На правах рукописи



Хвалько Александр Александрович

АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УНИФИЦИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПУТНИКОВЫХ ПЛАТФОРМ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата *физико-математических* наук

Томск 2011

Работа выполнена на кафедре прикладной аэромеханики ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

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

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук,
профессор Макаров Павел Васильевич

доктор технических наук,
профессор Шатров Александр Константинович

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие Научно-производственное объединение имени С.А.Лавочкина

Защита состоится 23 декабря 2011 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, корп. 10, ауд. 239.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского государственного университета.

E-mail автора: aahvalko@mail.ru

Автореферат разослан "____" ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук _____ Ю.Ф.Христенко

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Актуальность - Конструкция бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов (КА) представляет собой объект со сложными характеристиками. Моделирование напряженно деформированного состояния (НДС) таких объектов при механических воздействиях, возникающих во время транспортировки, выведения на орбиту и эксплуатация на ней приводит к необходимости проведения долгосрочных и трудоемких расчетов.

Современные CAD/CAE-системы оперируют с моделями, которые часто плохо интегрируются между собой по причине использования разных типов геометрических параметров. В настоящее время не существует общей унифицированной модели, которая бы содержала в себе информацию, как для проектирования, так и для расчета. Поэтому процесс создания конечно-элементной модели с использованием CAD/CAE-систем до сих пор является сложной задачей, не имеющей стандартных способов решения и требующей серьезной квалификации и значительных временных затрат.

Эти обстоятельства, а также существующая в настоящее время тенденция стремительного применения моделирования в авиационной и космической технике, привела к значительному усилению интереса к перспективным направлениям в механике сплошной среды. В частности, к исследованиям в области оптимального проектирования, смысл которого – достижение значительного улучшения эксплуатационных характеристик изделия, а также снижение временных затрат при его разработке, испытаниях и изготовлении за счет использования средств современного инженерного анализа и разработки.

Реализация принципов оптимального проектирования заключается в разработке и использовании специализированных программных средств, автоматизирующих процесс создания численных моделей и позволяющих задействовать математическое ядро универсальной CAE-системы посредством адаптированных графических интерфейсов.

Решением задачи моделирования механических процессов в конструкциях приборов и систем занимались такие специалисты как Маквецов Е.Н., Тартаковский А.М., Кофанов Ю.Н., Кожевников А.М., Крищук В.Н., Шалумов А.С., Фадеев О.А. и др.

Однако в этих исследованиях не рассматривались вопросы создания численных моделей унифицированных конструкций бортовой РЭА КА и повышения эффективности проведения МА.

Таким образом, **актуальными** являются разработка оптимизированных численных моделей унифицированных конструкций бортовой РЭА КА для моделирования НДС при механических воздействиях, верификация этих моделей и разработка средств компьютерного моделирования, автоматизирующих процесс проведения МА с использованием вычислительных возможностей конструкторского подразделения.

Цель работы – Разработка численной модели унифицированной конструкции бортовой РЭА для исследований ее НДС, выявления закономерностей процесса деформирования, определение областей недопустимых деформаций при механических воздействиях средствами оптимального проектирования. А также разработка средств моделирования, проведение экспериментальных исследований и интерпретация полученных данных на предмет изучения деформирования.

В рамках сформулированной цели работы определяются следующие задачи:

1. Разработка оптимизированной численной модели унифицированной конструкции бортовой РЭА для моделирования НДС при механических воздействиях;
2. Изучение принципов построения численной модели на основе анализа общих закономерностей процесса деформирования унифицированной конструкции бортовой РЭА;
3. Разработка алгоритмов автоматизированного построения численных моделей унифицированных конструкций бортовой РЭА, проведения расчета и анализа полученных результатов;
4. Разработка базы данных, предназначенной для хранения всей необходимой информации в обеспечение построения численных моделей унифицированных конструкций бортовой РЭА, проведения расчета и анализа полученных результатов;
5. Разработка программы моделирования НДС унифицированных конструкций бортовой РЭА при механических воздействиях;
6. Верификация результатов моделирования НДС унифицированных конструкций бортовой РЭА с экспериментальными данными.

Методика исследования - при выполнении диссертационной работы применялись методы механики деформируемого твердого тела и математического моделирования, численные методы, а также методы экспериментального исследования процессов деформирования твердых тел, а именно верификация эмпирических и теоретических результатов

исследований. Экспериментальные исследования проведены на современном испытательном оборудовании с использованием электродинамических стендов и цифровой многоканальной аппаратуры формирования и анализа случайных нестационарных процессов.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Разработана и на основе экспериментальных данных оптимизирована новая модель оболочечно-балочных конструкций на базе нестационарной линейной системы уравнений механики сплошных сред, позволяющая получить характеристику напряженно-деформационного поля для заданных уровней механических воздействий, характерных для унифицированных конструкций бортовой РЭА на этапе выведения КА на околоземную орбиту;
2. Предложена физическая модель воспроизводящая структуру, основные свойства и соотношения изучаемых элементов унифицированной конструкции бортовой РЭА при механических воздействиях, характерных для этапа выведения КА на околоземную орбиту;
3. Предложены принципы создания оптимизированной модели оболочечно-балочной конструкции на основе общих закономерностей процесса деформирования унифицированной конструкции бортовой РЭА;
4. Разработан новый алгоритм автоматизированного построения численной модели унифицированной конструкции бортовой РЭА на основе оптимизированной оболочечно-балочной конструкции;
5. Разработаны средства моделирования НДС унифицированных конструкций бортовой РЭА при механических воздействиях характерных для этапа выведения КА на околоземную орбиту.

Теоретическая ценность - на основе нестационарной линейной системы уравнений механики сплошных сред разработана и оптимизирована новая численная модель оболочечно-балочного представления унифицированных конструкций бортовой РЭА перспективных спутниковых платформ, для моделирования НДС при механических воздействиях характерных для этапа выведения КА на околоземную орбиту.

Практическая ценность - разработанная численная модель позволяет более точно прогнозировать механическое поведение унифицированных конструкций бортовой РЭА, а значит повысить качество и оперативность проектных работ и получить более высокие

соотношения габаритно-массовых и прочностных характеристик. Разработанный алгоритм автоматизированного построения численной модели позволяет создавать модели наиболее соответствующие реальным конструкциям в более сжатые сроки, что дает возможность достичь лучших показателей по времени разработки и наибольшей точности в моделировании.

Внедрение результатов работы - практическая проверка основных положений и результатов диссертационной работы осуществлена в процессе проектирования реальных изделий в Открытом акционерном обществе "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнева" – одной из ведущих фирм в России производящей КА различного назначения. В частности, разработанная модель и средства моделирования использованы при проведении МА унифицированных конструкций бортовой РЭА перспективных спутниковых платформ тяжелого класса – "Экспресс-2000" и семейства платформ легкого и среднего классов – "Экспресс-1000". Стоит отметить, что на основе платформы "Экспресс-1000Н" изготовлен и в начале 2011 г. выведен на орбиту навигационный КА нового поколения "ГЛОНАС-К". На основе платформ легкого и среднего классов в настоящее время ведется изготовление таких КА как "Луч-5А", "Луч-5Б", "Ямал-300К", "Amos-5", "Telkom-3". На основе платформ тяжелого класса ведется изготовление КА "Луч-4", "Экспресс-АМ5", "Экспресс-АМ6". Разработанные средства оптимизированного проектирования были использованы для выполнения МА унифицированных электронных модулей в опытно-конструкторских работах (ОКР), выполняемых в рамках:

- Постановления Правительства РФ от 29.12.2008 №1036-55;
- Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

На защиту выносятся:

1. Модель оболочечно-балочного представления унифицированных конструкций бортовой РЭА, разработанная на базе нестационарной линейной системы уравнений механики сплошных сред, позволяющая получать характеристику напряженно-деформационного поля при механических воздействиях, характерных для этапа выведения КА на околоземную орбиту;
2. Физическая модель, воспроизводящая структуру, основные свойства и соотношения изучаемых элементов унифицированной конструкции бортовой РЭА при механических воздействиях, характерных для этапа выведения КА на околоземную орбиту;

3. Принципы создания оптимизированной численной модели унифицированной конструкции бортовой РЭА на основе ее оболочечно-балочного представления и общих закономерностей процесса деформирования;

4. Алгоритм автоматизированного построения численной модели унифицированной конструкции бортовой РЭА на основе оптимизированной оболочечно-балочной конструкции;

5. Средства моделирования НДС унифицированных конструкций бортовой РЭА при механических воздействиях характерных для этапа выведения КА на околоземную орбиту, а именно: алгоритмы, графический интерфейс пользователя, БД.

Достоверность полученных результатов следует из адекватности используемых физических и математических моделей, что подтверждается сравнением с точными решениями упрощенных задач механического анализа и результатами проведенных механических испытаний.

Апробация – Материалы диссертации отражены в 11 научных работах, включая 9 опубликованных работ, 1 статью в издании, рекомендуемом ВАК, 1 патент и др.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. XII Международной научной конференции "Решетневские чтения" (г. Железногорск, ОАО "ИСС", 2008);
2. XIII Международной научной конференции "Решетневские чтения" (г. Железногорск, ОАО "ИСС", 2009);
3. Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов с международным участием "Современные проблемы радиоэлектроники" (г. Красноярск, СФУ, 2009);
4. XVII Научно-технической конференции "Электронные и электромеханические системы и устройства" (г.Томск, ОАО "НПЦ "Полюс", 2010)
5. XIV Международной научной конференции "Решетневские чтения" (г. Железногорск, ОАО "ИСС", 2010);
6. IV Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий" (г. Москва, ОАО "РКС", 2011).

Публикации - по материалам исследования получен 1 патент, опубликованы 10 работ, в том числе 1 в рецензируемом журнале. Кроме того 2 работы приняты в печать в рецензируемый журнал.

Структура и объем работы. Настоящая диссертационная работа состоит из введения, основного текста, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст разбит на 3 главы и содержит 9 таблиц и 52 рисунка. Список литературы включает 77 наименований. Общий объем работы – 123 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассматриваются общие вопросы моделирования НДС унифицированных конструкций бортовой РЭА перспективных спутниковых платформ при механических воздействиях.

Обозначена актуальность внутривидовой и межвидовой унификации и стандартизации в сочетании с базовыми блочно-модульными принципами конструирования. В качестве примеров, реализующих эти принципы, рассмотрены спутниковая платформа и 19 дюймовые механические конструктивы для электронного оборудования (МЭК 297 и МЭК 917). Показана зависимость уровней и характера механических воздействий на аппаратуру от того, в каком месте платформы она установлена.

Проанализирован процесс наземной экспериментальной отработки (НЭО) бортовой РЭА. Определены виды механических воздействий характерные для данного класса аппаратуры, а именно: вибрационные и ударные воздействия. Описан процесс определения уровней вибрационных воздействий при НЭО и представлены их численные значения.

Рассмотрены средства автоматизированного проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств, среди них: зарубежные CAE-системы NASTRAN, ANSYS, ABACUS и отечественная автоматизированная система АСОНИКА, реализующая принципы CALS-технологии. Проанализированы подсистемы АСОНИКА-М и АСОНИКА-ТМ предназначенные для автоматизации процесса моделирования механических процессов неамортизированных конструкций РЭА и печатных узлов, соответственно. Выявлено, что "тяжелые" CAE-системы идеально подходят для решения большинства инженерных задач, однако, из-за неприемлемого времени разработки проекта они не могут быть полноценно встроены в рабочий процесс конструкторского подразделения. Система АСОНИКА больше адаптирована к задачам комплексного исследования характеристик аппаратуры общего назначения, нежели к частным задачам механического анализа бортовой РЭА КА.

При рассмотрении общих вопросов метода конечных элементов показан переход от дифференциальных уравнений в частных производных или интегральных уравнений к системам алгебраических либо обыкновенных дифференциальных уравнений посредством аппроксимации сплошной среды некой дискретной моделью. В таком

случае приходится иметь дело с решением задач, сводящихся к уравнениям вида:

$$P(u) = f\,, \qquad (1)$$

где: $u = u(x)$ – элемент некоторого нормированного линейного пространства U, в общем случае состоящего из функций, заданных в некоторой открытой области R k-мерного евклидова пространства и на ее границе ∂R; $f = f(x)$ – элемент другого нормированного пространства V (часто V=U) и P:U→V – оператор из U в V.

Представлены основные шаги, предполагаемые методом конечных элементов, по созданию кусочно-непрерывной аппроксимации $\bar{u}$ функции u на всей области ее определения. Также рассмотрено построение дискретной области R и дискретной модели произвольной функции F. Кроме того, рассмотрены оболочечные и балочные конечные элементы.

Деформированное состояние за счет действия мембранных сил однозначно описывается перемещениями u и v каждой узловой точки i. Деформированное состояние, вызванное изгибом, однозначно определяется узловым смещением w перпендикулярно плоскости элемента и углами поворотов θ_x и θ_y. Объединяя уравнения, описывающие эти состояния и переходя к глобальной системе координат, полная система узловых сил оболочечного элемента запишется:

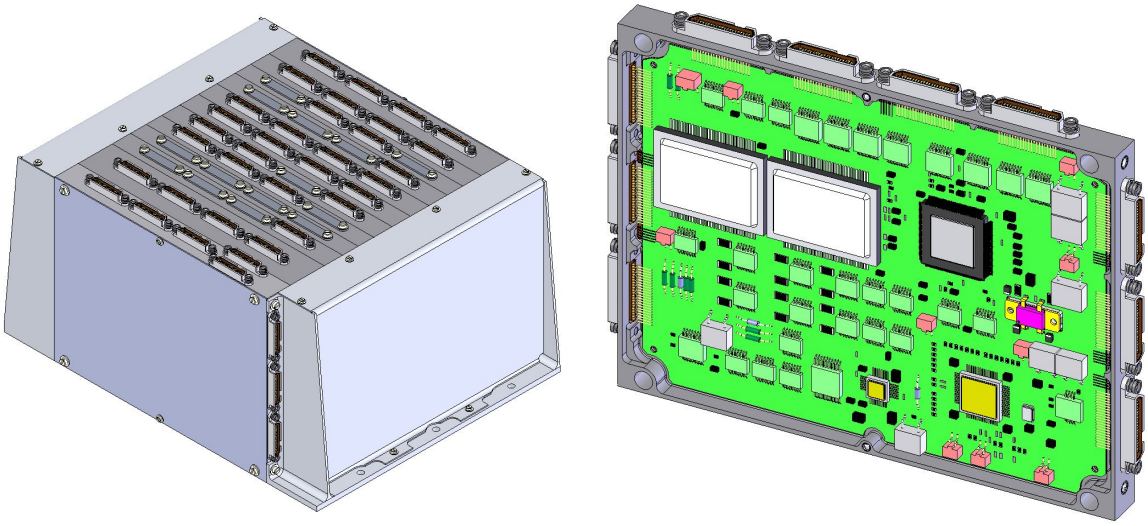
$$\{\delta'\}^e = [T]\{\delta\}^e,\ \{F'\}^e = [T]\{F\}^e, \qquad (2)$$

После получения матриц жесткости всех оболочечных элементов в глобальной системе координат, эти матрицы обычным образом встраиваются в общую матрицу жесткости.

Как и для случая оболочек, для балок комбинируются взаимно независимые уравнения, описывающие растяжение и изгиб. Матрицу жесткости для уравнения $\{F\} = [k]\{\delta\}$ можно получить, используя теорию балок Тимошенко. В данном контексте матрица жесткости, учитывает осевые, сдвиговые и изгибающие нагрузки.

В рамках представления модели механического поведения унифицированной конструкции бортовой РЭА подробно рассмотрены ее конструктивные элементы. Аппаратура представляет собой блок, изображенный на рисунке 1.1а, состоящий из набора модулей необходимой функциональности, механических соединителей (кронштейны, втулки и пр.), крышек и электрических соединителей. В

состав модуля, изображенного на рисунке 1.1б, входят: рамка; коммутационные несущие конструкции (КНК); ЭРИ и прочие компоненты. Конфигурация бортовой РЭА определена рядом требований по обеспечению минимальной длины электрической коммутации, оптимальных режимов функционирования и применения автоматизированных методов проектирования.



а) **б)**

Рисунок 1.1 – Внешний вид унифицированной конструкции бортовой РЭА КА (а) и модуля (б) ОАО "ИСС"

Для построения численной модели, физико-механические параметры которой максимально были бы приближены к соответствующим параметрам экспериментальной модели, приходится вносить некоторые упрощения. В данной работе, выделяются два основных направления в упрощении унифицированных конструкций бортовой РЭА. Первое – понижение размерности задачи. Второе направление – отбрасывание несущественных деталей. Упрощая конструкцию, следует соответствующим образом сохранять жесткость элементов рамки, а именно, при воздействии динамических нагрузок на модуль, у ребер наиболее вероятны крутильные колебания, а форма колебаний пластины определяется условиями закрепления ее сторон.

В общем случае механическое поведение унифицированных конструкций бортовой РЭА описывается нестационарной линейной системой уравнений механики сплошных сред. В декартовой системе координат рассматривается область пространства Ω, занимаемая конструкцией. В каждой подобласти ω_m определены физико-механические свойства материала. Зная это, можно записать систему уравнений компонент тензора деформации, связанного с ним тензора напряжений и уравнение баланса сил, приложенных к элементарному

объему. Дополним эту систему начальными и граничными условиями, применим метод Галеркина и формулу Остроградского-Гаусса получим полную систему уравнений:

$$[M]\{\ddot{U}\}+[C]\{\dot{U}\}+[K]\{U\}=\{B\}, \qquad (3)$$

где $[M]$, $[C]$, $[K]$, $\{U\}$, $\{B\}$ – полные матрицы масс демпфирования и жесткости, вектор узловых перемещений и вектор правых частей.

Постановка задачи заключается в описании унифицированной конструкции бортовой РЭА перспективных спутниковых платформ линейной системой уравнений механики сплошных сред. При этом материалы всех элементов конструкции предполагаются изотропными и линейными. Далее, в соответствии с общей математической моделью механического поведения система уравнений дополняется граничными условиями. После чего, задача решается методом конечных элементов.

Унифицированная конструкция бортовой РЭА состоит из набора определенного числа однотипных модулей. Следовательно, создание ее модели сводится к созданию КЭМ одного модуля (рисунок 1.2б) и последующего соединения определенного их количества между собой. Ребра в модели рамки и выводы разъемов строятся на основе балочного элемента BEAM188. Основание рамки строится на основе многослойного оболочечного элемента SHELL181. Наличие ЭРИ на КНК учитывалось введением дополнительной массы в соответствующих узлах КЭ.

Основными критериями представления ребер рамки балочными элементами является необходимость учета как растяжения/сжатия, так и изгиба, а также подходящее для применения балок соотношение параметров модуля сдвига для материала (G), площади сечения (A), характерной длины (L), модуля упругости (E) и момента инерции (I) модели: G*A*L2/(E*I) > 30.

Основным критерием выбора оболочечных элементов для моделирования основания рамки, является подходящее для применения оболочек соотношение толщины (h) и характерной длины (L) модели: h/L<0.1.

Основным критерием при определении геометрических размеров ребер рамки в численной модели, является совпадение моментов инерции соответствующих сечений в подробной и упрощенной моделях.

Основным критерием адекватности созданной численной модели, является совпадение собственных частот численной модели с резонансными частотами аналогичной физической модели.

Во второй главе рассматривается разработанные средства моделирования НДС унифицированных конструкций бортовой РЭА перспективных спутниковых платформ при механических воздействиях. В частности рассмотрены разработанные аппаратно-программный комплекс (АПК), общая структура БД, графический интерфейс пользователя и алгоритмы автоматизированного создания численных моделей. Средства моделирования НДС предназначены для проведения МА аппаратуры используя вычислительные возможности конструкторского подразделения ОАО "ИСС".

АПК состоит из программного модуля (ПМ), CAE-системы "ANSYS", аппаратной части и позволяет проводить поиск собственных частот унифицированных конструкций бортовой РЭА, а также реализует МА на линейные ускорения, вибрационные (гармоническую и широкополосную случайную вибрацию) и ударные воздействия. Кроме того комплекс позволяет задавать контрольные узлы в КЭМ прибора и получать в данных точках значения абсолютных и относительных ускорений, прогибов, перемещений и напряжений. Результаты моделирования могут быть представлены в виде амплитудно-частотных характеристик или амплитудно-временных характеристик, полей механических характеристик при заданном значении частоты и деформации.

ПМ реализован на языке Visual C++ v.8.0. Отдельные его части написаны на языке APDL (ANSYS Parametric Design Language - встроенный алгоритмический язык программирования). ПМ имеет следующую логическую структуру: графический интерфейс пользователя; модуль построения конечно-элементных моделей; модуль анализа результатов.

Графический интерфейс пользователя предназначен для выполнения основных операций при проведении МА. Интерфейс реализован с использованием библиотек OpenCASCADE версии 6.2 и библиотек Qt версии 4.5.0. Рабочее поле представляет собой четыре функциональных окна:

– главное окно, содержит основное меню, средства трехмерного отображения прибора и координирует работу всех остальных окон;

– окно "Менеджер БД", отображает и обеспечивает работу с деревом компоновки конструкций бортовой РЭА, позволяет производить операции изменения, выделения, удаления, копирования и создания новых конструктивных элементов;

– окно "Параметры узла", отображает точку вставки и углы поворотов конструктивных элементов, в режиме редактирования позволяет изменять эти параметры;

– окно "Свойства", отображает свойства текущего выбранного в окне "Менеджер БД" конструктивного элемента и позволяет их изменять.

Модуль построения предназначен для построения КЭМ унифицированных конструкций бортовой РЭА и реализован в виде набора программ на языке APDL.

Модуль анализа результатов предназначен для сравнения расчетных уровней нагрузок на ЭРИ с предельно допустимыми значениями, заданными для них.

База данных реляционного типа предназначена для хранения всей необходимой информации в обеспечение построения численных моделей бортовой РЭА, проведения расчета и анализа полученных результатов. Она состоит из служебных таблиц (описания таблиц данных, описания типов данных, описания полей данных и т.д.), описывающих содержимое таблиц данных (приборов, модулей, материалов, кронштейнов, компоновки, нагружений, расчетов, ЭРИ и т.д.) и связи в них. Управление БД осуществляется Microsoft Access, доступ через ODBC. В общем случае таблица разрабатываемого проекта с помощью ПМ имеет структуру "лес". Например, схема компоновки состоит из отдельных "деревьев", соответствующих анализируемым приборам. Таким образом, вершиной "дерева" является прибор – конструктивный элемент, ссылающийся на строку с описанием в таблице модулей. Каждой строке в таблице модулей должна соответствовать одна запись в схеме компоновки и т.д.

Разработаны алгоритмы автоматизированного построения численных моделей унифицированных конструкций бортовой РЭА, проведения расчета и анализа полученных результатов, а именно:

– алгоритм автоматизированного создания численной модели коммутационной несущей конструкции на основе данных из CAD-систем;

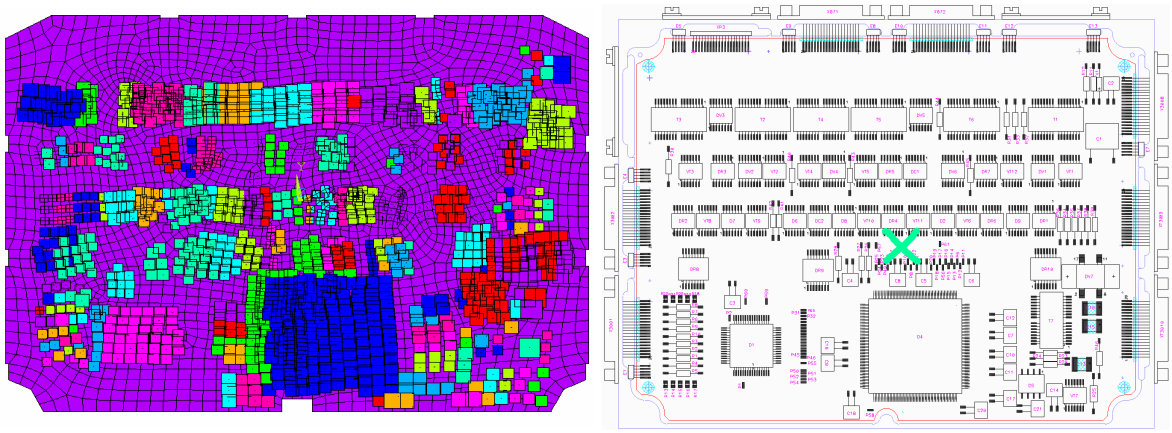
– алгоритм автоматизированного размещения имитаторов ЭРИ в конечно-элементной модели модуля;

– алгоритм задания необходимой информации для обеспечения проведения механического анализа.

Используя доступную информацию об ЭРИ, КНК, БНК содержащуюся в системах автоматизированного проектирования разработаны и интегрированы в ПМ программные средства, реализующие специализированные алгоритмы импорта/экспорта и преобразования необходимой данных. В результате удалось

автоматизировать процесс построения численной модели КНК, размещения имитаторов ЭРИ в конечно-элементной модели модуля и задания необходимой информации для обеспечения проведения МА.

В процессе создания средств автоматизированного размещения имитаторов ЭРИ в КЭМ модуля был получен патент на изобретение "Способ автоматического построения трехмерных геометрических моделей электрорадиоизделий в системе геометрического моделирования". На рисунке 2.1 представлен результат работы данного алгоритма.

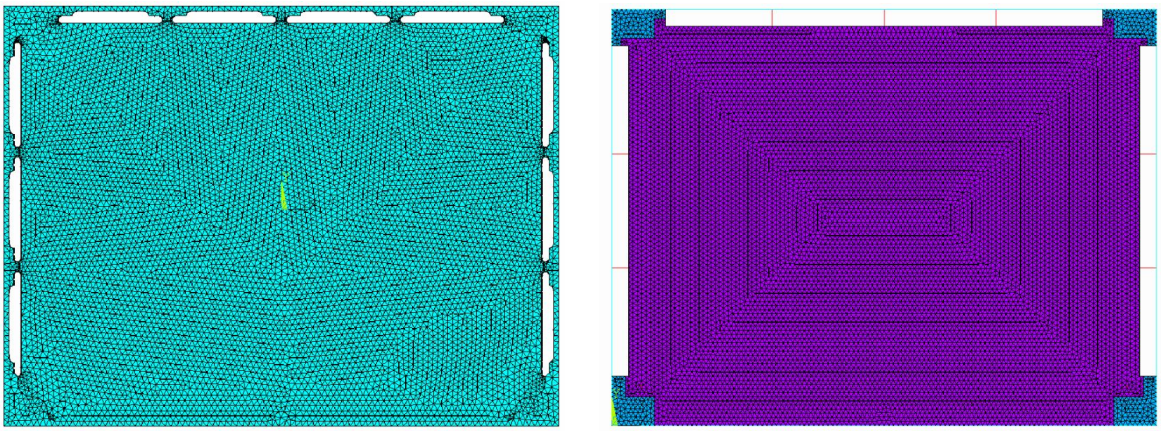


а) **б)**

Рисунок 2.1 – Результат работы алгоритма автоматизированного размещения имитаторов ЭРИ в КЭМ модуля (а) на основе данных из CAD-системы (б)

В третей главе рассмотрены оптимизация, синтез и верификация КЭМ унифицированной конструкции бортовой РЭА перспективных спутниковых платформ.

В рамках оптимизации КЭМ были проведены механические испытания рамки модуля, а также проведен МА ее подробной (КЭ – 100 000) и упрощенной (КЭ – 20 000) моделей, внешний вид которых представлен на рисунке 3.1. По результатам испытаний и расчетов была проанализирована зависимость изменения относительной погрешности, при определении собственных частот, от количества КЭ используемых при моделировании подробной (рисунок 3.2) и упрощенной (рисунок 3.3) моделей. При относительно небольшом количестве КЭ погрешность сохраняет существующий уровень. При их количестве более 100 000 для подробной модели и более 20 000 для упрощенной модели относительная погрешность начинает резко уменьшаться. Очевидно, что эти числа являются тем предельным значением, до которого можно понижать количество КЭ для исследуемых подробной и упрощенной моделей.



а) **б)**

Рисунок 3.1 – Внешний вид подробной (а) и упрощенной (б) КЭМ модуля

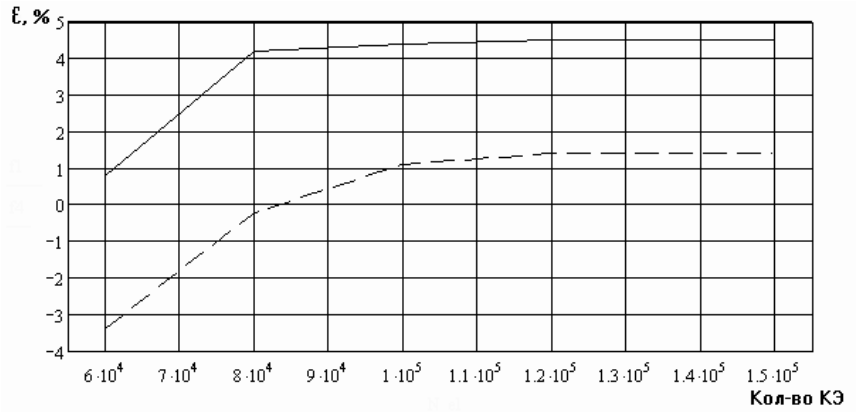


Рисунок 3.2 – Зависимость изменения погрешности определения собственных частот от количества КЭ, используемых при моделировании подробной модели (1-я собственная частота - сплошная, 4-я собственная частота - пунктир)

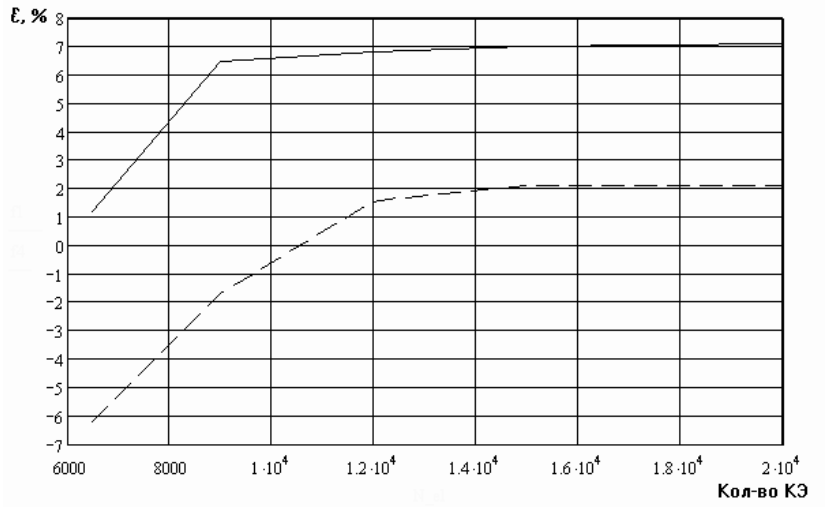


Рисунок 3.3 – Зависимость изменения погрешности определения собственных частот от количества КЭ, используемых при моделировании упрощенной модели (1-я собственная частота - сплошная, 4-я собственная частота - пунктир)

После сравнения погрешностей определения собственных частот были проведены аналогичные расчеты в диапазоне от 0 Гц до 1500 Гц для упрощенных моделей с числом КЭ – 20 000 и 44 000. Сравнение графиков результатов расчетов собственных частот показывает, что более грубая модель также дает удовлетворительные результаты, погрешность не более 8 %. Наиболее заметные изменения наблюдаются для некоторых эффективных масс. Из представленных результатов можно заключить, что имеется качественное совпадение результатов расчетов и эксперимента.

Для проведения моделирования НДС унифицированных конструкций бортовой РЭА перспективных спутниковых платформ и внедрения результатов данной работы в производственный процесс была разработана методика синтеза численной модели и МА. С использованием разработанных графического интерфейса ПМ и БД, согласно конструктивному исполнению исследуемого прибора, а также требованиям, предъявляемым к нему, формируется проект, а именно: производится выбор конструктивного исполнения и количество конструктивных элементов, определяются физико-механические характеристики материалов, загружаются данные об ЭРИ, осуществляется проверка вводимых данных, определение видов расчета и генерация рабочих файлов. После чего необходимо с помощью интерфейса пакета программ ANSYS создать новый проект расчета и загрузить созданные рабочие файлы проекта прибора и расчета. В заключение, необходимо запустить сам расчет.

Для верификации конечно-элементной модели унифицированной конструкции бортовой РЭА и демонстрации разработанных средств моделирования НДС, выбран штатный прибор разработки ОАО "ИСС", изображенный на рисунке 3.4б. Данный прибор входит в состав перспективной спутниковой платформы "Экспресс-1000" и состоит из 18 унифицированных модулей (ДхШхВ ~ 455х370х270 мм, масса ~ до 20 кг).

Для вибрационных испытаний и поиска резонансных частот был использован вибростенд электродинамического типа ВЭДС-10000Т и цифровая многоканальная аппаратура формирования и анализа случайных нестационарных процессов. Испытания проведены в соответствии с требованиями нормативно-технической документации к механическим испытаниям бортовой РЭА КА, принятым в ОАО "ИСС".

Построение КЭМ исследуемого прибора (рисунок 3.4а) производилось с использованием разработанными ПМ и методикой синтеза. Исходя из специфики задачи и выбранного вида расчета в CAE-системе, считается, что модель ведет себя линейно, нелинейности игнорируются. Следовательно, заданные свойства материалов могут

быть линейными, изотропными или ортотропными, зависящими от температуры или термически стабильными.

Производилось сравнение результатов проведенных механических испытаний и механического анализа унифицированной конструкции бортовой РЭА перспективных спутниковых платформ. В частности, сравнивались зависимость ускорения от частоты при испытаниях на поиск резонансов конструкции (рисунки 3.4 и 3.5) и зависимость спектральной плотности ускорения от частоты при широкополосной случайной вибрации (3.6 и 3.7) в трех взаимно перпендикулярных осях. Погрешность определения резонансной частоты не превышает 5 %. Максимальные прогиб (0,46 мм) и напряжения (18 МПа), возникают при максимальном уровне нагрузок ШСВ по осям OY и OX, соответственно. Полученные максимальные значения не превышают предельных уровней характеристик применяемых конструктивных материалов. Исследование НДС унифицированной конструкции бортовой РЭА показало, что основными концентраторами напряжений являются места резкого изменения сечений (упрощенные оболочечно-балочные элементы, места стыковки элементов конструкции, крепления).

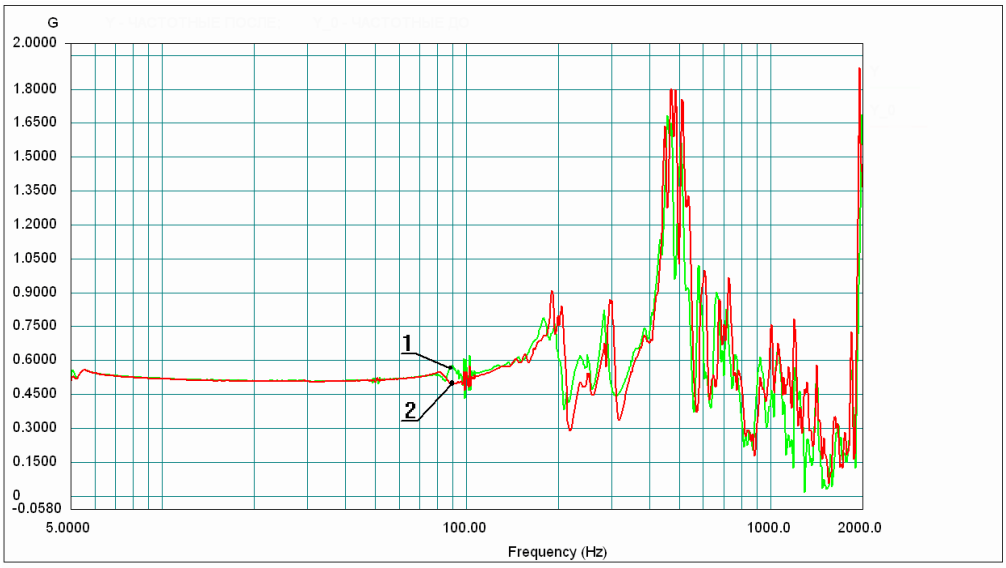


Рисунок 3.4 – Результаты экспериментального определения резонансных частот прибора (воздействие по оси OY 1 – до вибрации, 2 – после вибрации)

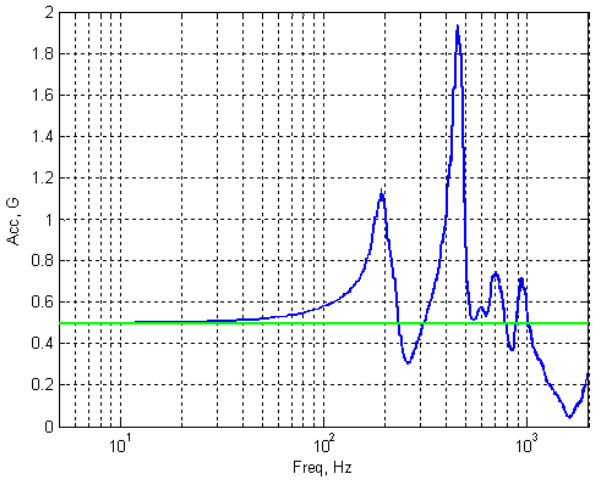


Рисунок 3.5 – Результаты расчета собственных частот КЭМ прибора (воздействие по оси OY)

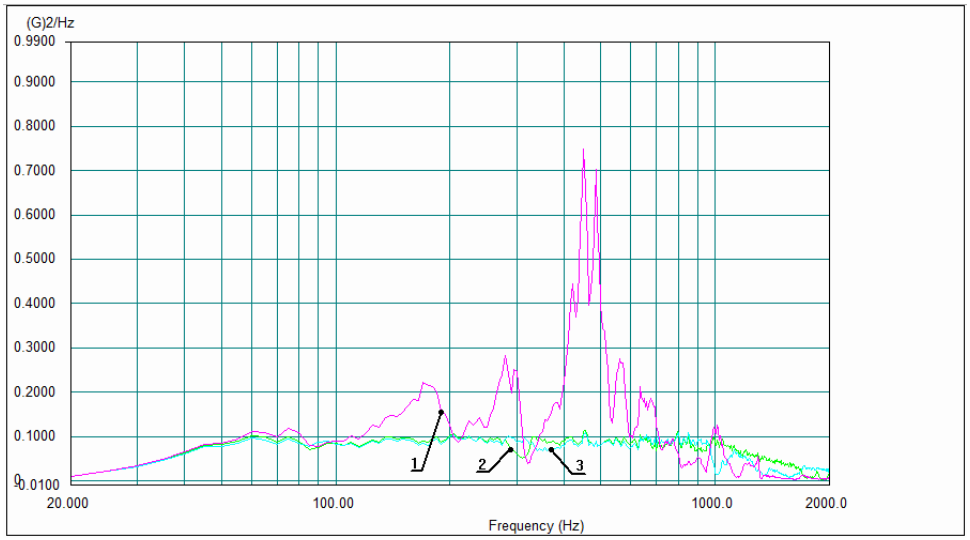


Рисунок 3.6 – Результаты испытаний на воздействие ШСВ (воздействие по оси OY 1 – измерительный датчик, 2 и 3 – контролирующие датчики)

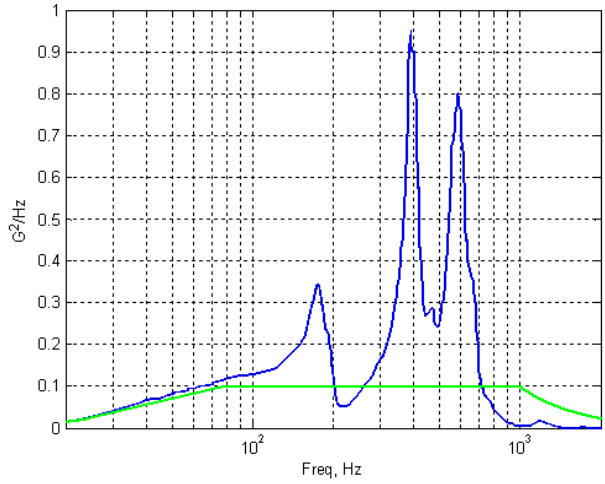


Рисунок 3.7 – Результаты расчета на воздействие ШСВ (воздействие по оси OY)

Анализ эффективности разработанных средств моделирования НДС показал, что для создания конструкции исследуемого прибора, состоящего из 18 модулей, в системе ANSYS пришлось затратить около 480 минут, а с использованием разработанного ПМ около 120 мин. Причем модель, созданная в CAE-системе, не учитывала наличие имитаторов ЭРИ в модулях.

Результаты, полученные в диссертационной работе внедрены в практику проектирования бортовой РЭА перспективных КА, а также использовались при выполнении опытно-конструкторских работ в ОАО "ИСС" за период 2009 - 2011г.г., что подтверждено соответствующим актом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главными результатами работы являются:

1. Предложены принципы создания оптимизированной численной модели унифицированной конструкции бортовой РЭА на основе установленных законов деформирования.

2. Представленная модель позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние унифицированных конструкций РЭА при механических воздействиях, характерных для этапа выведения КА на околоземную орбиту. При этом в модели отсутствуют конструктивные элементы не существенно влияющие на механическое поведение всей конструкции, что понижает ее размерность (оболочечно-балочное представление).

3. Для проверки адекватности механического поведения численной модели и аналогичной реальной конструкции обобщен опыт вибрационных испытаний и процессов деформирования твердых тел, что позволило провести верификацию эмпирических и теоретических результатов исследований.

4. При количестве конечных элементов в модуле 20 000, модель прибора учитывает наличие имитаторов ЭРИ, дает приемлемые результаты моделирования и хорошее сходство с экспериментальными данными (погрешность до 5 %).

5. Максимальные значения напряжений и прогиба, полученные в процессе исследований, не превышают значений 18 МПа и 0,446 мм, соответственно, что более чем в восемь раз меньше предела текучести материала используемого в данной конструкции (157 МПа).

6. Исследование унифицированной конструкции бортовой РЭА показало, что основными концентраторами напряжений являются места резкого изменения сечений (упрощенные оболочечно-балочные элементы, места стыковки элементов конструкции, крепления).

7. Разработаны специализированные алгоритмы, база данных и программные средства для автоматизации отдельных трудоемких процессов создания адекватных численных моделей и, как следствие, реализации принципов оптимального проектирования. Значительное сокращение времени, затраченного на моделирование напряженно-деформированного состояния, при проектировании унифицированных конструкций бортовой РЭА перспективных спутниковых платформ, подтвердило высокую эффективность разработанных средств. В ходе выполнения работы достигнуты все поставленные цели.

Разработанные средства моделирования напряженно-деформированного состояния используется конструкторским подразделением Открытого акционерного общества "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф.Решетнёва" при

конструировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры перспективных спутниковых платформ.

В заключении приношу благодарность и глубокую признательность моему научному руководителю д. ф.-м. н. Владимиру Григорьевичу Бутову за научное руководство в процессе работы над диссертацией.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Хвалько А.А., Бутов В.Г., Жуков А.П., Сунцов С.Б., Ящук А.А. Комплекс механического анализа бортовой аппаратуры и проблема адекватности конечно-элементных моделей. // **Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф.Решетнёва.** – 2010. – Т.3. – №29. – С. 76-81.

2. **Пат. 2413305** Российская Федерация, МПК J06T 17/00. Способ автоматического построения трехмерных геометрических моделей электрорадиоизделий в системе геометрического моделирования. / А.А. Хвалько, А.А. Ящук, А.В. Юткин, О.О. Болдырева. ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Информационные спутниковые системы" им. акад. М.Ф.Решетнёва". – опубл. 27.02.2011, Бюл. №6.

3. А.А.Хвалько, Е.А.Морозов Проблемы создания бортовой аппаратуры микро - и наноспутников. // Научно-техническая конференция молодых специалистов "Электронные и электромеханические системы и устройства". Труды конференции. 10-11 апреля 2008 г. Томск: ОАО "НПЦ "Полюс", Россия.

4. Хвалько А.А. Адаптация специализированного программного обеспечение для проведения механического анализа бортовой аппаратуры конструкторским подразделением. // Научно-техническая конференция молодых специалистов "Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем". Труды конференции. 9-11 октября 2008 г. Железногорск: ОАО "ИСС", Красноярский край, Россия.

5. В.Г. Бутов, А.А. Ящук, С.Б. Сунцов, А.А. Хвалько. Математическая модель и пакет программ механического анализа бортовой аппаратуры. // XII Международная научная конференция "Решетневские чтения". Труды конференции. 10-11 ноября 2008 г. Красноярск: СибГАУ, Россия.

6. Хвалько А.А., Бутов В.Г. Упрощение геометрических моделей бортовой аппаратуры космических аппаратов для обеспечения проведения механического анализа. // Современные проблемы радиоэлектроники / сб. науч. тр. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – С343-346.

7. Хвалько А.А., Юткин А.В. Внедрение информационных технологий для автоматизированного формирования математических моделей бортовой аппаратуры космических аппаратов. // XIII Международная научная конференция "Решетневские чтения". Труды конференции. 10-12 ноября 2009 г. Красноярск: СибГАУ, Россия.

8. Хвалько А.А., Сунцов С.Б., Карабан В.Н., Алексеев В.П. Моделирование и испытание плат на основе LTCC технологии для

бортовой аппаратуры космических аппаратов. // XVII Научно-технической конференции "Электронные и электромеханические системы и устройства". Труды конференции. 22-23 апреля 2010 г. Томск: ОАО "НПЦ "Полюс", Россия.

9. Хвалько А.А., Бутов В.Г., Сунцов С.Б., Ящук А.А. Комплекс механического анализа и проблема адекватности расчетных моделей бортовой РЭА. // XIV Международная научная конференция "Решетневские чтения". Труды конференции. 10-12 ноября 2010 г. – Красноярск: СибГАУ, Россия.

10. А.А.Хвалько, Е.А.Морозов, С.Б.Сунцов, В.Г.Бутов, С.В.Пономарев. Реализация проекта по созданию средств автоматизации проведения механического анализа и механических испытаний унифицированного ряда электронных модулей бортовой РЭА. // Научно-техническая конференция молодых специалистов "Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем". Труды конференции. 2-4 марта 2011 г. Железногорск: ОАО "ИСС", Красноярский край, Россия.

11. Хвалько А.А., Сунцов С.Б., Морозов Е.А., Лебедев А.П.. Испытания электронных модулей на основе LTCC технологии для бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов. // IV Всероссийская научно-техническая конференция "Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий". Труды конференции. 15-17 июня 2011 г. – Москва: ОАО "РКС", Россия.