настройки параметров нагрузки. Адаптация математической модели позволяет приводить ее характеристики в соответствие с реальным изделием без существенного усложнения и перестроения.

Основным требованием к режиму механического деформирования приборов специального назначения является нахождение в области упругих деформаций. Таким образом, выделены актуально востребованные критерии разрушения различных элементов РЭА. К ним отнесены критические напряжения (пределы прочности, текучести, отрыва или сдвига), а также параметры долговечности материалов при многократном циклическом нагружении (S-N зависимости количества циклов до разрушения от приложенной нагрузки).

Показано, что единую математическую модель РЭА, пригодную для использования на этапах проектирования и экспериментальной отработки, целесообразно строить с перспективой проведения расчетов методом конечных элементов в высокоэффективных системах инженерного анализа (например, ANSYS или NASTRAN), а гибкость модели в отношении различных задач проектирования и экспериментальной отработки может быть достигнута за счет применения шаблонов конечно-элементных моделей (КЭМ) отдельных конструктивных элементов РЭА различной степени сложности.

Указано, что эффективное комплексное решение актуальных задач моделирования в рамках приборного производства может быть достигнуто путем создания интегрированной системы, включающей в себя базу данных КЭМ конструктивных элементов РЭА, вычислительное ядро современной САЕ-системы, а также программные модули автоматизации типовых процедур проведения МА и анализа данных, реализующие специфику моделирования на различных этапах проектирования и отработки изделий.

Во второй главе рассмотрены вопросы постановки и практического решения задач МА РЭА методом конечных элементов, а также вопросы понижения ресурсоемкости задач конечно-элементного анализа.

В качестве системы определяющих уравнений физической постановки задачи деформирования твердого тела рассмотрены уравнение сохранения количества движения и уравнения связей смещений, деформаций и механических напряжений в виде:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{u} dV = \int_V \rho \vec{F} dV + \int_S [\sigma] \vec{n} dS - \frac{d}{dt} \int_V \lambda \vec{u} dV \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right), \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} \frac{E}{2(1+\nu)} \varepsilon_{ij} & \text{для } i \neq j \\ \frac{E}{(1+\nu)} \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{(1-2\nu)} \sum_{k=1,2,3} \varepsilon_{kk} \right) & \text{для } i = j \end{cases}, \quad (3)$$

где ρ - плотность материала в элементарном объеме;

\vec{F} - результирующий вектор массовых сил;

\vec{u} - первая производная вектора перемещения \vec{u} элементарного объема;

λ - коэффициент демпфирования материала;

$[\sigma] \vec{n}$ - вектор внешних поверхностных сил, выраженный через тензор напряжений и единичный вектор нормали к элементарной площадке на поверхности тела.

ε_{ij} - компоненты тензора деформаций;

σ_{ij} - компоненты тензора напряжений;

ν - коэффициент Пуассона для материала;
 E – модуль упругости материала.

В качестве граничных и начальных условий рассмотрены известные распределения смещений на закрепленных поверхностях, распределения внешних сил на свободных поверхностях, а также смещения в начальный момент времени в виде:

$$\vec{u} = \vec{u}^{(S_1)}(t, \vec{x}), \quad \text{для } \vec{x} \in S_1, \quad (4)$$

$$[\sigma] \vec{n} = \vec{F}^{(S_2)}(t, \vec{x}), \quad \text{для } \vec{x} \in S_2. \quad (5)$$

$$\vec{u} = \vec{u}^{(V)}(t=0, \vec{x}), \quad \text{для } \vec{x} \in V, \quad (6)$$

Показано, что метод конечных элементов для решения задачи в постановке (1)-(3) с условиями (4)-(6) может быть получен на основе применения метода Бубнова-Галеркина. Объем тела разбивается на элементы, в узловых точках которых задаются известные функции формы так, что искомая функция перемещений в окрестности узла может быть выражена через значение перемещения в этом узле:

$$\vec{u}(\vec{x}) = \vec{u}_k \psi_k(\vec{x}). \quad (7)$$

В этом случае функция $\psi_k(\vec{x})$ может рассматриваться как базисная функция для окрестности узла с индексом k . С учетом требования ортогональности невязки аппроксимированного решения к принятому базису (по Галеркину) уравнение (1) с подстановкой (7) может быть проинтегрировано по всему объему тела и упрощено до системы алгебраических уравнений, в которой искомыми параметрами являются не смещения по всему объему тела, а параметры аппроксимации – смещения в узловых точках тела, разбитого на элементы в виде:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{B\}, \quad (8)$$

где $\{U\}$ – вектор искомых значений в узловых точках;
 $[M]$ – матрица, называемая матрицей масс;
 $[C]$ – матрица, называемая матрицей демпфирования;
 $[K]$ – матрица, называемая матрицей жесткости;
 $\{B\}$ – вектор известных правых частей.

Рассмотрены способы решения системы (8) в постановке задач статического, модального и гармонического анализа, а также анализа воздействия широкополосной случайной вибрации (ШСВ) и удара.

Показано, что в статической постановке решается уравнение вида:

$$[K]\{U\} = \{B\}, \quad (9).$$

и искомые перемещения могут быть получены после обращения матрицы $[K]$ в виде

$$\{U\} = [K]^{-1} \{B\}. \quad (10)$$

Показано, что при модальном анализе решается уравнение вида:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = 0, \quad (11)$$

и собственные частоты могут быть получены после нахождения собственных чисел матрицы $[M]^{-1}[K]$ в виде:

$$\omega_i = \sqrt{\lambda_i},$$

или

$$f_i = \frac{\sqrt{\lambda_i}}{2\pi}, \quad (12)$$

где λ_i – собственные числа матрицы $[M]^{-1}[K]$,

ω_i – собственные частоты, выраженные в рад/с,

f_i – собственные частоты, выраженные в герцах.

Показано, что при гармоническом анализе для решения уравнения (8) может быть использован метод суперпозиции форм, в основе которого лежит разложение неизвестного решения по собственным модам и переход к модальным координатам y_i в виде:

$$\{u\} = \sum_{i=1}^n \{\Phi\}_i y_i, \quad (13)$$

где n - количество используемых собственных форм.

Тогда, решение в модальных координатах может быть получено в виде

$$y_{j \max} = \frac{f_{j \max}}{\omega_j^2 - \Omega^2 + i(2\omega_j \Omega \xi_j)}, \quad (j=1, \dots, n), \quad (14)$$

где $y_{j \max}$ – амплитуда для j -й моды на частоте Ω .

ω_j – собственная радиальная частота j -й моды;

ξ_j – относительная величина демпфирования j -й моды;

$$f_j = \{\Phi\}_j^T \{B\}.$$

Показано, что отклик конструкции на действие ШСВ или удара может быть получен на основе набора собственных форм в виде:

$$\{u\}_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} A_i \{\Phi\}_i A_j \{\Phi\}_j}, \quad (15)$$

где $\{\Phi\}_i$ – собственная форма колебаний для i -й моды,

ε_{ij} – коэффициент связи между i -й и j -й модами.

γ_i - коэффициент участия формы $\{\Phi\}_i$.

Для ударной нагрузки, заданной значением спектра ускорения $a(\omega)$, коэффициент A_i в (15) вычисляется по формуле:

$$A_i = \frac{a_i \gamma_i}{\omega_i^2}, \quad (16)$$

Где a_i – значение спектра ускорения на собственной частоте ω_i .

Для воздействия ШСВ, заданной спектральной плотностью ускорения $S(\omega)$, коэффициент A_i в (15) вычисляется по формуле:

$$A_i = \frac{\gamma_i}{\omega_i^2} \sqrt{S_i \omega_i \left(\frac{\pi}{4\xi} - 1 \right) + \int_0^{\omega_i} S d\omega}, \quad (17)$$

где S_i – значение спектральной плотности ускорения на собственной частоте ω_i

ξ – коэффициент демпфирования.

γ_i - коэффициент участия формы $\{\Phi\}_i$.

Таким образом, результаты модального анализа конструкции ложатся в основу всех видов анализа динамических воздействий, а соответствие частотным характеристикам реального изделия становится основным критерием качества математической модели.

Отмечено, что такие методы снижения ресурсоемкости задач МА РЭА, как разбиение на домены и суперэлементы, понижают уровень минимальных требований к вычислительной системе, но не дают выигрыша по времени расчетов. Предложен новый метод, заключающийся в разделении сложной расчетной задачи на одну подзадачу верхнего уровня в полной постановке и множество подзадач нижнего уровня в статической постановке. Рассмотрена специфика организации моделей верхнего и нижнего уровней, а также обозначен круг решаемых задач на каждом из уровней МА.

В результате исследования различных методик переноса граничных условий из подзадачи верхнего уровня в подзадачи нижнего уровня обосновано использование линейной интерполяции узловых перемещений и поворотов на границе локальной области моделирования. Данный способ обеспечивает расхождение характеристик НДС ЭРИ на нижнем уровне МА менее 0.4% по сравнению с эталонным расчетом. Перенос граничных условий по всей площади модельной области или по зоне контакта ЭРИ с КНК приводят к значительно большим расхождениям в определении механических напряжений.

Показано, что предлагаемая расчетная методика позволяет вычислять параметры НДС и отслеживать заданные критерии разрушения для всех

конструктивных элементов РЭА (КНК, БНК, ЭРИ) со значительной экономией времени и вычислительных ресурсов как за счет упрощения модели верхнего уровня, так и за счет отсечения малозначимых расчетных подзадач нижнего уровня.

В качестве критериев необходимости решения подзадач нижнего уровня предложены предельные значения ускорения и характеристик изгиба КНК в зоне крепления ЭРИ:

$$A = \left| \frac{d^2 u_3}{dt^2} \right|, \quad K_1 = \left| \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} \right|, \quad K_2 = \left| \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} \right|, \quad (18)$$

где x_1, x_2 – локальные координаты на плоскости КНК;
 u_3 – смещения по нормали к плоскости КНК.

Эти же критерии предложено использовать и для предварительной оценки зоны безопасного расположения ЭРИ на КНК на стадии эскизного проектирования изделий. Предельные значения A, K_1 и K_2 могут быть получены на основании статического анализа КЭМ ЭРИ нижнего уровня, при котором на противоположных границах модельной области КНК задаются изгибающие моменты одинаковой величины, но противоположного направления. Для вычисления второй производной смещений вдоль локальных координатных осей используется ее разностная аппроксимация по узловым точкам.

В третьей главе рассмотрены вопросы построения КЭМ различных конструктивных элементов РЭА для использования в двухуровневом комплексном МА, а также выработаны единые принципы моделирования для различных конструктивов бортовой аппаратуры.

Исходя из выбранных подходов к решению задач анализа динамических нагрузок, ключевым показателем качества КЭМ конструктивных элементов РЭА после их упрощения принята степень соответствия результатов модального анализа полной и упрощенной моделей.

Показана принципиальная возможность, эффективность и универсализм моделирования БНК однослойными оболочками, а КНК – многослойными оболочечными элементами для различных типов конструкций (блочной-рамочной и крейт-конструкции приборов в частности). Для упрощенных моделей БНК различных конфигураций (рисунок 1) возможно воспроизведение результатов модального анализа с точностью от 5.7 до 1.5% по сравнению с подробными моделями.

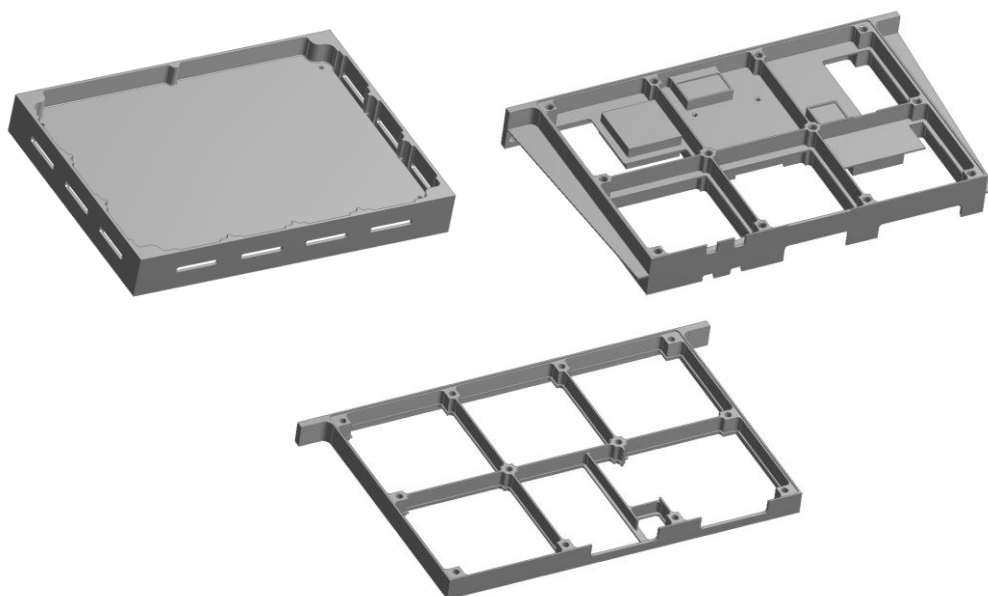


Рис. 1 Исследованные варианты несущих рамок приборов блочно-рамочной конструкции

Исследовано влияние характеристик металлизации печатных плат при построении модели КНК на верхнем уровне МА РЭА. Показано, что отказ от учета токопроводящих слоев влечет за собой ошибки в определении собственных частот КНК от 10 до 30%. Также показано, что влияние степени металлизации (отношения площади рисунка проводников к общей площади платы) на уровне 10-75% на частотные характеристики КНК может быть успешно имитировано изменением толщин токопроводящих слоев в пределах $1/35 - 1/5$ от начального значения.

Рассмотрены два вида упрощенного моделирования ЭРИ на верхнем уровне МА: добавочными массами в узлах КНК и плоскими пластинами. В качестве плоской модели ЭРИ создается оболочка, толщина, материал и геометрия которой соответствуют корпусу радиоэлемента и геометрии его контакта с КНК. Для учета полной массы ЭРИ в узлах пластины вводится дополнительная масса. Сформулированы следующие критерии выбора варианта КЭМ ЭРИ для МА верхнего уровня:

- а) при проведении грубых оценочных расчетов целесообразно создание массовой модели (имитатора) ЭРИ с внешней геометрией КНК и совокупной массой радиоизделий, предполагаемых для размещения на данной площади;
- б) при проведении штатных исследований механической надежности элементов РЭА массовую модель отдельного ЭРИ целесообразно применять в случае, когда его посадочное место покрывает от 1 до 5 элементов сеточного разбиения КНК; в остальных случаях следует пользоваться плоской моделью;

в) при проведении специальных исследований поведения ЭРИ, для которых в ТУ заданы допустимые пределы механических нагрузок, на верхнем уровне МА может быть использована полная модель.

Исследовано влияние материалов и структуры корпусов ЭРИ на характеристики КЭМ нижнего уровня МА. Сделан вывод, что керамические корпуса могут считаться однородными, тогда как в пластиковые корпуса целесообразно внедрять вставки, имитирующие керамическую подложку «начинки».

Исследовано влияние материалов и способов моделирования различных контактов на характеристики КЭМ нижнего уровня МА. Сделан вывод, что соединение гибкого вывода с керамическим корпусом допустимо выполнять по плоскости корпуса, тогда как соединение с пластиковым корпусом целесообразно моделировать с заглублением. Указано, что контакт вывод-паяное соединение в общем случае может быть представлен путем создания дополнительного твердотельного объекта, соответствующего конфигурации материала припоя. Особенностью моделирования здесь является выбор геометрии: полусферическая капля, параллелепипед с фаской или скруглением в приливной части. Также указано, что моделирование контакта с печатной платой может быть выполнено в рамках комплексной многослойной модели КНК введением полноразмерного слоя металлизации. Моделирование соединений матричного типа (BGA и CGA) не имеет каких-либо специфических особенностей, за исключением требования использовать в качестве геометрии выводов их форму после оплавления, определяемую в соответствии с принятой технологией пайки. То же самое относится и к безвыводным ЭРИ, у которых в качестве вывода рассматривается сама капля припоя.

В четвертой главе рассмотрены вопросы создания и использования комплекса программных средств автоматизации проведения двухуровневого МА РЭА.

Разработана модульная архитектура программного комплекса, где функциональные блоки системы являются динамически загружаемыми библиотеками, работающими под управлением единой графической оболочки (рисунок 2).

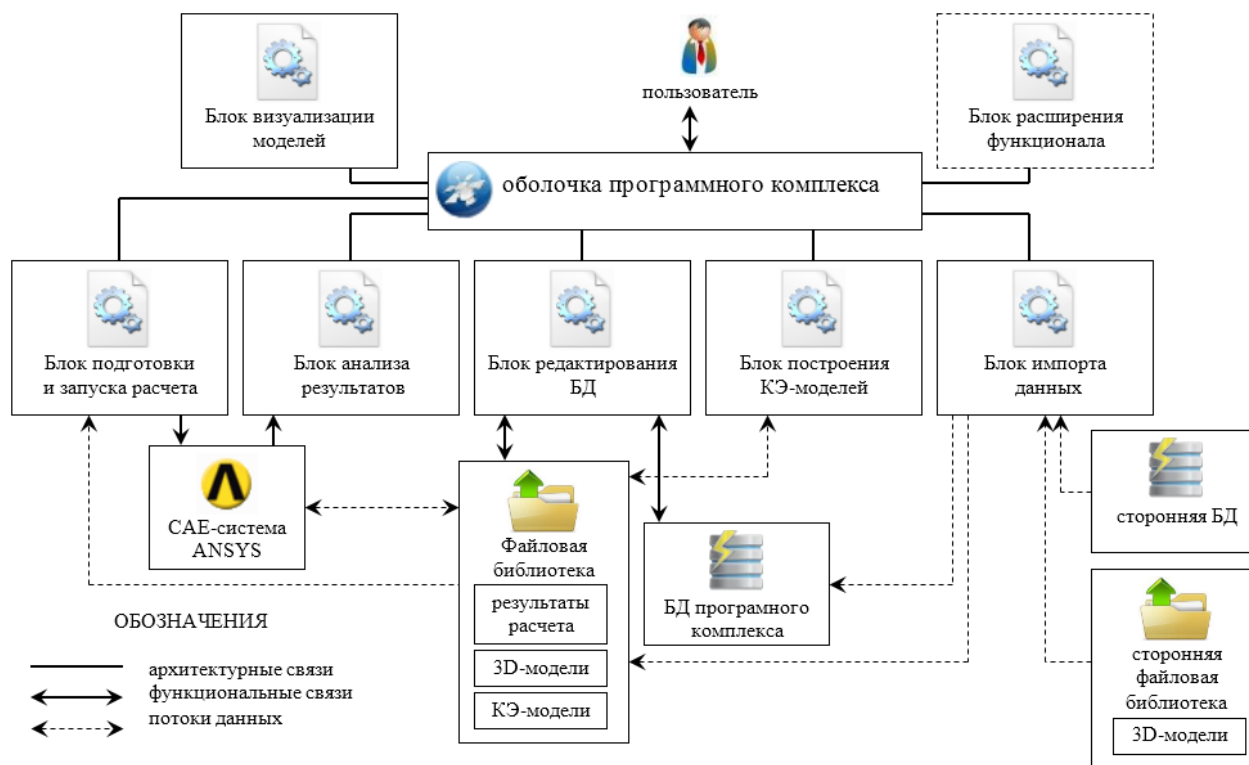


Рис. 2 Архитектура программного комплекса автоматизации проведения МА РЭА

Указано, что модульная архитектура программного комплекса является наиболее перспективной с точки зрения создания, поддержки, сопровождения и наращивания функционала. В рамках предложенной архитектуры межмодульное взаимодействие организовано на основе программных интерфейсов общего пользования. Данная технология программирования позволяет отделить понятие программного функционала и ссылки на этот функционал от понятия программного объекта и ссылки на этот объект. Таким образом, модули системы имеют возможность по мере необходимости заимствовать функционал друг у друга, оставаясь объектно-независимыми друг от друга.

При разработке структуры БД использованы базовые принципы, изложенные в диссертационной работе А.А. Хвалько: таблицы реляционной БД разделены на служебные (где хранится информация о структуре БД для использования в графическом интерфейсе программного комплекса) и рабочие (где хранится информация для обеспечения проведения многоуровневого МА). Вместе с тем, имеется ряд существенных дополнений.

Большинство рабочих таблиц БД организовано так, что для записей предусмотрено внутреннее структурирование (группировка), в котором некоторые из табличных записей играют роль служебных заголовков подгрупп. Остальные записи, кроме рабочих данных, содержат еще и ссылку на определенную «родительскую» подгруппу в той же таблице.

В разработанной системе введено и используется понятие конфигурации, как совокупности параметров, которые соответствуют определенной задаче расчета или анализа. В общем случае содержимое рабочих таблиц БД принимается за «базовую» конфигурацию, а совокупность изменений (отличий), с которыми ведется оптимизационный поиск, – за «расчетную» конфигурацию. Для хранения конфигураций используется структурированная таблица, что дает возможность создавать вложенные конфигурации с возможностью их каскадного применения.

Предложенная архитектура программного комплекса многоуровневого МА РЭА реализована на языке C++ с использованием кросс-платформенных библиотек Qt версии 4.8 и OpenCascade версии 6.5. База данных программного комплекса реализована на СУБД MySQL. В качестве САЕ-системы с развитыми средствами программного доступа к решателю, препроцессору и постпроцессору использована система ANSYS версии 12.5. Скрипты автоматизации работы с решателем ANSYS написаны на языке APDL. Скрипты автоматизации работы с системой геометрического моделирования SolidWorks написаны на языке Visual Basic.

На рисунке 3 показан вид графической оболочки системы. Оболочка имеет стандартную оконную структуру, включающую в себя главное меню, панели инструментов, встроенные области различного назначения. По умолчанию отображаются области редактирования компоновочной схемы РЭА и визуализации пространственной геометрии.

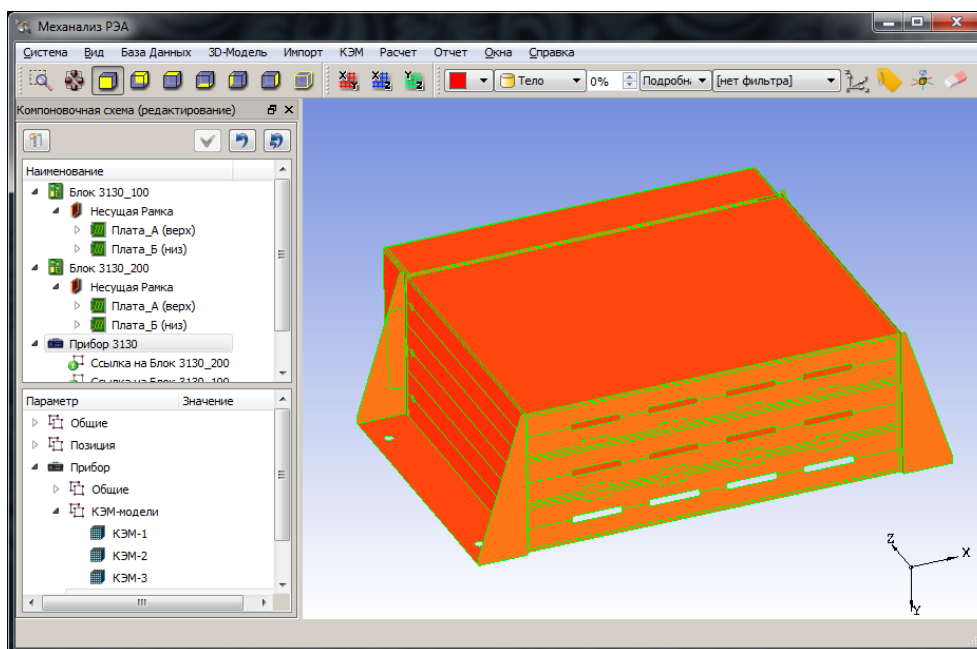


Рис. 3 Оболочка программного комплекса механического анализа РЭА

Задание параметров и запуск расчетов производится в диалоговом окне менеджера расчетных заданий (рисунок 4).

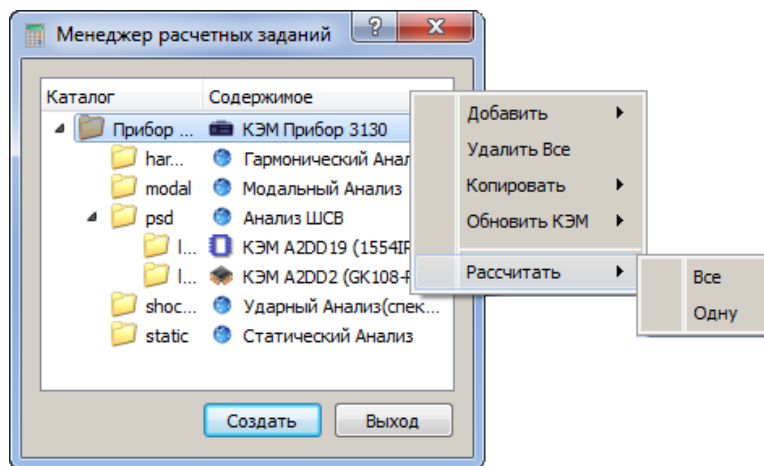


Рис. 4 Диалоговое окно менеджера расчетных заданий

В корне рабочей папки комплекса формируются КЭМ различных приборов или отдельных электронных модулей. Для каждого из них может быть задано несколько расчетных заданий МА верхнего уровня с различными типами и параметрами нагрузок. При необходимости проведения МА нижнего уровня для отдельных ЭРИ соответствующие расчетные задания создаются в поддереве заданий МА верхнего уровня. Предусмотрен запуск как единичного расчета, так и каскадное выполнение всего дерева заданий, что обеспечивает максимальный уровень автоматизации всего комплекса исследовательских задач.

С целью апробирования и верификации разработанной методики и средств проведения МА РЭА было проведено исследование прибора модульной конструкции, показанного на рисунке 5.

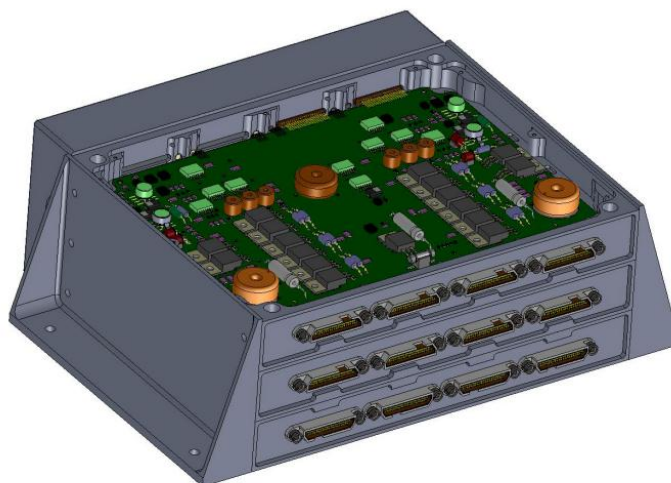


Рис. 5 Геометрическая модель прибора (без верхней крышки)

Следуя разработанной методике МА, был проведен расчет НДС несущей конструкции прибора (БНК-КНК) и определен диапазон разброса параметров, поддающийся корректировке через интерфейс математической модели. В частности, расчеты показали, что инструментарий адаптации модели позволяет корректировать положение максимального отклика

конструкции при гармонической вибрации в пределах 294–334 Гц за счет параметров КНК без изменения параметров БНК. Данный инструментарий позволил с приемлемой точностью выверить положение максимального отклика по результатам стендовых испытаний на воздействие гармонической нагрузки (рисунок 6).

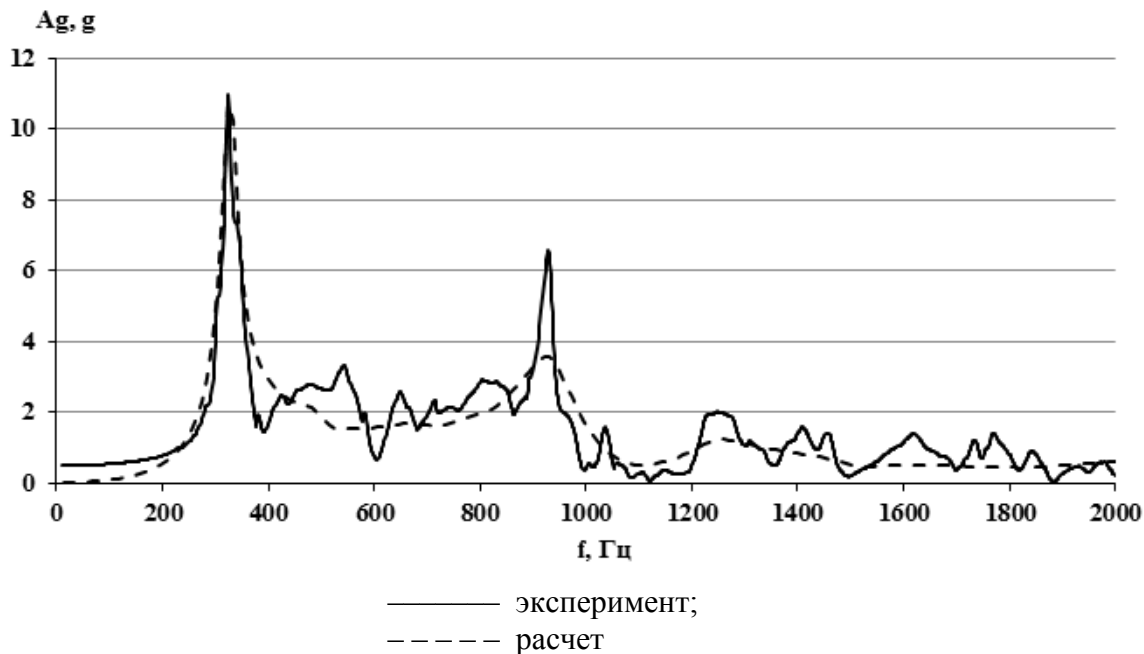


Рис. 6 Результаты расчета и стендовых испытаний прибора на воздействие гармонической нагрузки по вертикальной оси прибора

Адаптированная модель затем показала и хорошее соответствие результатам испытаний на воздействие ШСВ (рисунок 7).

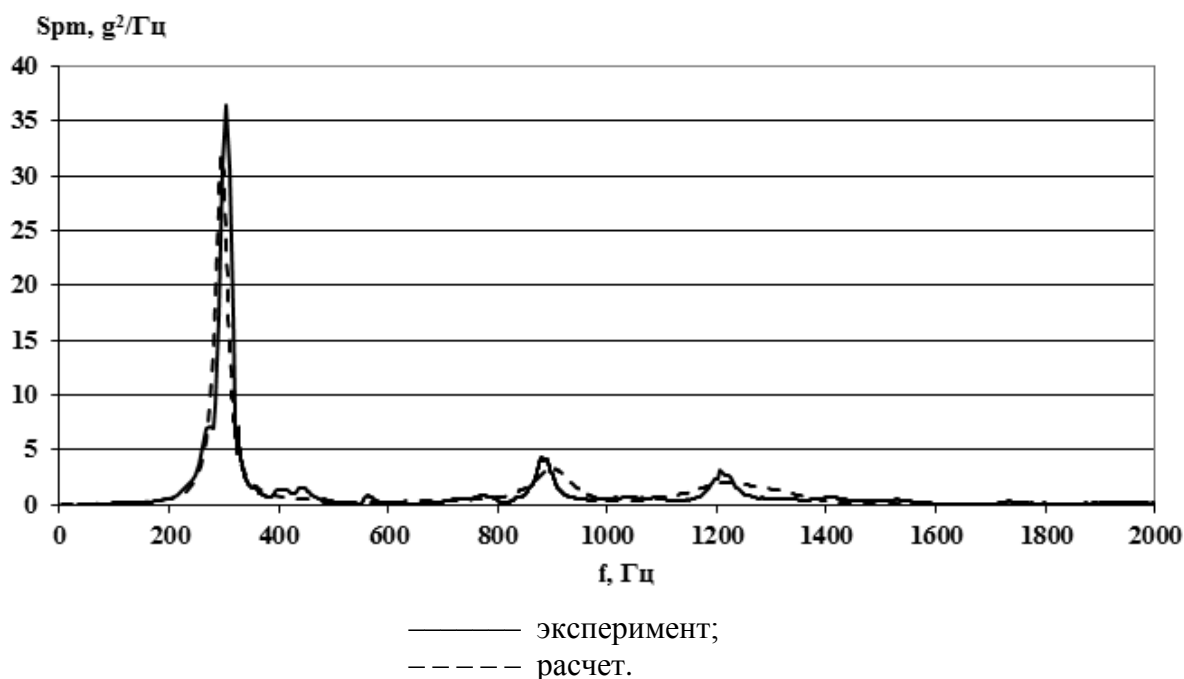


Рис. 7 Результаты расчета и стендовых испытаний прибора на воздействие ШСВ по вертикальной оси

По итогам комплексного расчета было определено наиболее деформируемое ЭРИ (рисунок 8) и проведен его МА в условиях эквивалентных деформаций и ускорения. Результаты МА верхнего и нижнего уровней для всех конструктивных элементов прибора показали достаточно большие запасы по прочности (таблицы 1 и 2).

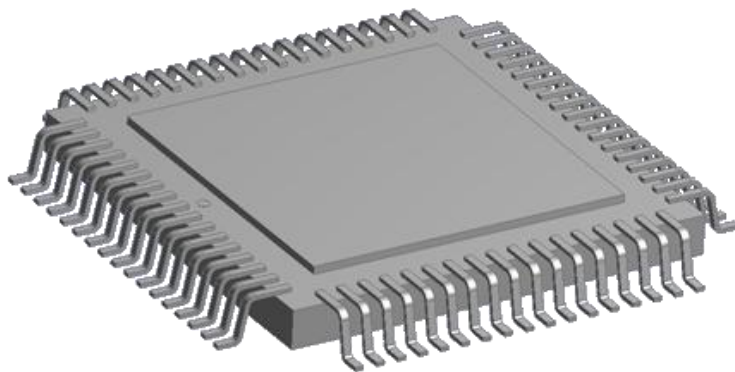


Рис. 8 Геометрия ЭРИ для МА нижнего уровня

Табл. 1 Расчетные характеристики образца РЭА.

Вид анализа	Минимальный запас прочности ($\sigma_{\text{крит}} / \sigma_{\text{экв}}$)
Статический	6.5
Гармонический	5.8
ШСВ	1.5
Ударный	1.9
Модальный	Первый резонанс на частоте 328 Гц.

Табл. 2 Расчетные характеристики ЭРИ.

Вид анализа	Запас прочности ($\sigma_{\text{крит}} / \sigma_{\text{экв}}$)	Количество циклов нагружения
Гибкие выводы	1.6	$3.59 \cdot 10^8$
Припой	10.4	$1.02 \cdot 10^6$
Клей	111,2	–
Корпус	10	–

Проведенные тестовые расчеты позволили оценить затраты вычислительных ресурсов и времени на настройку и проведение комплексного МА образца РЭА (таблицы 3 и 4). Приведены сведения для вычислительной системы на базе процессора Intel Core i7 950 с тактовой частотой 3.06 ГГц.

Табл. 3 Затраты вычислительных ресурсов и времени на проведение МА образца РЭА

Вид операции	ОЗУ, Мб	Время, с.
Статический МА верхнего уровня	1520	47
Статический МА нижнего уровня	1368	275
Гармонический анализ (диапазон 5 - 2000 Гц)	626	89
Анализ ШСВ	1018	668
Ударный анализ	1023	102
Модальный анализ (диапазон 5 - 2000 Гц)	1693	961

Табл. 4 Затраты вычислительных ресурсов и времени на настройку МА образца РЭА

Вид операции	Время, с.
Перестроение КЭМ прибора	<300
Перенос ГУ из МА верхнего уровня	<30
Обработка геометрии и построение массовой КЭМ ЭРИ	<30
Обработка геометрии и построение плоской КЭМ ЭРИ	<30
Обработка геометрии и построение подробной КЭМ ЭРИ	от 600 до 1800

Результаты тестового моделирования образца РЭА подтвердили высокую эффективность разработанной методики проведения двухуровневого МА. В условиях наличия в БД расчетного комплекса КЭМ-шаблонов для всех типовых конструктивных элементов РЭА, импорт компоновочной схемы, настройка и запуск расчета занимают не более 10-15 минут. Подготовка задачи повторного расчета образца РЭА с измененной схематикой электронных модулей занимает не более 5 минут.

Суммарное время расчета полного комплекса параметров прибора зависит как от сложности математической модели (количества и сложности составных частей, параметров сеточного разбиения), так и от параметров быстродействия жесткого диска. Для рассмотренного конструктива прибора минимально необходимый объем результатов занял порядка 14 Гб пространства на жестком диске, что добавляет от 10 до 15 минут рабочего времени на запись и обработку информации.

На основе результатов практического применения методики двухуровневого МА в моделировании образца РЭА сделан вывод, что предлагаемая математическая модель и разработанный комплекс программных средств соответствуют ожидаемым показателям точности расчета, экономии времени и автоматизации типовых процедур МА на различных стадиях проектирования и НЭО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлены постановка и решение краевых задач для прогноза поведения бортовой РЭА космических аппаратов при механических воздействиях различных видов: статическая нагрузка и динамические нагрузки в виде гармонической и широкополосной случайной вибрации, а также ударного воздействия. Поскольку комплексное решение поставленных задач не позволяет провести прямое аналитическое исследование, предложена математическая модель РЭА, адаптированная для численного решения методом конечных элементов.

На основе метода конечных элементов решения задач деформирования твердого тела разработана методика двухуровневого анализа, заключающаяся в выделении анализа базовой и коммутационной несущих конструкций в подзадачу верхнего уровня, а анализа электрорадиоизделий – в подзадачу нижнего уровня. В рамках обеспечения эффективности и точности расчета разработаны:

- критерии эффективного упрощения геометрических моделей для задач верхнего уровня, и методика уточнения геометрических моделей для задач нижнего уровня;
- критерии необходимости решения задач нижнего уровня, исходя из результатов решения задачи верхнего уровня;
- методика переноса граничных условий из результатов решения задачи верхнего уровня в постановку задач нижнего уровня;
- дополнения к типовым методикам планирования и проведения экспериментальной отработки РЭА, а также методика использования экспериментальных данных для верификации и адаптации математической модели испытуемого образца;
- алгоритмы автоматизации подготовки расчетной модели, проведения расчета и интерпретации результатов;
- структура базы данных, предназначенной для хранения необходимой информации о компоновке изделий, свойствах материалов и критериях их разрушения, а также о конечно-элементных и геометрических моделях конструктивных элементов РЭА.

Разработанные методики и алгоритмы реализованы в виде комплекса программных средств, включающих в себя:

- базу данных;
- графическую оболочку интерфейса пользователя;
- функциональные программные модули;
- комплекс скриптов (пакетных командных файлов) для CAD/CAE-систем.

Разработанная математическая модель, методика проведения МА и программные средства позволили добиться высоких показателей эффективности при тестовом моделировании образца РЭА, что говорит о возможности их успешного использования при создании новых приборов для ракетно-космической отрасли.

Перспективным направлением дальнейшего развития предложенной методики многоуровневого МА РЭА является ее распространение на анализ конструкций более высокого уровня (например, приборный отсек или КА в целом), а также на задачи более низкого уровня (например, анализ механической надежности ЭРИ типа «система-на-кристалле» с известной топологией).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, в журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. Бовсуновский А.Б., Бутов В.Г., Хвалько А.А. Комбинированная схема эффективного механического анализа бортовой радиоаппаратуры космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 7/2. С. 44-46. – 0.24/0.08 п.л.
2. Ящук А.А., Бовсуновский А.Б., Хвалько А.А. Особенности задания граничных условий локального механического анализа элементов бортовой радиоаппаратуры космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 9/3. С.143-145. – 0.2/0.07 п.л.
3. Бовсуновский А.Б., Бутов В.Г., Хвалько А.А. Архитектура интегрированной системы для проведения механического анализа бортовой радиоаппаратуры космических аппаратов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 4. С. 23-28. – 0.38/0.12 п.л.
4. Бовсуновский А.Б., Ящук А.А., Хвалько А.А. База данных интегрированной системы для проведения механического анализа бортовой радиоаппаратуры космических аппаратов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 4. С. 29-33. – 0.37/0.12 п.л.

Статьи, опубликованные в других научных изданиях:

1. Бовсуновский А.Б., Ящук А.А. Интегрированная система автоматизации механического анализа бортовой радиоаппаратуры КА // Решетневские

чтения: материалы XV Международной научной конференции: в 2 ч.; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2011.– Ч. 2. – С. 437-438. – 0.17/0.09 п.л.

2. Бовсуновский А.Б., Бутов В.Г., Васенина Т.В. и др. Общая база данных интегрированной многоуровневой системы получения проектных оценок космических аппаратов // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: доклады конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та. 2004. – С. 341-342. – 0.18/0.04 п.л.

Авторское свидетельство:

1. Свидетельство № 2013620445 о регистрации базы данных. База данных элементов расчетной модели для проведения механического анализа бортовой радиоаппаратуры космических аппаратов. / А.Б. Бовсуновский, А.А. Ящук, А.В. Никульчиков; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет». – Опубл. 20.06.2013, Бюл. № 2.

THE SUMMARY

Alexander Bovsunovsky

Mechanical analyses of the spacecraft onboard electronic equipment design.

Specialty: 01.02.04 – Mechanics of deformable solid body.

The purpose of work is to create the mathematical model of the spacecraft onboard electronic equipment and the effective method of calculation, which are applicable at different stages of manufacturing process and enable one to obtain the required mechanical characteristics of deformed structures for all assembled elements (including chassis, PCBs and electronic components). This model and method must provide the sufficient accuracy of the results and be capable of running on the workstation-class computation equipment.

In order to achieve the main goals the following tasks need to be accomplished:

- to analyze the typical processes of design end experimental development and formulate the common requirements for mathematical simulation models;
- to find the effective ways to reduce the demands on computation equipment resources and create the corresponded calculation algorithms;
- to design the structure of data base which holds all the necessary information for mechanical analyses tasks;
- to create the software which automates the solution of mechanical analyses tasks.

The best results are obtained by splitting the main analyses task on two levels: one top-level task for chassis and PCBs with the simplified component models, and multiple bottom-level tasks for certain component models. Bottom-level tasks use the results of the top-level one as the boundary and load conditions. Such calculation technique allows to solve the bottom-level tasks only for the most deformed components and save much time by skipping other ones.

The best solution for the software architecture, which can manage all the required tasks, is the pre/post processing wrapper for some CAE solver. As an example, the ANSYS solver and its batch-mode capabilities are used. The testing analyses task for the typical spacecraft onboard electronic device shows the effectiveness of the described model and method, the high level of automation and results accuracy in comparison with the experimental data.