

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Е.Косенко
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Интеграция CAD – CAE моделей силовой конструкции бортовой аппаратуры
КА при проведении расчета на прочность с использованием метода конечных
элементов»
тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств»
код и наименование направления

15.04.05.02 «Технология космических аппаратов»
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	_____	доцент МБК ПФиКТ, канд. физ-мат. наук	<u>А.А. Хвалько</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>А.В. Фищенко</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	ведущий инженер- конструктор АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева	<u>А.С. Орлов</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____	профессор МБК ПФиКТ, д-р техн. наук, доцент	<u>В.Е. Чеботарев</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2021

Студенту: Фищенко Алексею Викторовичу.

Группа МТ 19-04М.

Направление 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Специализированная программа подготовки: 15.04.05.02 «Технология космических аппаратов».

Тема магистерской диссертации (МД): «Интеграция САД – САЕ моделей силовой конструкции бортовой аппаратуры КА при проведении расчета на прочность с использованием метода конечных элементов».

Утверждено приказом по университету от 22.03.2021 № 3961/с.

Руководитель МД: канд. техн. наук, доцент МБК ПФиКТ Александр Александрович Хвалько.

Перечень разделов МД.

1 Варианты интеграции САД-САЕ моделей.

2 Моделирование механических процессов модуля бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата.

3 Проведение испытаний модуля бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата.

Перечень графического материала представлен в виде слайдов презентации в количестве 19 штук.

Руководитель ВКР _____
подпись

А.А. Хвалько
инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению _____
подпись

А.В. Фищенко
инициалы и фамилия

11.01.2021

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на тему «Интеграция CAD – CAE моделей силовой конструкции бортовой аппаратуры КА при проведении расчета на прочность с использованием метода конечных элементов» содержит 69 страницы текстового документа, 15 использованных источника, 38 рисунков, 6 таблицы.

ИНТЕГРАЦИЯ, СИСТЕМА, АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОИЗВОДСТВО, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, CAD/CAE.

Объект – бортовая аппаратура РЭА КА.

Цель:

– Рассмотреть подход к упрощению 3D – модели CAD – системы до уровня пригодного для проведения моделирования с применением CAE – системы и проверка.

Задачи ВКР:

- Рассмотреть подходы интеграции CAD/CAE систем.
- Исследовать этапы упрощения CAD модели до ее пригодности и применения в CAE системе с помощью метода конечных элементов.
- Испытание макета модели.

Практическая значимость:

На предприятиях космической отрасли проводят анализ модели на прочность с помощью таких продуктов как NASTRAN и ANSYS. Не все инженеры, которые занимаются данной работой упрощают модели из CAD в CAE модель и при этом снижается точность расчета. Но есть и те люди, которые упрощают модель и CAD в CAE модель, но для этого они тратят очень много времени и сил.

Моя работа позволит любому инженеру оценить важность задачи и время, за которое он может получить положительный результат, тем более это подтверждено экспериментально, на макете модели.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Варианты интеграции САD-САЕмоделей	9
1.1 Задачи механики деформируемого твердого тела и численные методы их решения	9
1.2 Атрибуты конечных элементов и построение сетки.....	18
1.3 Интеграция САD и САЕ	23
2 Моделирование механических процессов модуля бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата	32
2.1 Реальная конструкция бортовой модели радиоэлектронной аппаратуры .	32
2.2 Описание конструкции, общий вид, размеры и масса	33
2.3 Анализ внешних воздействий	34
2.4 САD модель.....	34
3 Проведение испытаний модуля бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата	48
3.1 Методика и средства вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры для контроля их технического состояния	49
3.1.1 Средства адаптирования электродинамического вибратора к механическому интерфейсу бортовой радиоэлектронной аппаратуры.....	50
3.1.2 Вибростенд для испытания бортовой радиоэлектронной аппаратуры.....	51
3.1.3 Схема виброиспытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры	52
3.1.4 Методики вибрационных испытаний и технические требования к экспериментальному оборудованию	53
3.1.5 Виброизмерительные преобразователи для контроля вибрации бортовой радиоэлектронной аппаратуры.....	56
3.2 Алгоритмы обработки результатов испытаний.....	58

3.2.1 Виды сигналов, первичная обработка данных.....	58
3.2.2 Выявление дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры	60
3.2.3 Идентификация дефектов бортовой радио электронной аппаратуры по результатам вибрационных и акустических испытаний	61
3.2.4 Методика выявления дефектов. Особенности виброакустической диагностики бортовой радиоэлектронной аппаратуры открытого исполнения	63
Заключение	65
Список сокращений	67
Список использованных источников	68

ВВЕДЕНИЕ

Механика деформируемого твердого тела представляет собой активно развивающуюся ветвь фундаментальных и прикладных исследований, предназначенных для изучения поведения элементов современных технологических устройств и сооружений во всем многообразии силового и температурного нагружения, определения условий надежности их эксплуатации, разработки прогнозов развития всевозможных катастроф. До середины прошлого века этот раздел знаний в своей основе опирался на математическую модель линейно упругого тела, и основные направления исследований шли по пути поиска аналитических методов решения возникающих начальных и начально-краевых задач математической физики. Можно сказать, что в основании фундамента аппарата известного сегодня под названием математическая физика лежат исследования по теории упругости. Бурное развитие машиностроения, градостроительства, авиакосмической техники, горнодобывающей промышленности, ядерной энергетики и других областей человеческой деятельности не укладывалось в рамки возможностей линейной теории упругости. И начиная с 30-х годов прошлого столетия в механике твердого деформируемого тела идет активное развитие новых направлений исследований.

К настоящему времени разработаны новые фундаментальные разделы: нелинейная теория упругости, теории линейных и нелинейных вязкоупругих сред, теории пластичности и ползучести однородных материалов, теория сыпучих и зернистых сред, механика полимеров и разномодульных материалов, механика композитных материалов, механика тонкостенных конструкций, механика катастроф и теория устойчивости конструкций, теория оптимального проектирования. Это разнообразие новых направлений в механике твердого деформируемого тела привело к необходимости разработки принципиально новых математических вопросов, связанных с проблемами корректного решения возникающих новых начальных и краевых задач для систем нелинейных (по

преимуществу) уравнений с частными и обыкновенными производными. Поскольку надежды на разработку аналитических методов их решения были близки к нулю, одновременно с развитием новых моделей механики твердого тела активно развивались методы численного решения соответствующих краевых задач.

Можно без преувеличения сказать, что практически все широко известные численные методы: метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ), метод граничных элементов (МГЭ), вариационные и вариационно – разностные методы, методы прогонки, методы теории возмущений и др. первоначально апробировались и совершенствовались на решении задач теории упругости и пластичности. И сегодня ни одна новая интересная задача не решается без привлечения этих методов. Причем решение новых задач механики деформируемого твердого тела требует активного творческого развития этих методов.

1 Варианты интеграции CAD-CAE моделей

1.1 Задачи механики деформируемого твердого тела и численные методы их решения

Математическое моделирование – это получение решений уравнений, составляющих математическую модель объекта, при изменении начальных и граничных условий этих уравнений. Решениями систем дифференциальных уравнений являются функции, подстановкой в которые значений аргументов можно находить величину параметров, характеризующих поведение объекта в пространстве и времени (вообще говоря – в фазовом пространстве). Если модель состоит из алгебраических уравнений, то их решение дает непосредственно значения параметров данного объекта.

Математическое моделирование большинства технических объектов осуществляют на микро-, макро- и мегауровнях, которые отличаются степенью детализации рассмотрения процессов в объекте.

Математическая модель технического объекта на микроуровне – это система дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП), которая описывает процессы в сплошной среде вместе с заданными краевыми условиями (совокупностью начальных и граничных условий). Система уравнений, как правило, известна, но краевые условия полностью обычно не заданы. Более того, определение краевых условий иногда является конечной целью исследования [1].

Поскольку ДУЧП в большинстве случаев не поддаются аналитическому решению, то при моделировании используются различные численные методы решения. В технических науках это обычно метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ).

В МКР дифференциальные операторы заменяются их разностными аналогами.

Область исследования разбивается на конечное число узлов при помощи сетки. В узлах сетки находятся приближенные значения искомой функции путем решения системы алгебраических уравнений, к которым сводятся конечные разности. Несмотря на свою кажущуюся простоту, МКР не нашел широкого применения в ОМД из-за следующих своих недостатков.

1 Дискретизация области производится регулярной сеткой, что затрудняет точное описание границ нелинейной формы. При измельчении сетки возникает проблема сходимости – приближенное решение перестает сходиться к точному решению дифференциальной задачи.

2 Сложность построения сходящейся разностной схемы из-за проблем с точностью и устойчивостью решения.

Этих недостатков лишен МКЭ, вследствие чего он в настоящее время считается самым эффективным методом решения задач ОМД. В отличие от МКР здесь аппроксимируются не производные, а само решение. Искомая функция заменяется кусочно-непрерывной (сплайном), определенной на множестве конечных элементов достаточно произвольной формы, что позволяет хорошо описывать граничные условия сложной геометрии. Значения функции в узлах находятся или минимизацией функционала, описывающего данную задачу, или же методом Галеркина при использовании исходного дифференциального уравнения. При этом не накладывается никаких ограничений на вид уравнения, что позволяет применять МКЭ для решения нелинейных задач, в частности, теории пластичности.

По точности получаемых результатов МКР и МКЭ теоретически примерно равноценны.

Сущность МГЭ – в переходе от исходных ДУЧП к эквивалентным интегральным уравнениям. Если такой переход возможен, то тогда решение получается с минимальными вычислительными затратами и с более высокой точностью, чем МКЭ. Важно, что в МГЭ размерность задачи уменьшается на единицу: плоские задачи становятся одномерными, а объемные – плоскими. Граничными элементами аппроксимируется не область, а ее граница, откуда и

название метода. Недостаток МГЭ – ограниченность области его применимости классом линейных или линейных относительно приращений задач. Поэтому он особенно широко применяется в линейной теории упругости.

Метод конечных разностей исторически начал развиваться раньше МКЭ и является старейшим методом решения краевых задач.

Алгоритм МКР состоит из этапов, традиционных для метода сеток:

Этап 1. Построение сетки в заданной области. В МКР используется сетка, задаваемая конечным множеством узлов. В узлах сетки определяются приближенные значения, ϕ_h искомой функции ϕ . Совокупность силовых значений ϕ_h называют сеточной функцией.

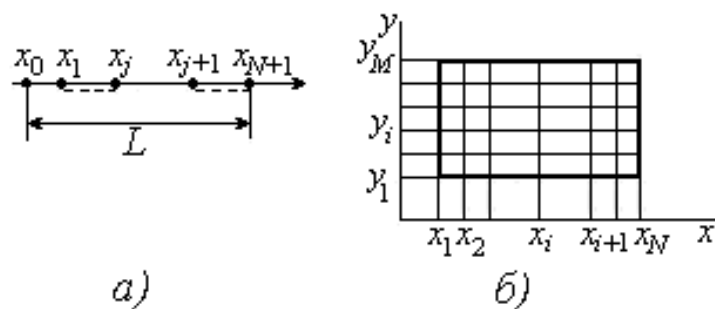
Этап 2. Замена дифференциального оператора $L_\phi = \frac{d\phi}{du}$ в исходном дифференциальном уравнении известным аналогом L_h , построенным по одной из схем, рассмотренных ниже. При этом непрерывная функция ϕ аппроксимируется сеточной функцией ϕ_h .

Этап 3. Решение полученной системы алгебраических уравнений.

При кажущейся простоте алгоритма МКР его практическая реализация наталкивается на ряд трудностей. Для выяснения их природы целесообразно рассмотреть основные этапы МКР более подробно.

Построение сетки в заданной области.

В МКР пользуются, как правило, регулярные сетки, шаг которых либо постоянен, либо меняется по несложному закону. Ниже на рисунке 1 приведен пример построения сеток в МКР.



а - отрезок; б - область изменения функции

Рисунок 1 – Примеры построения сеток в МКР

Для одномерных областей построение сеток мало чем отличается от аналогичной процедуры в МКР. Отрезок длиной L разбивается на N частей, рисунок 1, а. Расстояние между двумя соседними узлами называется шагом сетки $h_i = x_i - x_{i-1}$ при $i=1, 2, \dots, N$. При регулярной сетке шаг h_i - постоянная величина, равная $1/(N-1)$, где N - количество узлов сетки.

Для двухмерной области подход к построению сетки существенно отличается от аналогичной процедуры в МКР. Пусть в качестве области изменения функции задан прямоугольник, рисунок 1, б. Оси x и y разбиваются на отрезки, которые являются шагами сетки по соответствующим направлениям. Через точки деления проводятся прямые, параллельные осям координат. Совокупность точек пересечения (узлов) этих прямых и образует сетку в заданной двухмерной области. Соседними узлами такой сетки называются узлы, расстояния между которыми равно шагу сетки по одной из осей.

Способ построения сетки не меняется и в том случае, если задана область произвольной формы. Узлы сетки, попавшие внутрь области, называются внутренними узлами. Точки пересечения прямых, образующих сетку, с границей области называются граничными узлами.

Даже в случае постоянных шагов сетки по осям x и y в области имеются граничные узлы, отстоящие от ближайших к ним внутренних узлов на

расстояние, меньшее шага по соответствующему направлению. Поэтому для двумерной области произвольной формы сетка в общем случае всегда является нерегулярной, причем особенности геометрии учитываются только в около граничных узлах.

К основным преимуществам МКЭ относят доступность и простоту его понимания, и применимость метода для задач с произвольной формой области решения, возможность создания на основе метода высококачественных универсальных программ для ЭВМ.

В МКЭ исходная область определения функции разбивается с помощью сетки, в общем случае неравномерной, на отдельные подобласти - конечные элементы. Искомая непрерывная функция аппроксимируется кусочно-непрерывной, определенной на множестве конечных элементов. Аппроксимация может задаваться произвольным образом, чаще всего для этих целей используются полиномы, которые подбираются так, чтобы обеспечить непрерывность искомой функции в узлах на границах элементов.

Для двумерных областей наиболее часто используются элементы в форме треугольников и четырехугольников. При этом элементы могут иметь как прямолинейные, так и криволинейные границы, что позволяет с достаточной степенью точности аппроксимировать границу любой формы.

Для трехмерных областей наиболее употребимы элементы в форме тетраэдра и параллелепипеда, которые также могут иметь прямолинейные и криволинейные границы.

Пример использования МКЭ для расчета одномерного температурного поля в однородном стержне. Пусть имеется стержень длиной L и площадью поперечного сечения S , рисунок 2.

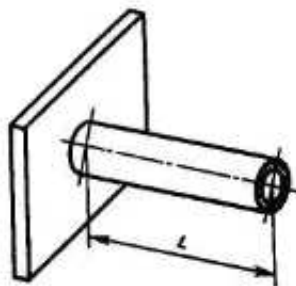


Рисунок 2 – Однородный стержень, находящийся под воздействием теплового потока

Один конец стержня жестко закреплен, и к нему подводится тепловой поток q заданной интенсивности. На свободном конце стержня происходит конвективный теплообмен с внешней средой. Известны коэффициент теплообмена α и температура окружающей среды T_* . Вдоль боковой поверхности стержень теплоизолирован.

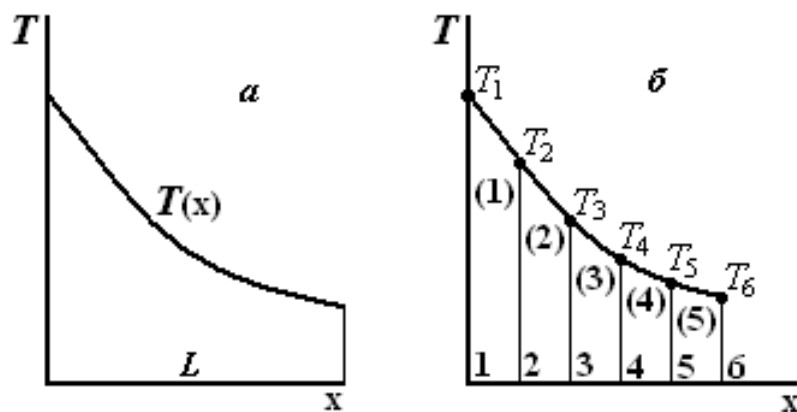
Температурное поле в стержне описывается уравнением теплопроводности, которое в одномерном приближении имеет вид:

$$\lambda_x \frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

Краевые условия определяются уравнениями: $\lambda_x \frac{dT}{dx} + q = 0$ при $x=0$;

рисунок 3, а. $\lambda_x \frac{dT}{dx} + \alpha(T - T_*) = 0$ при $x=L$; рисунок 3, б.

Искомое температурное поле является непрерывной функцией координатах рисунок 3, а.



а - общая схема; б - линейная зависимость

Рисунок 3 – Расчет одномерного температурного поля в однородном стержне методом МКЭ

В МКЭ стержень разбивается произвольным образом на конечные элементы, которые в данном случае являются отрезками неравной длины. На каждом элементе непрерывная функция $T(x)$ аппроксимируется некоторой линейной зависимостью, как показано на рисунке 3, б (в скобках указаны номера элементов). Аппроксимирующая кусочно-линейная функция определяется через узловые значения T_1 - T_6 , которые в общем случае сначала неизвестны и подлежат определению в МКЭ.

В общем случае алгоритм МКЭ состоит из четырех этапов:

Этап 1. Выделение конечных элементов (разбиение заданной области на конечные элементы).

Этап 2. Определение аппроксимирующей функции для каждого элемента (определение функции элемента). На данном этапе значение непрерывной функции $\phi^{(e)}$ в произвольной точке конечного элемента аппроксимируется полиномом по формуле:

$$\phi^{(e)} = A^{(e)}R + A_0, \quad (1)$$

где $A^{(e)}$ – вектор – строка коэффициентов полинома;

A_0 – свободный член;

$R = (x, y, z)$ - вектор координат в рассматриваемой точке.

Задача этапа заключается в определении неизвестного вектора $A^{(e)}$ и свободного члена A_0 . Для этого, используя условие непрерывности функции в узлах, коэффициенты полинома выражают через вектор $\Phi^{(e)}$ узловых значений функции и координаты узлов и, проделав эквивалентные преобразования, получают

$$\phi^{(e)} = N^{(e)}\Phi^{(e)}, \quad (2)$$

где $N^{(e)}$ – матрица-строка, элементы которой называют функциями формы конечного элемента.

Функции формы легко вычисляются в каждой точке конечного элемента через координаты самой точки и координаты узлов элемента.

Этап 3. Объединение конечных элементов в ансамбль. На этом этапе уравнения (2), относящиеся к отдельным элементам, объединяются в ансамбль, т. е. в систему алгебраических уравнений:

$$\varphi = N\Phi, \quad (3)$$

Система является моделью искомой непрерывной функции.

Этап 4. Определение вектора узловых значений функции. В общем случае вектор Φ вначале неизвестен. Его определение - наиболее сложная процедура в МКЭ.

Разработано несколько алгоритмов вычисления вектора Φ . Один из алгоритмов основан на минимизации функционала, связанного с физическим смыслом решаемой задачи, он состоит из 4-х этапов.

Найденные значения вектора Φ подставляют в (3), после чего значение функции ϕ легко вычисляется в любой точке заданной области.

Метод граничных элементов.

При решении краевых задач приближенные модели технических объектов можно строить на основе интегральных уравнений. При этом первый шаг на пути к решению состоит в переходе от дифференциальных уравнений в частных производных к эквивалентным интегральным уравнениям. Во многих случаях, когда такой переход оказывается успешным, решение исходной задачи может быть получено с минимальными вычислительными затратами и высокой степенью точности. Кроме того, размерность исходной задачи понижается на 1, двумерные задачи преобразуются в одномерные.

Примером указанного подхода к решению краевых задач служат методы интегральных граничных элементов (МГЭ). Развитие МГЭ началось сравнительно недавно, причем мощным стимулом к этому послужило создание быстродействующих ЭВМ. Все разновидности МГЭ используют принцип суперпозиции, поэтому область их применения ограничена классом полностью линейных или линейных относительно приращений задач. Однако к такому классу относятся многие важные для развития техники задачи, например, МГЭ успешно используются для решения задач теории упругости, механики жидкости и газов.

Все МГЭ строятся на основе общих принципов. При этом различают прямые и непрямые МГЭ.

В прямых МГЭ искомыми переменными краевой задачи являются величины, имеющие реальный физический смысл, например, в задачах теории упругости - усилия и смещения, возникающие в элементах конструкции.

В непрямых МГЭ решение исходной задачи выражается через функции плотности, которые сами по себе не имеют реального физического смысла.

После того как функции плотности найдены, значения реальных физических параметров задачи могут быть получены из них путем простого интегрирования [2].

В любом варианте МГЭ результатом перехода от дифференциальных уравнений в частных производных к интегральным уравнениям в конечном счете является система уравнений, включающая значения переменных только на границе заданной области. Поэтому в отличие МКЭ и МКР последующая дискретизация задачи проводится только на границе исследуемой области. Последнее обуславливает, во-первых, более высокую по сравнению с МКР и МКЭ точность решения, во-вторых, существенно меньший объем входных данных при реализации методов на ЭВМ.

1.2 Атрибуты конечных элементов и построение сетки

В процессе конечноэлементного моделирования одним из важных этапов является создание сетки конечных элементов. Рассмотрим основные типы конечных элементов и их свойства, называемые атрибутами элементов.

Собственная размерность. Положения конечных элементов могут описываться одной, двумя или тремя пространственными координатами в зависимости от размерности задачи. Соответствующее число внутренних или локальных координат называется собственной размерностью элемента. Время в динамическом анализе рассматривается как дополнительная размерность. Отметим, что иногда в расчетах используются специальные элементы с нулевой размерностью, такие как точечные массы или сосредоточенные упругие элементы (пружины).

Узловые точки. Узловые точки, или узлы предназначены для описания геометрии элемента и задания физических степеней свободы (числа неизвестных функций). Как правило, узлы находятся в угловых или крайних точках элемента. Иногда вводят дополнительные узлы, расположенные внутри элемента. Число узлов связано с порядком аппроксимации, который обеспечивает данный конечный элемент. Элементы, имеющие только угловые узлы, называются

линейными и обеспечивают линейную интерполяцию геометрии и функций. Элементы, имеющие дополнительные узлы на своих границах между угловыми точками, могут обеспечивать квадратичную или даже кубическую интерполяцию рисунок 4. При наличии современных автоматических генераторов конечно-элементных сеток часто бывает проще и удобнее разбить конструкцию на большое число линейных элементов простой формы, чем использовать элементы высокого порядка, требующие для построения сетки значительной работы вручную. В то же время квадратичная и кубическая интерполяции обеспечивают более высокую точность расчета.

Геометрия элемента. Геометрия элемента определяется расположением узловых точек. Большинство элементов, используемых в расчетах, имеют простую геометрическую форму. Например, в одномерном случае элементы обычно представляют собой прямолинейные отрезки или сегменты кривых линий; в двумерном случае элементы имеют трех- или четырехстороннюю форму рисунок 4; в трехмерных задачах наиболее распространены такие геометрические фигуры, как тетраэдры, гексаэдры на рисунке 4 и призмы.

Степени свободы. В качестве степеней свободы могут фигурировать как узловые значения неизвестной функции, так и ее производные по пространственным координатам в узлах. В первом случае элементы относятся к типу лагранжевых элементов, во втором – эрмитовых. Например, в простейшей задаче о растяжении стержня неизвестной функцией являются продольные смещения узлов стержня. Соответственно в качестве степеней свободы выступают узловые значения данной функции и, следовательно, конечный элемент относится к лагранжевому типу. Наоборот, в задаче об изгибе стержня неизвестной функцией являются поперечные смещения узлов центральной оси стержня, а в качестве степеней свободы используются как узловые значения самой функции, так и ее производной по продольной координате. Таким образом, конечный элемент, применяемый в расчетах стержня на изгиб, относится к типу эрмитовых элементов. Заметим также, что данные обозначения

происходят от названий полиномов Лагранжа и Эрмита, широко используемых в прикладной математике для интерполяции функций по узловым значениям.










		Геометрия и функция аппроксимации		
		линейная	квадратичная	кубическая
Геометрия	1D			
	2D			
	3D			

Рисунок 4 – Конечные элементы для одно-, двух- и трехмерных задач с разным порядком аппроксимации

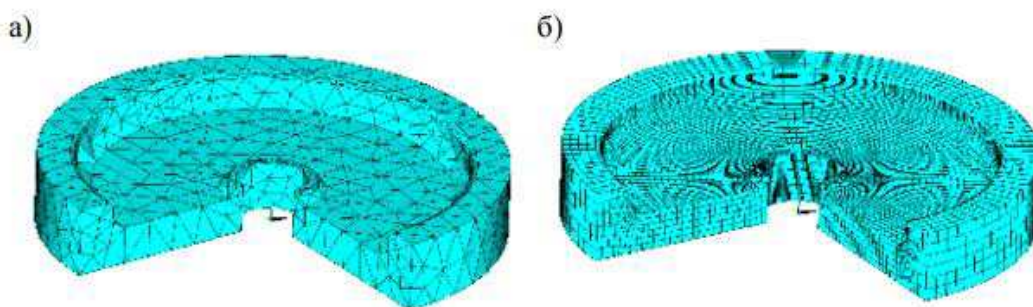
Определяющие соотношения. Для конечных элементов, используемых в механических расчетах, определяющее соотношение задает поведение материала, из которого изготовлена конструкция. Например, в качестве такого соотношения во многих случаях используется обобщенный закон Гука, связывающий тензоры деформаций и напряжений в точке. Для линейного упругого стержневого элемента достаточно задать один модуль Юнга E и коэффициент температурного расширения.

Свойства сечения. К свойствам сечения относятся площади и моменты инерции одномерных конечных элементов (балки, стержни), а также толщины двумерных конечных элементов (пластины, оболочки). Одним из наиболее важных этапов конечноэлементного анализа является построение сетки конечных элементов. В существующих программных комплексах, как правило,

предусматриваются два основных метода: построение произвольной сетки рисунок 5, а и построение упорядоченной сетки рисунок 5, б.

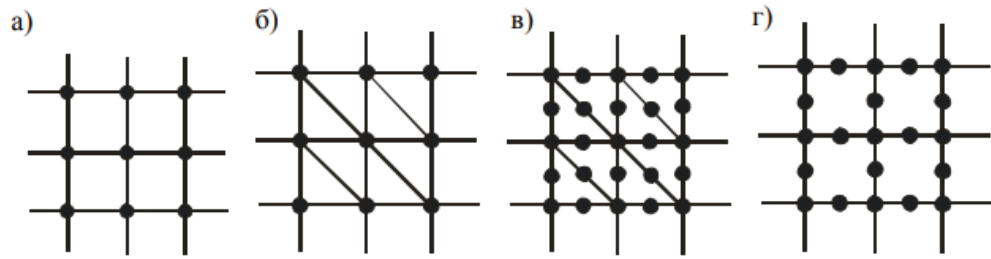
Необходимо помнить, что точность расчета с помощью МКЭ зависит от правильного выбора типов и размеров конечных элементов. Практика расчетов с применением МКЭ позволяет дать следующие рекомендации:

- линейные элементы требуют более мелкой сетки, чем элементы более высокого порядка (с промежуточными узлами);
- упорядоченная сетка предпочтительнее произвольной;
- прямоугольная сетка с четырьмя узлами рисунок 6, а, более выгодна, чем сетка с треугольными элементами рисунок 6, б;
- сетка треугольных элементов с промежуточными узлами рисунок 6, в, имеет точность, близкую к сетке прямоугольных элементов с четырьмя узлами рисунок 6, а;
- прямоугольная сетка с восемью узлами рисунок 6, г, предпочтительнее сетке треугольных элементов с промежуточными узлами рисунок 6, в, несмотря на большую площадь прямоугольных элементов;
- аппроксимация смещений кубическим полиномом (элемент третьего порядка) не требует мелкой сетки.



а - построение произвольной сетки; б - построение упорядоченной сетки

Рисунок 5 – Примеры свободного и регулярного разбиения

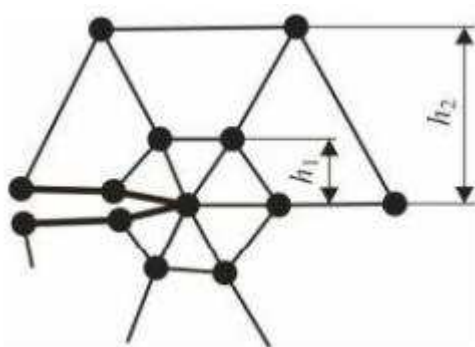


а - прямоугольная сетка с четырьмя узлами; б - сетка с треугольными элементами; в - сетка треугольных элементов с промежуточными узлами; г - прямоугольная сетка с восемью узлами

Рисунок 6 – Различные типы конечноэлементных сеток

Мелкая сетка требуется там, где ожидается большой градиент деформаций или напряжений (отверстие, выточка, трещина и т. п.). В то же время крупная сетка может применяться в зонах с мало изменяющимися относительными деформациями или напряжениями, а также в областях, не представляющих особого интереса для расчетчика. В связи с этим перед созданием конечно-элементной сетки необходимо выделить предполагаемые области концентрации напряжений.

Заметим, что точность результатов расчетов уменьшается, если существенно различаются размеры соседних элементов вблизи концентратора напряжений рисунок 7.

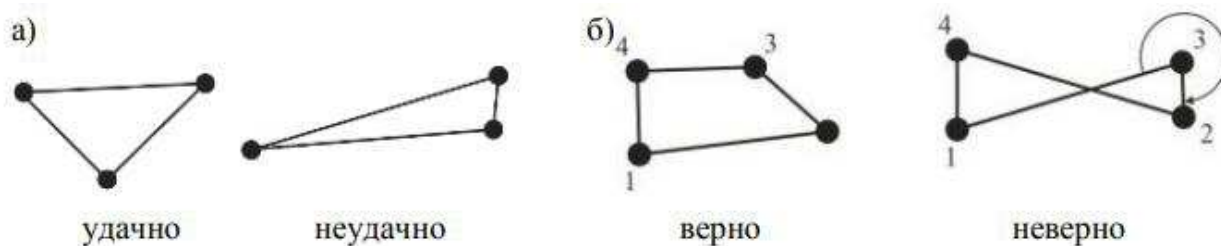


$$\frac{h_2}{h_1} < 2 \text{ – допустимо}$$

$$\frac{h_2}{h_1} > 2 \text{ – недопустимо}$$

Рисунок 7 – Допустимые размеры элементов

Форма конечных элементов также влияет на точность вычислений. Следует избегать слишком вытянутых элементов, так как элементы с примерно одинаковыми размерами сторон дают меньшую ошибку рисунок 8, а. Запрещается использовать четырехугольные элементы с углами, превышающими 180° рисунок 8, б [4].



а – треугольные элементы; б – четырехугольные элементы

Рисунок 8 – Примеры форм элементов

1.3 Интеграция CAD и CAE

Основными факторами успеха в современном промышленном производстве являются срока выхода продукции на рынок, снижение ее себестоимости и повышение качества. Сейчас общепризнанным фактом является невозможность изготовления сложной наукоемкой продукции (кораблей, самолетов, различных видов промышленного оборудования и др.) без применения современных систем автоматизации. К числу наиболее эффективных технологий, позволяющих выполнить эти требования, принадлежат так называемые CAD/CAM/CAE-системы (системы автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа). Несмотря на широкое распространение систем CAD для проектирования и систем CAE для анализа, эти системы не так уж хорошо интегрируются. Модели CAD и CAE используют разные типы геометрических моделей, и в настоящее время не существует общей

унифицированной модели, которая бы содержала в себе как информацию для проектирования, так и для анализа.

Термины CAD, CAM, CAE обозначают следующее:

– CAD-системы (computer-aided design) — компьютерная поддержка проектирования, предназначенная для решения конструкторских задач и оформления конструкторской документации (более привычно они именуются системами автоматизированного проектирования — САПР);

– CAM-системы (computer-aided manufacturing) — компьютерная поддержка изготовления, предназначенная для проектирования обработки изделий на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) и выдачи программ для этих станков. CAM-системы еще называют системами технологической подготовки производства;

– CAE-системы (computer-aided engineering) — поддержка инженерных расчетов, представляющая собой применение обширного класса систем, из которых позволяет решать определенную расчетную задачу (группу задач), начиная от расчетов на прочность, анализа и моделирования тепловых процессов до расчетов гидравлических систем, и машин, расчетов процессов литья. В CAE-системах также используется трехмерная модель изделия. CAE-системы еще называют системами инженерного анализа;

– CAD системы, базирующиеся на трехмерной геометрии, сейчас широко применяются при проектировании широкого спектра изделий. В то же время, инженерный анализ с использованием CAE-систем необходим при проектировании изделия. Поэтому ключевым моментом для улучшения процесса проектирования является тесная «бесшовная» интеграция CAD и CAE. Возможность тесной интеграции зависит от следующих факторов: масштаба, границ и целей CAE-анализа; природы и качественных характеристик CAD-модели; степени детализации, требуемой для CAE [5].

Существуют четыре основных подхода к интеграции CAD и CAE:

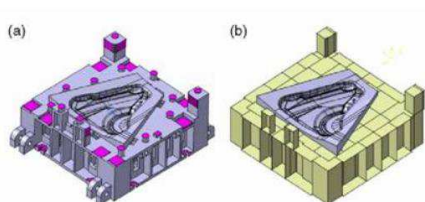
- 1) CAD-ориентированный;
- 2) CAE-ориентированный;

- 3) CAD/CAE-ориентированный;
- 4) использование технологии управления информацией об изделии на протяжении его жизненного цикла (ProductLifecycleManagement, PLM).

Рассмотрим более подробно каждый из этих подходов.

CAD – ориентированный подход.

В CAD-ориентированном подходе, рассматривается проектирование, основанное на CAD-системе и интерактивный анализ, который проводится с целью улучшения проектируемого изделия. Данная методика уже получила широкое распространение. Практически во всех современных CAD-системах предусмотрены дополнительные модули анализа и имитации, тесно интегрированные с системой моделирования. Эти модули позволяют решать задачи кинематического моделирования, анализа методом конечных элементов (МКЭ), генерации сетки и последующей обработки непосредственно в системе моделирования. Например, система Pro/Engineer фирмы PTC включает в себя модули Pro/Mechanica, выполняющие структурный, вибрационный, температурный и двигательный анализ. Pro/Mesh и Pro/FEMPOST – это пре- и постпроцессоры анализа по МКЭ соответственно. Таким образом МКЭ становится наиболее популярным методом для анализа. К сожалению, часто модели, созданные в CAD непригодны для МКЭ. Как показано на рисунке 9, для МКЭ в большинстве случаев требуется некая абстрактная модель, в то время как CAD-система обеспечивает создание детализированной твердотельной модели.



а - детализированная CAD-модель; б - абстрактная модель CAE

Рисунок 9 – Геометрические модели

Следовательно, как показано на рисунке 9, для получения МКЭ-специфичной модели необходим процесс преобразования, который удаляет некоторые элементы, и даже изменяет размеры исходной модели. Удаление элементов заключается в том, что маленькие геометрические элементы, содержащиеся в модели, игнорируются или скрываются. Существуют специальные экспертные системы, в которые загружается CAD-модель, и они селективно скрывают геометрические элементы и их свойства, чтобы затем получить модель для анализа. А при изменении размеров происходит некое упрощение твердотельной модели. В результате получается, например, каркасная модель или поверхностная.

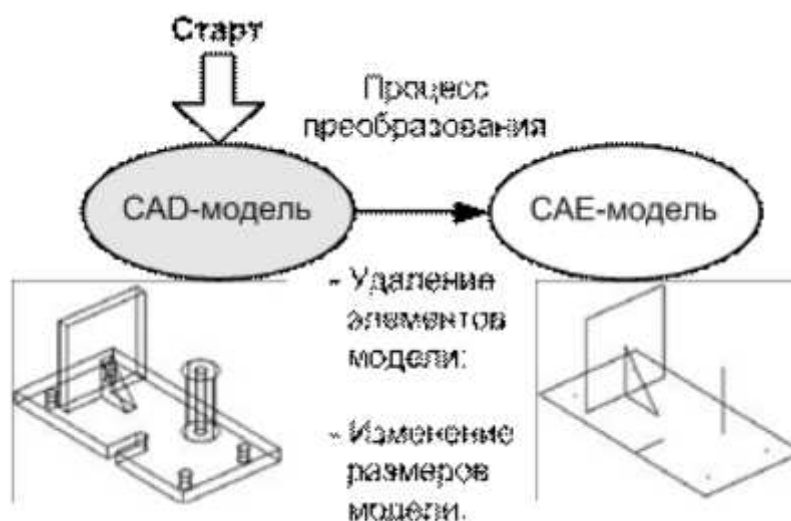


Рисунок 10 – CAD-ориентированный подход к интеграции CAD и CAE

Процесс преобразования моделей является значительным препятствием на пути интеграции CAD и CAE, а также довольно нетривиальной задачей, к тому же требующей значительных временных затрат. Для решения этой проблемы существует много разработок, в первую очередь связанных с автоматизацией процесса преобразования одной модели в другую. Однако, возможности всех существующих в данное время методов достаточно ограничены, и степень автоматизации процесса преобразования моделей требует совершенствования.

Преобразование моделей зависит также от наличия тех или иных свойств у CAD – модели. Если CAD – модель не содержит информацию о необходимых для CAE свойствах, производится определение этих свойств, путем анализа твердотельной модели. В противном случае необходимые свойства конвертируются в свойства CAE – модели. В случае если свойства CAD – модели полностью идентичны свойствам CAE – модели, никакой конвертации не производится. Технологии, используемые в процессе преобразования, включают в себя: проектирование на основе конструктивных элементов геометрической модели (фичеров), определение свойств модели, конвертация свойств, удаление некоторых элементов модели и изменение размеров. Также здесь используется твердотельное моделирование и самопересекающееся топологическое моделирование (NMT). Число общих ребер в моделях должно быть чуть меньше или равно двойному количеству ребер. Если это число более чем в два раза превосходит число ребер, тогда модель считается самопересекающейся, в которой одно или более ребер лежит на пересечении более чем двух граней, т.е. она имеет совпадающие ребра. Самопересекающиеся модели позволяют строить топологию, включающую точки, кривые, поверхности и трехмерные объекты, содержащие в себе точки, кривые или поверхности, присоединенные или, нет к внешней границе.

CAE – ориентированный подход.

В CAE – ориентированном подходе, прежде всего проводится инженерный анализ на основе абстрактной модели, с целью определения всех параметров CAE – модели. Как показано на рисунке 11, модель для проектирования получается путем добавления дополнительных элементов, а также необходимой информации о размерах.

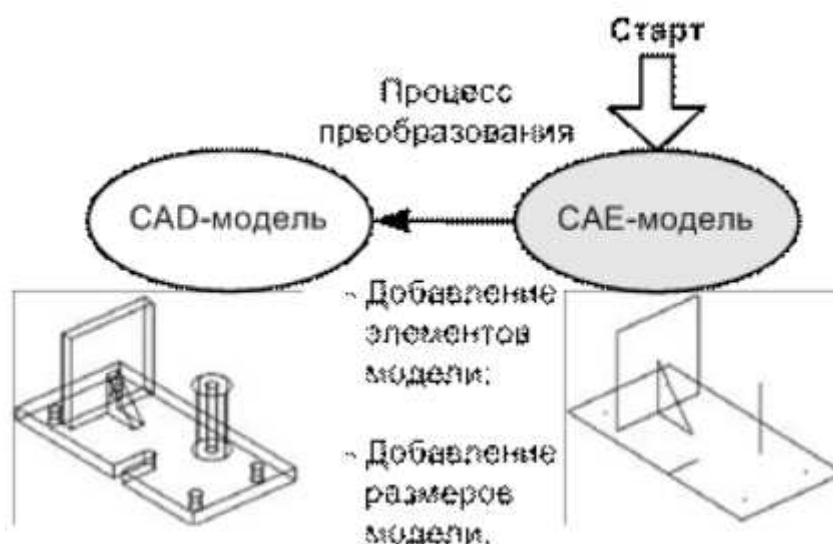


Рисунок 11 – САЕ – ориентированный подход к интеграции САD и САЕ

Этот подход, основанный на добавлении элементов модели и образмеривании прямо противоположен САD – ориентированному подходу, который требует упрощения геометрии модели с целью приближения к модели МКЭ. В случае ориентации на САЕ, требуются автоматизированные процедуры формирования твердотельных моделей на основе абстрактных предшественников. В противном случае, конструкторам потребуется вручную восстанавливать геометрию по проектной документации. В случае САЕ-ориентированного подхода, аналогично САD – подходу, существуют различные технологии преобразования в зависимости от наличия и содержания свойств в САЕ модели. При данном подходе используются технологии проектирования на основе фичеров, определения свойств модели и конвертации свойств из NMT-модели, а также добавления элементов и размеров NMT – модели. Добавление размеров – это технология создания твердотельных моделей из абстрактных NMT-моделей, используемая в САЕ-ориентированном подходе. Добавляется толщина для поверхностей и производится утолщение каркасов.

CAD/CAE – ориентированный подход.

CAD и CAE – ориентированные подходы требуют двойных усилий по созданию и непрерывному поддержанию двух различных моделей одного изделия. Отсутствие автоматизированных средств трансформации из одного типа модели в другой может привести к тому, что модель придется восстанавливать по документации. Это является узким местом в интеграции CAD – CAE. В дополнение, при инженерном анализе часто требуется менять степень детализации (LOD) и/или уровень абстракции (LOA) рассматриваемой модели. Как только меняются LOD и LOA, необходимо заново проводить процесс трансформации. В качестве решения данных проблем предлагаются варианты общего модельного пространства, а также двунаправленной интеграции CAD – CAE. В данном случае система позволяет CAD – системе автоматически генерировать модели для анализа, а CAE – системе автоматически модифицировать геометрию деталей и проводить новый анализ. Процесс преобразований повторяется, пока не будет достигнут заданный критерий.

Данный метод называется CAD/CAE-интегрированным подходом, который обеспечивает унифицированное моделирование для «бесшовной» интеграции CAD/CAE. На рисунке 12 показан поток данных при этом подходе. В основе его лежат следующие технологии: проектирование с использованием фичеров, NMT, многомасштабные представления.

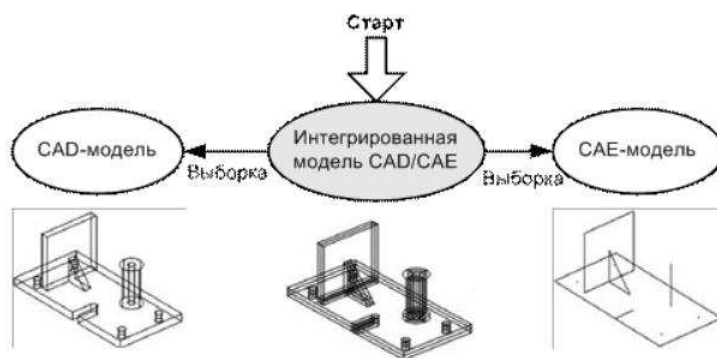


Рисунок 12 – Интегрированный подход CAD\CAE

При данном подходе, одновременно создаются различные типы геометрических моделей проектирования и анализа для каждой операции моделирования фичера. Все модели интегрируются в одну общую модель. Твердотельные модели с различными LOD легко получаются из интегрированной модели. Более того, для каждого LOD можно получить абстрактную NMT модель с различным LOA и передать её в CAE-систему.

В случае CAD/CAE-интегрированного подхода CAD и CAE модели создаются одновременно и объединяются в единую NMT модель. Из объединенной модели CAD и CAE модели получаются с помощью механизма выборки. В дополнение, этот подход поддерживает модели CAD, CAE на различных LOD и LOA. Поэтому используемые здесь технологии — это проектирование на основе фичеров, алгоритмы выборки, удаления элементов и изменения размеров, многомасштабные представления.

Использование технологии PLM.

В отличие от описанных выше принципов интеграции CAD и CAE, использование технологии управления информацией об изделии на протяжении его жизненного цикла затрагивает не отдельные вопросы улучшения совместной работы этих двух систем, а более глобальные задачи объединения в одно целое всех процессов проектирования, производства, модернизации и сопровождения технически сложных изделий.

Основная задача PLM — это объединение отдельных участков автоматизации в едином информационном пространстве и реализация сквозного конструкторского, технологического и коммерческого цикла, от подготовки проекта до утилизации [6]. Такой подход сулит предприятиям немалые выгоды, главные из которых:

- ускорение выпуска новых продуктов;
- усиление контроля за качеством;
- сокращение издержек заменой физических макетов виртуальными;
- экономия за счет многократного использования проектных данных;
- расширение возможностей оптимизации изделий;

- экономия благодаря сокращению отходов производства;
- снижение затрат с помощью полной интеграции инженерного документооборота [7].

Чтобы воспользоваться преимуществами данной концепции, необходимо преодолеть серьезные технические трудности. Основная проблема, стоящая перед пользователями и разработчиками, заключается в необходимости объединения разнородных систем автоматизации на предприятии и обеспечении коллективной работы персонала.

Обычно каждое подразделение выдает свою информацию и по-своему ее обрабатывает. Так, отделы проектирования (использующие CAD), и анализа продукции (CAE) могут использовать совершенно разные спецификации и стандарты и принимать решения независимо друг от друга. Поэтому перед внедрением PLM должны прежде всего быть установлены корпоративные стандарты на форматы данных. Также многие предприятия для выполнения отдельных заданий производственного процесса используют программное обеспечение – ПО (чаще всего САПР) разных поставщиков. Для их интеграции в рамках PLM-среды приходится применять средства преобразования данных из одного формата в другой, что нередко вызывает ошибки и ухудшает качество информации. Наиболее очевидный способ избежать этого – внедрять PLM – продукты одного поставщика. Однако лишь немногие поставщики предлагают весь набор средств PLM, да и предприятия вряд ли захотят менять привычные САПР на новые. Единственный выход – создание открытого формата данных [8].

2 Моделирование механических процессов модуля бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата

2.1 Реальная конструкция бортовой модели радиоэлектронной аппаратуры

Радио электронная аппаратура (РЭА) предназначенное для передачи, приёма, информации на расстояние по радиоканалу при помощи электромагнитных сигналов. В радиоэлектронной аппаратуре производится обработка сигналов, например: обнаружение сигнала, оценивание сигнала, различение на фоне шумов, помех и других сигналов, шумоподавление в тракте, частотная фильтрация, усиление сигнала.

В более широком смысле под радиоэлектронной аппаратурой понимается любая электронная аппаратура. В основу работы радиоэлектронной аппаратуры заложен механизм преобразования сигнала от источника сообщений к получателю сообщений.

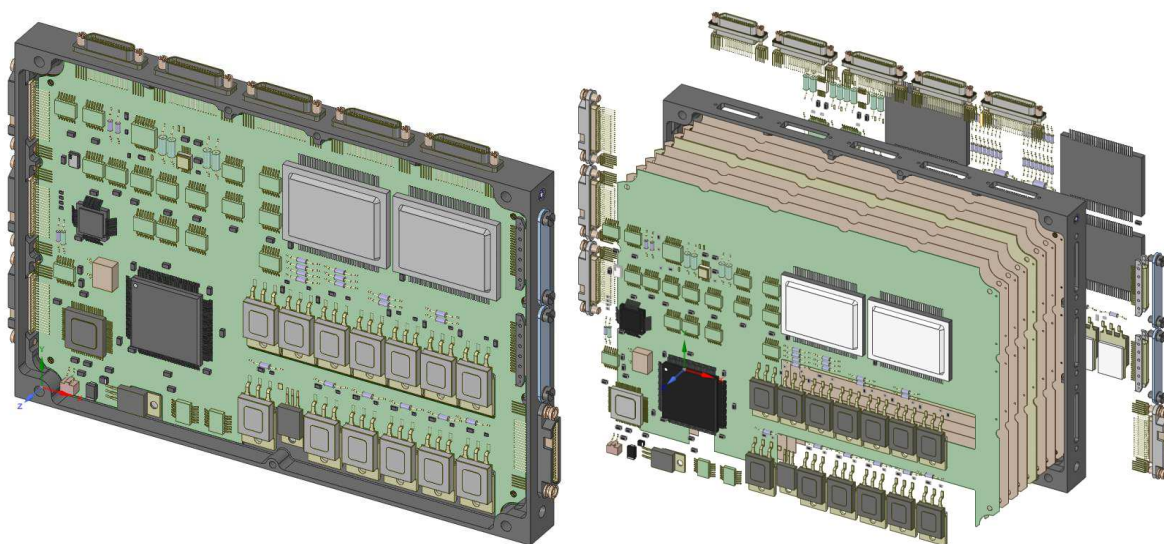


Рисунок 13 – Общий вид

Необходимо проверить принятые конструкторско-технологические решения на прочность при воздействии квазистатических нагрузок.

Критерием оценки служат резонансные частоты, места и уровни возникающих напряжений, так же оценивался запас прочности по текучести (4) для металлов и запас прочности по пределу прочности (5) для неметаллов.

$$\eta_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_P}, \quad (4)$$

$$\eta_B = \frac{\sigma_B}{\sigma_P}, \quad (5)$$

где η_T – запас прочности по текучести;

η_B – запас прочности по пределу прочности;

σ_T – напряжение предела текучести;

σ_B – напряжение предела прочности;

σ_P – максимальное расчетное напряжение в приборе.

Запасы прочности η_T и η_B должны быть не менее 1. Максимальные напряжения вычислялись по модели Фон Мизеса. Резонансные частоты элементов конструкции должны быть больше 150 Гц.

2.2 Описание конструкции, общий вид, размеры и масса

Рассматриваются 3 варианта конструкции, одинаковой массы и габаритных размеров. Каждая конструкция состоит из алюминиевой рамки с платами с смонтированными многовыводными ЭРИ.

Масса – 1 кг.

Габаритные размеры – 254x20x174мм (ДxШxВ).

Материалы в таблице 1 представлены используемые материалы в модели.

Таблица 1 – Материалы, используемые в модели

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль Юнга E, ГПа	Козф. Пуассона μ	Предел текучести σ_T , МПа	Предел Прочност и σ_B , МПа
Алюминий	2700	70	0,31	155	330
Медь	8940	130	0,4	280	450
Стеклотекстол ит	1750	20	0,273	-	300
Припой ПОС61	8500	120	0,46	26	47
Керамика	3880	247	0,22	-	280

2.3 Анализ внешних воздействий

Требования по внешним воздействиям.

Согласно нормам прочности, принятым в АО «ИСС», выбраны максимальные требования по стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры РЭА к квазистатическим нагрузкам, таблица 2.

Таблица 2 – Статическая нагрузка

Ускорение, м/с ² (g)
±20 g

2.4 САД модель

Для создания КЭМ необходимо, проработать и исправить ошибки представленные на рисунке 14, 15, 16 3D модели нашей конструкции. Если их не исправить, то мы не сможем правильно работать в программе, и получим не корректные результаты.

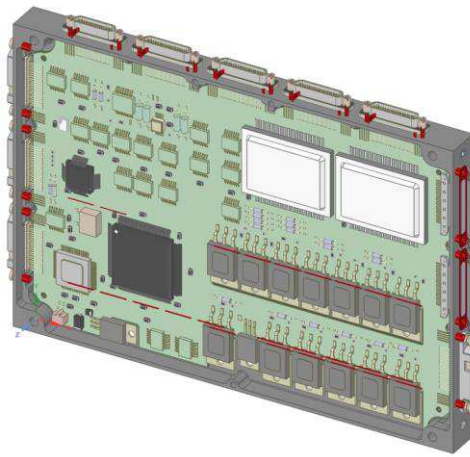


Рисунок 14 – Количество пересекающихся областей – 158

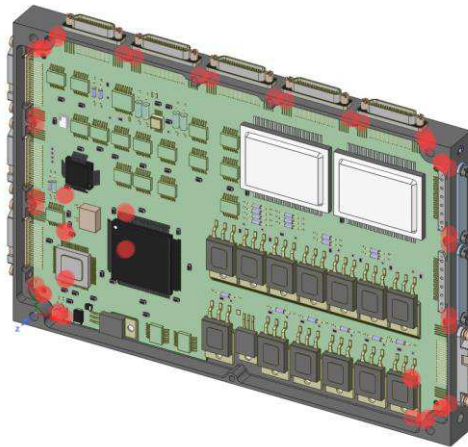


Рисунок 15 – Количество коротких ребер – 250

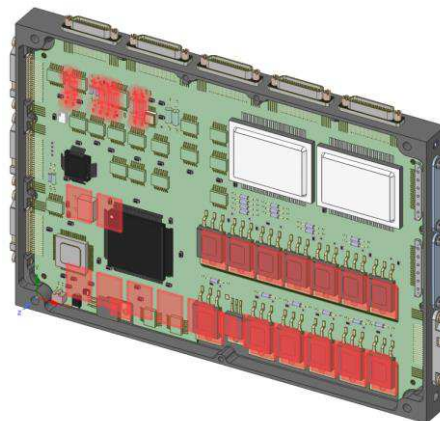


Рисунок 16 – Зазоры – 250

Далее будет рассмотрено 3 конструкции модели и 2 этапа упрощение конструкции модели.

На рисунке 17 представлена модель без упрощения, со всеми ошибками, а именно: зазоры, короткие ребра и пересекающиеся области.

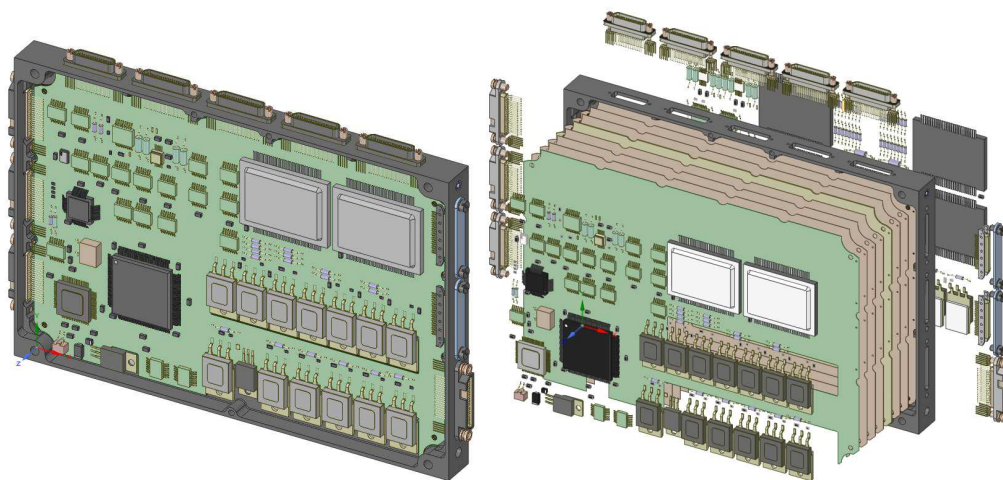


Рисунок 17 – Общий вид конструкции №1

Конечно-элементная модель (КЭМ) создана для расчета в пакете ANSYS. КЭМ конструкций представлена на рисунке 18.

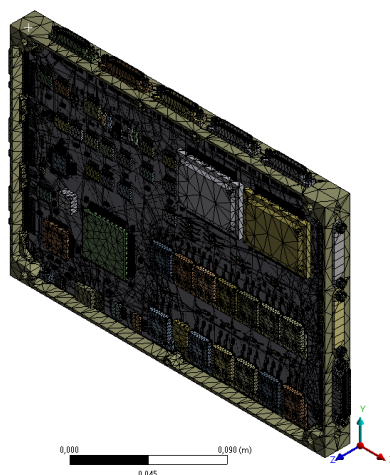


Рисунок 18 – Количество узлов 1545362. Количество элементов 731158.

КЭМ – исследуемой конструкции

Граничные условия: нижняя плоскость (подошва) рамки, боковые отверстия для крепления рамки в приборе – жесткая заделка.

Результаты расчета.

Расчет на воздействие статических нагрузок по оси OX.

Реакция конструкции на воздействие статических нагрузок определялись в пакете ANSYS. Требования по данному воздействию заданы в таблице 2.

Максимальные перемещения:

№1 0,0004 мм рисунок 19 слева.

Минимальный запас прочности:

№1 2,5 МПа рисунок 19 справа.

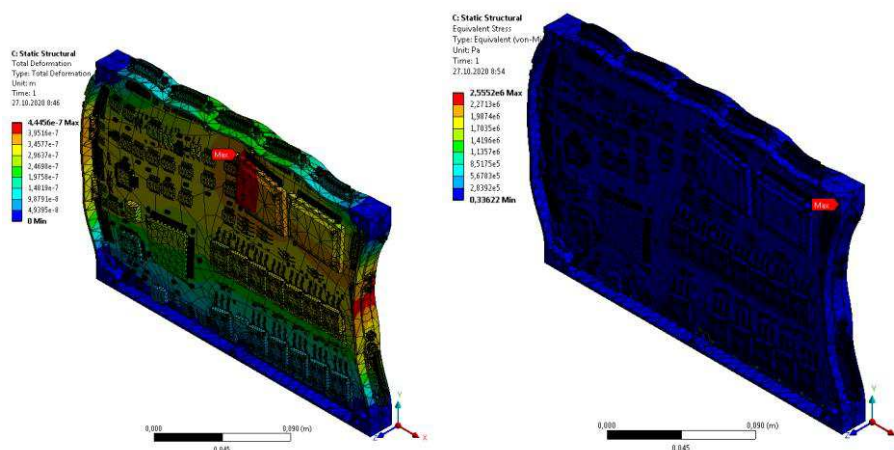


Рисунок 19 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию

№1 по оси OX

Расчет на воздействие статических нагрузок по оси OY.

Реакция конструкции на воздействие статических нагрузок определялись в пакете ANSYS. Требования по данному воздействию заданы в таблице 2.

Максимальные перемещения:

№1 0,0003 мм рисунок 20 слева.

Минимальный запас прочности:

№1 1,4 МПа рисунок 20 справа.

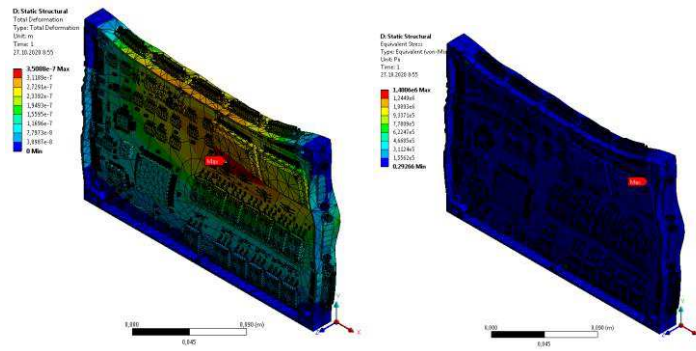


Рисунок 20 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №1 по оси OY

Расчет на воздействие статических нагрузок по оси OZ.

Реакция конструкции на воздействие статических нагрузок определялись в пакете ANSYS. Требования по данному воздействию заданы в таблице 2.

Максимальные перемещения:

№1 0,03 мм рисунок 21 слева.

Минимальный запас прочности:

№1 29,8 МПа рисунок 21 справа.

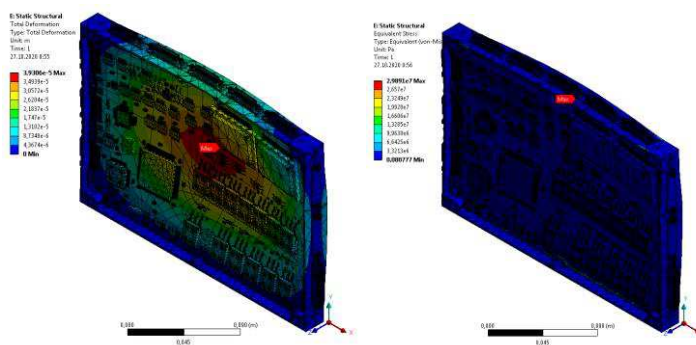


Рисунок 21 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №1 по оси OZ

Свели значения конструкции номер 1 по осям OX, OY, OZ в таблицу 3.

Таблица 3 – Значения максимальных напряжений и соответствующие им запасы при статических нагрузках

Материал	Предел текучести (σ_T) Предел прочности (σ_B), МПа	Номер исследуемого варианта конструкции №1					
		Ось OX		Ось OY		Ось OZ	
		Мах. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)	Мах. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)	Мах. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)
Алюминий	155 (σ_T)	2,5	>10	1,2	>10	16,6	>10
Стеклотекстолит	300 (σ_B)	0,4		0,2		3,8	
Время проведения расчета, сек		217,8		216,6		217,2	

Первый этап упрощения.

Исправлены ошибки модели: зазоры от элементов и пересекающиеся области модели, рисунок 22 общий вид получившейся конструкции.

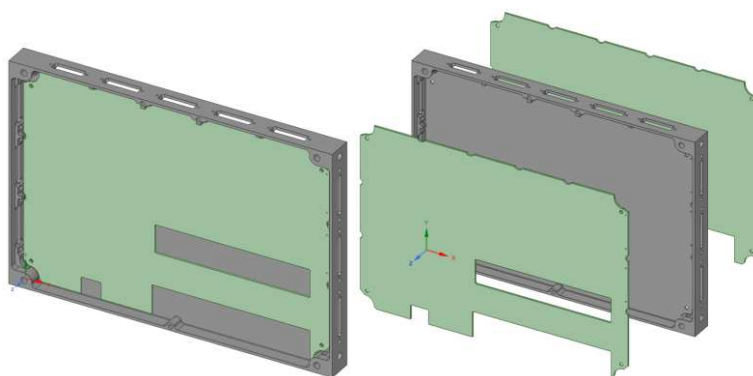


Рисунок 22 – Общий вид конструкции №2

Конечно – элементная модель (КЭМ) создана для расчета в пакете ANSYS. Общая масса элементов геометрически отсутствующих в моделях (ЭРИ,

соединители и пр.) равномерно распределялась по поверхностям, где предполагается их наличие. КЭМ конструкций представлена на рисунке 23.

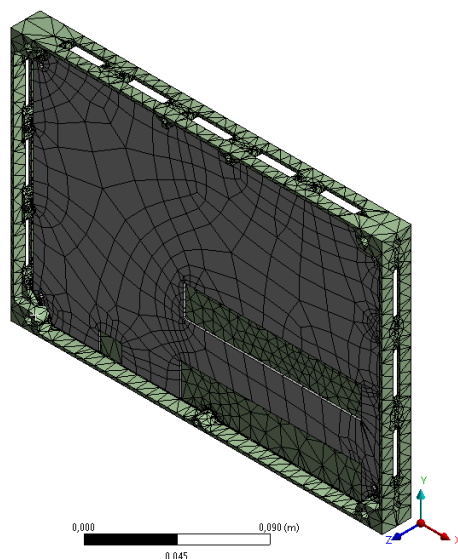


Рисунок 23 – Количество узлов 53797. Количество элементов 23872
КЭМ – исследуемой конструкции

Граничные условия: нижняя плоскость (подошва) рамки, боковые отверстия для крепления рамки в приборе – жесткая заделка.

Результаты расчета.

Расчет на воздействие статических нагрузок по оси ОХ.

Реакция конструкции на воздействие статических нагрузок определялись в пакете ANSYS. Требования по данному воздействию заданы в таблице 2.

Максимальные перемещения:

№2 0,0006 мм рисунок 24 слева.

Минимальный запас прочности:

№2 2,5 МПа рисунок 24 справ.

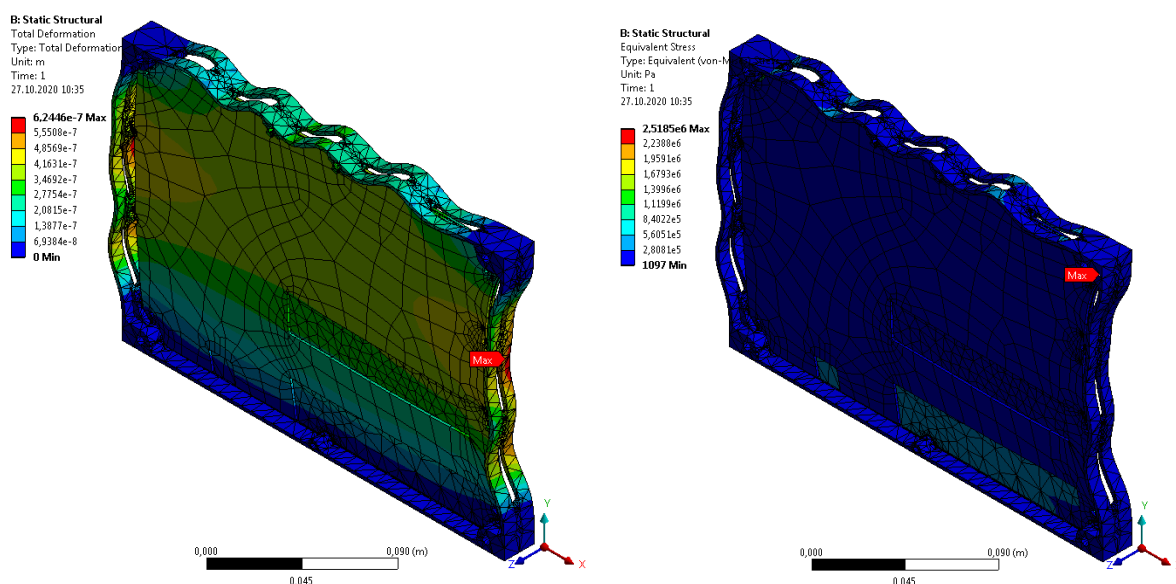


Рисунок 24 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №2 по оси OX

Расчет на воздействие статических нагрузок по оси OY.

Реакция конструкции на воздействие статических нагрузок определялись в пакете ANSYS. Требования по данному воздействию заданы в таблице 2.

Максимальные перемещения:

№2 0,0009 мм рисунок 25 слева.

Минимальный запас прочности:

№2 1,3 МПа рисунок 25 справа.

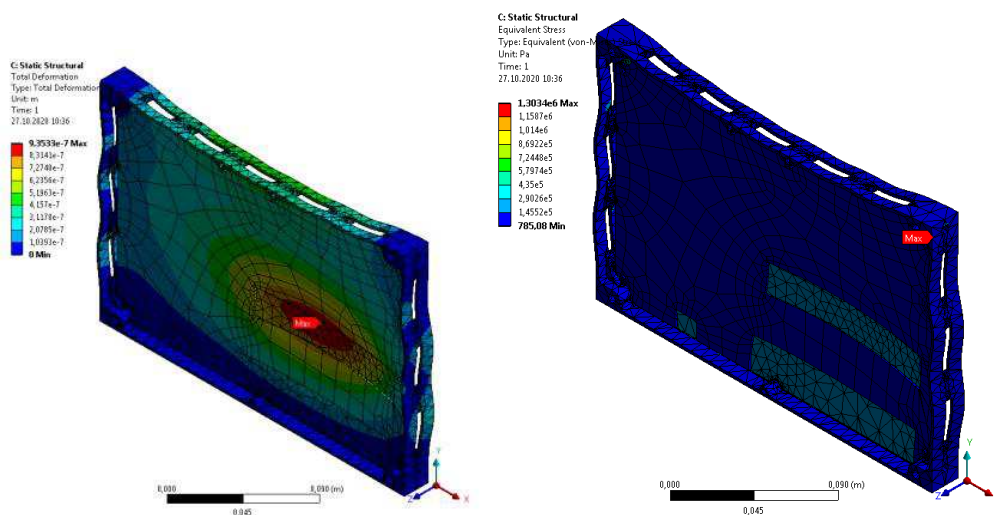


Рисунок 25 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №2 по оси OY

Расчет на воздействие статических нагрузок по оси OZ.

Реакция конструкции на воздействие статических нагрузок определялись в пакете ANSYS. Требования по данному воздействию заданы в таблице 2.

Максимальные перемещения:

№2 0,1 мм рисунок 26 слева.

Минимальный запас прочности:

№2 25,0 МПа рисунок 26 справа.

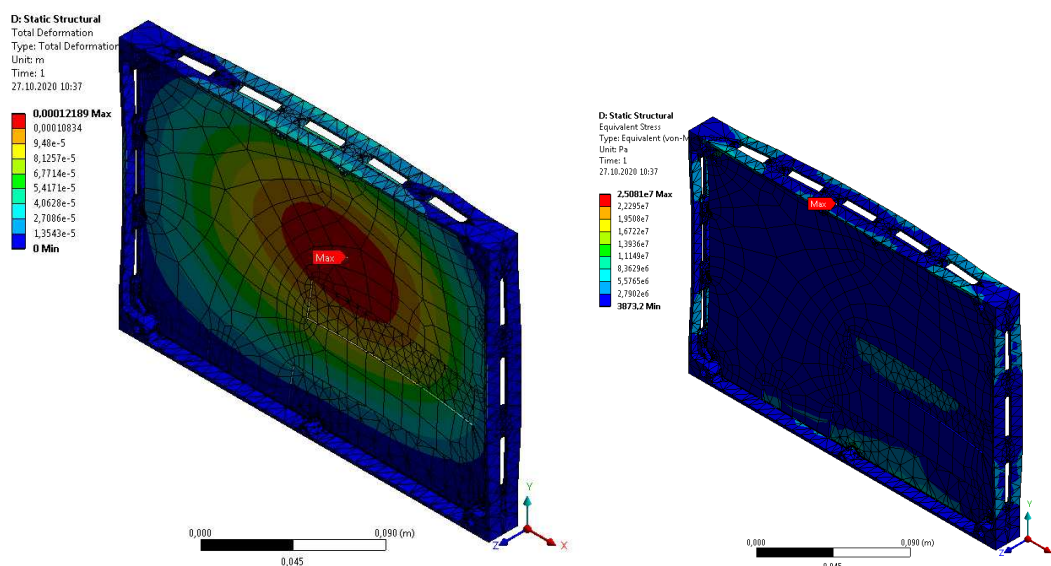


Рисунок 26 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №2 по оси OZ

Свели значения конструкции номер 2 по осям OX, OY, OZ в таблицу 4.
Таблица 4 – Значения максимальных напряжений и соответствующие им запасы при статических нагрузках

Материал	Предел текучести (σ_T) Предел прочности (σ_B), МПа	Номер исследуемого варианта конструкции №2					
		Ось OX		Ось OY		Ось OZ	
		Мах. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)	Мах. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)	Мах. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)
Алюминий	155 (σ_T)	2,5	>10	1,3	>10	25,0	>10
Стеклотекстолит	300 (σ_B)	0,4		0,2		5,9	
Время проведения расчета, сек		9,8		10,1		10,3	

Второй этап упрощения.

Исправлены ошибки модели: зазоры от элементов и пересекающиеся области модели, убраны короткие ребра модели, рисунок 27 общий вид получившейся конструкции.

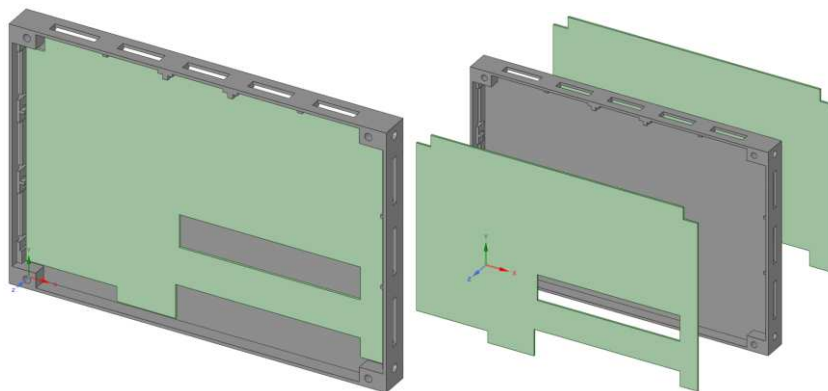


Рисунок 27 – Общий вид конструкции №3

Конечно-элементная модель (КЭМ) создана для расчета в пакете ANSYS. Общая масса элементов геометрически отсутствующих в моделях (ЭРИ, соединители и пр.) равномерно распределялась по поверхностям, где предполагается их наличие. КЭМ конструкций представлена на рисунке 28.

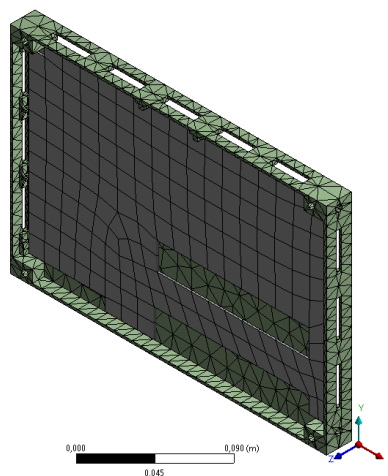


Рисунок 28 – Количество узлов 17798. Количество элементов 7483
КЭМ – исследуемой конструкции

Граничные условия: нижняя плоскость (подошва) рамки, боковые отверстия для крепления рамки в приборе – жесткая заделка.

Результаты расчета.

Расчет на воздействие статических нагрузок по оси OX.

Реакция конструкции на воздействие статических нагрузок определялись в пакете ANSYS. Требования по данному воздействию заданы в таблице 2.

Максимальные перемещения:

№3 0,0006 мм рисунок 29 слева.

Минимальный запас прочности:

№3 1,5 МПа рисунок 29 справа.

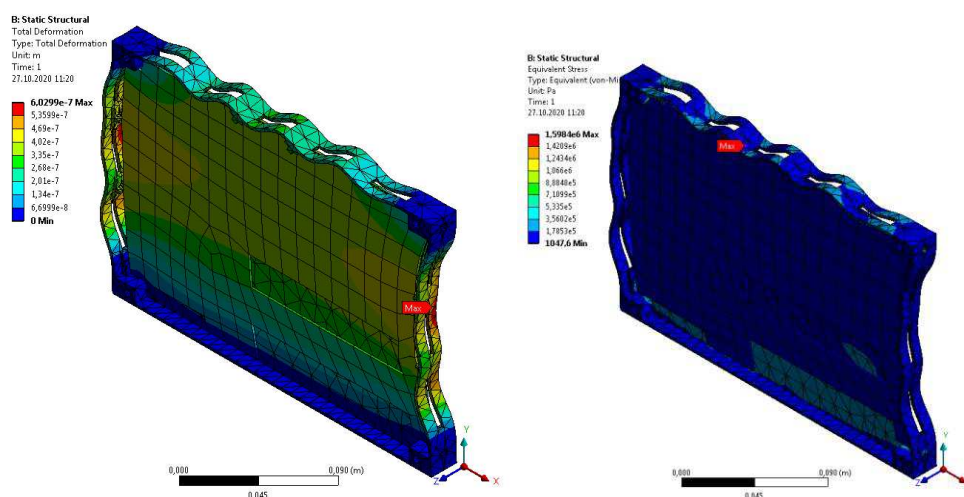


Рисунок 29 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №3 по оси OX

Расчет на воздействие статических нагрузок по оси OY.

Реакция конструкции на воздействие статических нагрузок определялись в пакете ANSYS. Требования по данному воздействию заданы в таблице 2.

Максимальные перемещения:

№30,0007 мм рисунок 30 слева;

Минимальный запас прочности:

№30,6 МПа рисунок 30 справа.

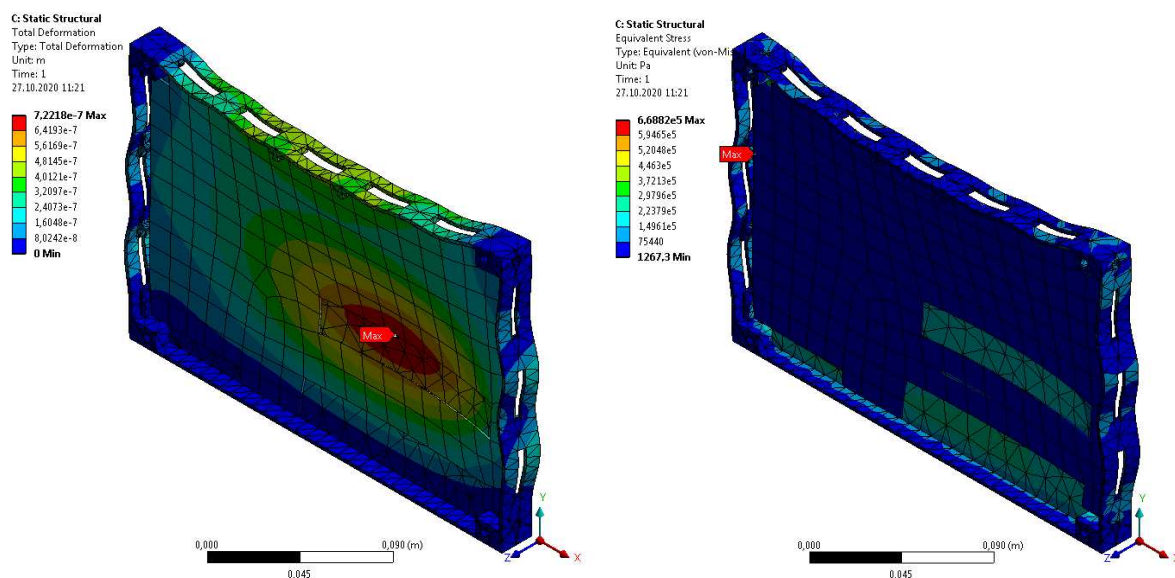


Рисунок 30 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №3 по оси OY

Расчет на воздействие статических нагрузок по оси OZ.

Реакция конструкции на воздействие статических нагрузок определялись в пакете ANSYS. Требования по данному воздействию заданы в таблице 2.

Максимальные перемещения:

№3 0,1 мм рисунок 31 слева.

Минимальный запас прочности:

№3 13,6 МПа рисунок 31 справа.

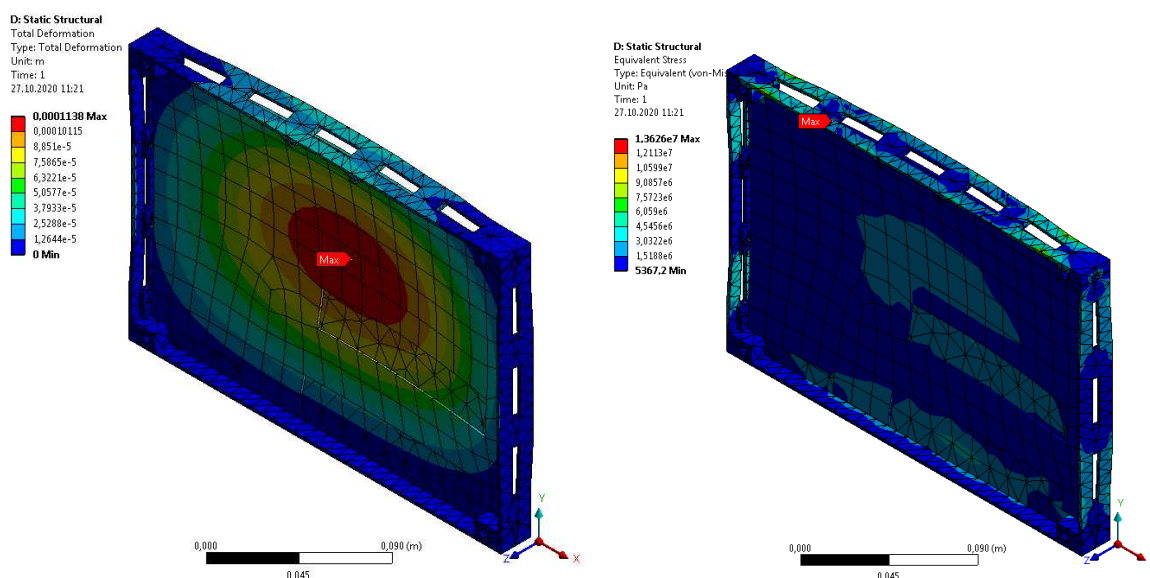


Рисунок 31 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №3 по оси OZ

Свели значения конструкции номер 3 по осям OX, OY, OZ в таблицу 5. Таблица 5 – Значения максимальных напряжений и соответствующие им запасы при статических нагрузках

Материал	Предел текучести (σ_T) Предел прочности (σ_B), МПа	Номер исследуемого варианта конструкции №3					
		Ось OX		Ось OY		Ось OZ	
		Мах. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)	Мах. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)	Мах. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)
Алюминий	155 (σ_T)	1,5	>10	0,6	>10	13,6	>10
Стекло текстолит	300 (σ_B)	0,2		0,09		2,6	
Время проведения расчета, сек		3,5		3,5		3,4	

3 Проведение испытаний модуля бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата

Современный космический аппарат (КА) представляет собой сложную техническую систему, в состав которой входят силовая конструкция и навесное оборудование, подсистемы энергопитания, ориентации, стабилизации, ретрансляции, механические устройства отделения и развертывания рефлекторов антенн и солнечных батарей. Повышенные требования к надежности, обеспечению не разрушения и нормального функционирования космической техники приводят к необходимости разработки методов обеспечения соответствия технического состояния космических аппаратов требованиям норм прочности и правилам приемки. Один из таких методов – выявление конструктивных и производственно-технологических дефектов конструкции, агрегатов и систем КА на этапах их наземной экспериментальной отработки (НЭО) и производства. Эти дефекты оказывают, как правило, непосредственное влияние на структурные параметры, характеризующие техническое состояние КА, поэтому их контроль является актуальной задачей.

Все полностью собранные и укомплектованные оборудованием КА подвергаются технологическим вибрационным испытаниям, в основу которых заложено использование режимов, вынужденных колебаний. Целью испытаний является определение параметров динамической реакции изделий на заданное вибрационное воздействие. Под такими параметрами понимаются резонансные частоты, формы и коэффициенты демпфирования собственных тонов колебаний конструкций, амплитудно-частотные и фазово – частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ), спектральные плотности мощности (СПМ) случайной вибрации. При этом в результатах испытаний могут обнаруживаться отклонения этих параметров либо от соответствующих расчетных значений, либо от величин, полученных ранее при испытаниях однотипных изделий. Возможны и различия характеристик, присущие симметричным объектам. Такие отклонения являются, как правило, следствием возникновения в КА конструктивных или

производственнотехнологических дефектов, для обнаружения которых необходима разработка методик и средств вибрационных испытаний.

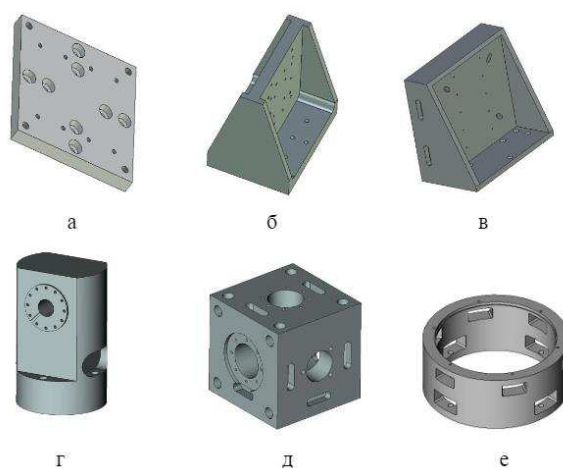
3.1 Методика и средства вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры для контроля их технического состояния

Наиболее интенсивное вибрационное воздействие на космический аппарат происходит при его выведении на орбиту. Разрушения конструкции и отказы оборудования из-за вибрационных нагрузок свидетельствуют о их недостаточной прочности и виброустойчивости. Это может привести к нарушению выполнения функций КА и даже к его потере.

Одной из основных целей вибрационных испытаний является подтверждение вибропрочности конструкции бортовой РЭА и виброустойчивости электронного оборудования. Кроме того, в этих испытаниях экспериментально определяются динамические характеристик бортовой РЭА в стартовом положении: резонансные частоты, амплитуды ускорений в различных точках конструкции. Для достижения этих целей бортовой РЭА устанавливается на вибрационный стенд. Соединение бортовой РЭА с возбудителем колебаний производится через специальное технологическое приспособление, называемое адаптером. Для контроля вибраций бортовой РЭА на его конструкцию устанавливают виброизмерительные преобразователи (ВИП), которые подключаются к системе регистрации. В месте соединения бортовой РЭА с адаптером устанавливается ВИП контроля испытательного режима (задающий ВИП), который подключается к системе управления через канал обратной связи.

3.1.1 Средства адаптирования электродинамического вибратора к механическому интерфейсу бортовой радиоэлектронной аппаратуры

Одними из основных требований к вибрационным испытаниям бортовой РЭА является выполнение граничных условий закрепления объекта исследований и условий нагружения в местах приложения динамических сил. Для этой цели используются специальные переходные технологические устройства (адаптеры), связывающие вибростенд с устройством бортовой РЭА рисунок 32. Эти адаптеры должны обеспечить минимальные потери и искажения параметров вибрации при передаче возбуждения от вибратора к объекту испытаний. Кроме того, адаптеры должны обеспечить строго возвратно-поступательное движение в направлении действия силы вибратора. Необходимость выполнения этих требований особенно важна при возбуждении вибраций в горизонтальном направлении к вертикально расположенному бортовой РЭА, когда точка приложения нагрузки не совпадает с центром масс всей динамической системы. В этом случае образуется момент пары сил, который необходимо компенсировать: инерционной силы и силы возбуждения колебаний [9].



а – плита; б – уголок; в – основание; г – стойка; д – куб; е – подставка

Рисунок 32 – конструкции адаптеров

3.1.2 Вибростенд для испытания бортовой радиоэлектронной аппаратуры

Вибростенд является исполнительным органом вибрационной установки и обеспечивает воспроизведение и передачу на объект требуемой вибрации. Тип и свойства вибростенда определяют основные характеристики установки –как энергетические (вынуждающая сила, грузоподъёмность, амплитуда перемещения, скорости или ускорения, диапазон частот), так и метрологические (допуски, гармонические искажения, колебания в поперечном направлении и т.д.). Вибростенд показан на рисунке 33 [10].



Рисунок 33 – Вибростенд LDSV8 – 440 для испытания бортовой РЭА

Технические характеристики:

- диаметр подвижной катушки, мм: 440;
- масса подвижной катушки, кг: 42;
- перемещение от пика до пика, мм: 63,5;
- выталкивающее усилие, кН: 42;
- макс. Ускорение (синус), g: 102;
- виброскорость (синус), пик., м/с: 1,8;
- выталкивающее усилие ШСВ, кН: 47,1;

- макс. Полусинус, g: 85;
- выталкивающее усилие при виброударе, кН: 84,5;
- диапазон рабочих частот, Гц: 0 - 6 300;
- грузоподъемность вибростенда, кг: 700.

3.1.3 Схема виброиспытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры

В общем виде блок-схема механических испытаний представлена на рисунке 34.

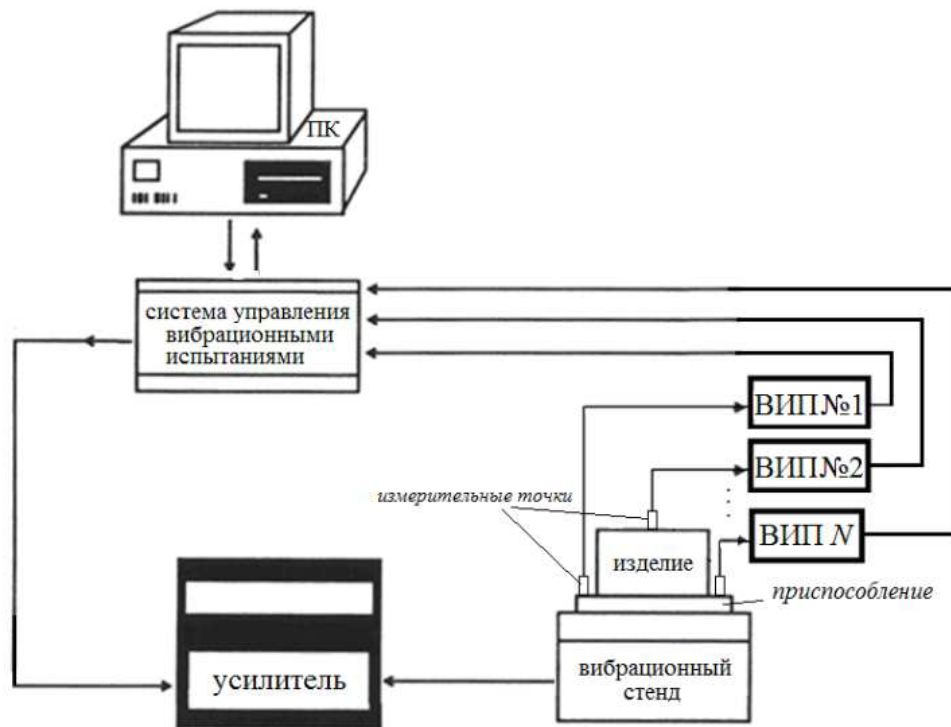


Рисунок 34 – схема виброиспытаний бортовой РЭА

Сигнал, генерируемый системой управления, подается на усилитель. Затем усиленный сигнал передается на вибростенд, где электрический сигнал преобразуется в механическое перемещение платформы стенда, обеспечивая необходимую частоту и амплитуду колебаний.

Для проведения испытаний изделие должно быть механически соединено с платформой вибростенда непосредственно или с помощью жесткого крепежного приспособления [11].

Измерительные точки подразделяется на проверочные и контрольные.

Проверочная точка–точка, расположенная на крепежном приспособлении и, платформе вибростенда или на изделии, как можно ближе к одной из точек крепления, и, в любом случае, жестко связанная с ней. При испытаниях может быть использовано несколько проверочных точек. Контроль параметров требуемого испытательного режима осуществляется в контрольной точке, которую выбирают на платформе вибростенда или на крепежном приспособлении, возможно ближе к одной из точек крепления изделия.

Точка крепления – это часть изделия, находящаяся в контакте с крепежным приспособлением или вибрационным столом в том месте, где изделие обычно крепят в процессе эксплуатации [12].

ВИП устанавливаются посредством резьбовых шпилек или воскоканифольной мастики.

3.1.1 Методики вибрационных испытаний и технические требования к экспериментальному оборудованию

Представленная ниже методика вибрационных испытаний космических аппаратов для контроля их технического состояния используется только применительно к вновь создаваемым опытным образцам космической техники. Исследованиями именно этих образцов обеспечивается вибрационная прочность конструкции серийной бортовой РЭА. Важно отметить, что на опытных изделиях весь комплекс навесного оборудования заменен соответствующими массово-габаритными макетами. Поэтому проблема вибрационной устойчивости этого оборудования решается индивидуально на каждом серийном бортовом РЭА по результатам испытаний на воздействие вибраций эксплуатационного уровня.

Методика вибрационных испытаний бортовой РЭА представляет собой несколько этапов экспериментальных исследований. На первом этапе конструкция бортовой РЭА нагружается синусоидальной вибрацией, амплитуда ускорения которой поддерживается постоянной, а частота колебаний медленно изменяется. При этом уровень вибрационного воздействия на бортовую РЭА устанавливается минимально возможным для преодоления демпфирования колебаний конструкции. Этот этап называют еще частотными испытаниями, имея в виду их цель – определение резонансных частот. Результатами испытаний являются зависимости амплитуд ускорения в ряде контрольных точек бортовой РЭА от частоты вибрационного воздействия, т. е. амплитудно-частотные характеристики ускорения.

По значениям резонансных характеристик, полученных после анализа АЧХ, оценивается соответствие жесткостных характеристик конструкции бортовой РЭА их проектным значениям. Кроме того, на основе предположения о линейности колебательной системы составляется прогноз отклика бортовой РЭА на входное вибрационное воздействие при изменении уровня нагружения. И в первую очередь такой прогноз делается для нормированного режима испытаний по условиям вибрационной прочности бортовой РЭА. По результатам сделанного прогноза и с использованием расчетной модели КА оценивается возможность возникновения разрушений в конструкции изделия при воздействии нормированной вибрации. Если такая оценка дает положительный результат, то производится доработка бортовой РЭА с последующим повторением первого этапа вибрационных испытаний.

Вторым этапом вибрационных испытаний являются испытания на воздействие нормированных нагрузок. После анализа полученных АЧХ и осмотра конструкции бортовой РЭА на предмет повреждений принимается решение об определении несущей способности изделия, т. е. об увеличении уровня вибрационного воздействия до такого состояния, когда появляются первые потери прочности конструкции. Места, в которых обнаружены повреждения из-за недостаточной прочности, объявляются «слабыми», и

принимается решение о их доработках. Для проверки эффективности доработок испытания повторяются. По результатам испытаний делается заключение о фактическом запасе вибрационной прочности.

Следует отметить, что способы нагружения бортовой РЭА в процессе вибропрочностных испытаний по описанной выше методике могут быть различными в зависимости от конструкции бортовой РЭА, предъявляемых к ним технических требований и оснащённости экспериментальных лабораторий. Например, управление вибрацией может осуществляться по нескольким ВИП одновременно с применением средств автоматизации, испытания могут производиться на воздействие широкополосной случайной вибрации.

Основными требованиями, предъявляемыми к средствам вибрационных испытаний бортовой РЭА для контроля их технического состояния, являются моделирование задаваемых условий нагружения, обеспечение повторяемости этих условий в течение установленного времени с определенной точностью, регистрация и обработка экспериментальных данных. Эти требования подпадают под действия государственных и отраслевых стандартов, регламентируемых «Положением о порядке создания, производства и эксплуатации ракетных и космических комплексов» [13]. Так, например, средства измерений должны соответствовать требованиям стандартов Государственной системы обеспечения единства измерений. Стандартами установлены погрешности поддержания режима вибрационного нагружения:

- по амплитуде виброускорения $\pm 20\%$;
- по частоте основной гармонической составляющей – от 5 до (10 ± 2) Гц;
- по частоте основной гармонической составляющей – свыше 10 Гц $\pm 2\%$;
- по среднеквадратическому значению ускорения случайной вибрации ± 3 дБ.

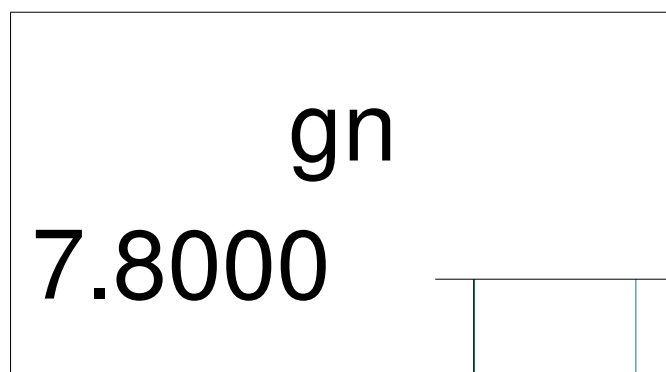


Рисунок 36 – Результаты поиска резонансных частот конструкции прибора по оси OX

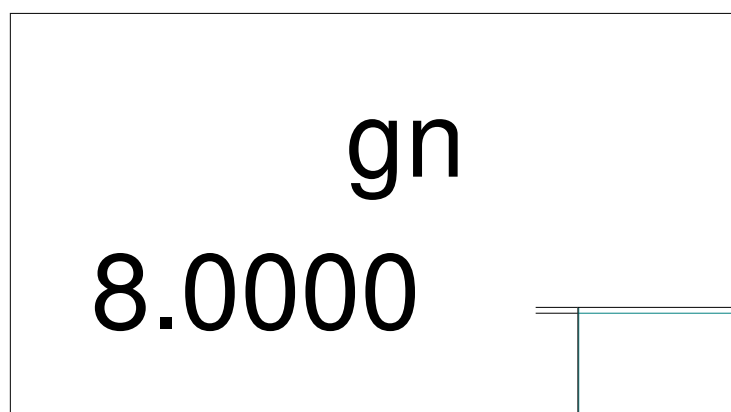


Рисунок 37 – Результаты поиска резонансных частот конструкции прибора по оси OY

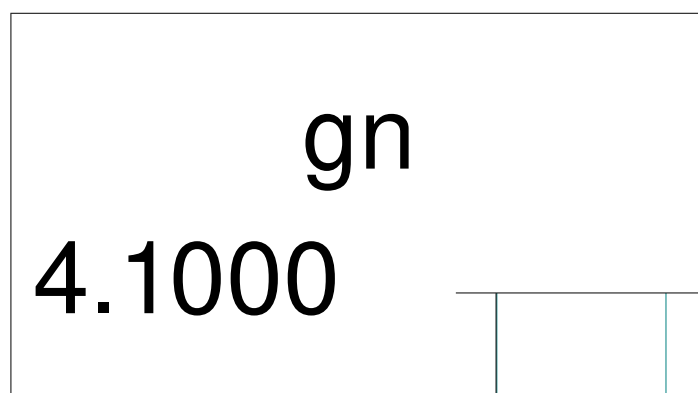


Рисунок 38 – Результаты поиска резонансных частот конструкции прибора по оси OZ

Необходимо проверить принятые конструкторско-технологические решения на прочность при воздействии квазистатических нагрузок.

Резонансные частоты элементов конструкции должны быть больше 150 Гц.

Результаты расчета.

Модальный анализ проводился на КЭМ, показанных на рисунках 18, 23, 28. Для расчета использовался пакет ANSYS. В таблице 6 представлены результаты поиска резонансных частот.

Таблица 6 – Результаты поиска резонансных частот

Мода. №	Частота (№1), Гц	Частота (№2), Гц	Частота (№3), Гц
1	446	252	261
2	869	461	490
3	1042	635	666
4	1404	772	832
5	1690	948	1032
6	1829	1129	1185
Время проведения расчета, сек	320,0	15,3	5,5

3.2 Алгоритмы обработки результатов испытаний

3.2.1 Виды сигналов, первичная обработка данных

Отклик динамической системы на управляемое воздействие оценивают по сигналам, получаемым от датчиков различных типов (акселерометров, тензорезисторов, микрофонов и т. п.), установленных в различных точках бортовой РЭА. Указанные сигналы характеризуются весьма сложным спектром, и для того, чтобы получить объективную информацию о характеристиках

колебательных процессов, сигналы необходимо подвергать первичной обработке.

Для анализа динамических свойств и дефектов бортовой РЭА применяются два вида нагружения в вибрационных испытаниях: испытания на синусоидальные воздействия; испытания на воздействие широкополосной случайной вибрации (ШСВ).

В первом случае частота возбуждения может быть либо фиксированной, либо так или иначе зависеть от времени. Как правило, зависимость частоты от времени экспоненциальная и характеризуется скоростью развертки в октавах в минуту. Сигналы в этом случае являются квазипериодическими и сопровождаются сигналом частотного канала, по которому определяют мгновенное значение частоты возбуждения. Представляет интерес как полный отклик объекта на задающее воздействие в точках установки датчиков, так и амплитуда и фаза синусоидальной компоненты, соответствующей частоте возбуждения. Следовательно, в результате обработки для всех измерительных каналов должны быть получены как зависимости полного сигнала (среднеквадратичные значения), так и амплитуды основной гармоники и фазы от частоты возбуждения.

Основная гармоника – это синусоидальная функция с частотой, равной частоте возбуждения, аппроксимирующая исследуемый сигнал на выбранных временных интервалах. Обработка основана на принципе аппроксимации по методу наименьших квадратов, в соответствии с которым среднеквадратичное отклонение значений функции от значений сигнала минимизируется на выборке заданной длительности.

Во втором случае спектр задающего сигнала определяется режимом нагружений. Частотный диапазон для этого вида испытаний – от 20 до 10 000 Гц. Сигналы, подвергаемые такой обработке, являются стационарными широкополосными случайными сигналами. Результатом обработки могут быть спектральные плотности мощности или взаимные спектры анализируемых

сигналов. При изучении свойств случайных колебаний понятие спектральной плотности мощности сигнала является ключевым.

С физической точки зрения спектральный анализ представляет собой пропускание сигналов через гребенку узкополосных фильтров, перекрывающих анализируемый диапазон частот. На выходе каждого из этих фильтров определяют среднеквадратичное значение амплитуд пропущенного сигнала (мощность сигнала в полосе пропускания). Очевидно, что мощность этого сигнала пропорциональна ширине фильтра. Величина, характеризующая сам сигнал на заданной частоте и не зависящая от ширины фильтра, образуется отношением мощности к ширине полосы пропускания, это и есть спектральная плотность мощности.

Важнейшая особенность сигналов – их зашумленность присутствием паразитных частотных составляющих, возникающих, например, вследствие работы мощных электрических машин. Кроме того, в конструкциях КА имеются различные конструктивно необходимые зазоры, которые в испытаниях порождают нестационарные отклики ударного типа. Борьба с подобной информацией в сигналах требует специальных алгоритмов при вычислении характеристик истинных спектров конструкции КА.

К обработке принимаются дискретизированные сигналы, которые получают следующим образом: регистрируемый физический сигнал (например, ускорение) преобразуется датчиком в аналоговый сигнал по напряжению, который приводится к номинальному диапазону напряжений усилителем, а затем подвергается антиалайзинговой фильтрации. При этом фильтр нижних частот «вырезает» все составляющие сигнала, превышающие некоторую частоту f_{\max} .

3.2.2 Выявление дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры

Вибрационная диагностика конструктивных и производственно-технологических дефектов конструкций осуществляется по изменениям

динамических характеристик объектов контроля при возникновении таких дефектов. Как отмечалось выше, такими характеристиками являются резонансные частоты, формы, обобщенные массы и коэффициенты демпфирования собственных тонов колебаний конструкций, амплитудно-частотные и фазовочастотные характеристики, спектральные плотности мощности случайной вибрации. По параметрам вибраций можно выявить следующие типовые дефекты конструкции бортовой РЭА: нарушение целостности (трещины, расслоения, разрушения межблочных связей электронного оборудования), ослабление креплений, образование зазоров в местах стыковки.

3.2.3 Идентификация дефектов бортовой радио электронной аппаратуры по результатам вибрационных и акустических испытаний

Для идентификации дефектов бортовой РЭА по результатам вибрационных и акустических испытаний необходимо определить идентификационные признаки таких дефектов. Это означает установление связи между изменениями динамических свойств объекта контроля и параметрами дефектов для обоснования методики их идентификации.

Будем считать, что в конструкции бортовой РЭА в местах, подлежащих контролю, установлены датчики ускорений. Такими местами могут быть, например, особо ответственные элементы, а также отдельные наиболее нагруженные зоны. Контролю подлежат целостность конструкции и межблочных связей оборудования, качество крепления и стыковки.

Известные методы виброредфектоскопии для идентификации дефектов используют, как правило, изменения характеристик собственных тонов колебаний бортовой РЭА. Причем связь между параметрами дефектов и величинами изменений собственных частот, форм и декрементов колебаний устанавливается принятой математической моделью исследуемой конструкции, а характеристики собственных тонов определяются экспериментально.

Наряду с идентификацией дефектов по модальным характеристикам конструкций применительно к бортовой РЭА целесообразным является качественный контроль целостности конструкции и крепления агрегатов по таким параметрам вибраций, как амплитудно-частотная характеристика, гармоническая и спектральная плотность мощности широкополосной случайной вибрации бортовой РЭА. Качественный контроль предполагает обнаружение местоположения и вида дефекта. При этом для количественной оценки величин дефектов (если она необходима) для каждого объекта контроля нужны дополнительные экспериментальные или расчетные исследования.

Выбор АЧХ и СПМ случайной вибрации в качестве идентификационных признаков дефектов основан на том, что в вибрационных испытаниях могут воспроизводиться как гармонические (полигармонические), так и случайные вибрации. Это зависит от особенностей конструкции бортовой РЭА и от его эксплуатационной нагруженности на этапе вывода на орбиту. Отметим также, что использование в качестве идентификационных признаков модальных характеристик конструкций, полученных в результате операционного модального анализа при одноточечном возбуждении колебаний, не всегда целесообразно. Во-первых, погрешности определения собственных частот колебаний могут значительно превышать их изменения из-за появления эксплуатационных дефектов. Это объясняется тем, что идентификация дефектов в большинстве случаев производится в области частот высоких собственных тонов колебаний, где точность модального анализа может оказаться невысокой. Во-вторых, погрешности в собственных формах колебаний, используемых для выявления местоположений дефектов, обычно на порядок выше погрешностей в собственных частотах. Кроме того, для определения собственных форм (особенно высоких тонов) требуется большое количество датчиков вибраций.

Для определения места в конструкции бортовой РЭА, в котором возник дефект, воспользуемся результатами измерений АЧХ и СПМ всеми датчиками вибраций в процессе испытаний объекта контроля. Появление отклонений в этих

характеристиках, фиксируемых конкретными датчиками с известными координатами положения, укажет на места повреждения.

3.2.4 Методика выявления дефектов. Особенности виброакустической диагностики бортовой радиоэлектронной аппаратуры открытого исполнения

Для выявления дефектов в конструкции космического аппарата по параметрам вибраций динамические испытания бортовой РЭА проводятся в три этапа.

На первом этапе выполняется зондирующее вибрационное нагружение бортовой РЭА с низкой интенсивностью и регистрация откликов конструкции по сигналам акселерометров. Полученные экспериментальные данные о динамических характеристиках изделия – резонансных частотах, формах, обобщенных массах и демпфировании собственных тонов колебаний, АЧХ и ФЧХ – сравниваются с этими характеристиками, заложенными в конструкцию бортовой РЭА при его проектировании. Отклонение динамических характеристик от проектных значений может свидетельствовать о наличии в бортовой РЭА дефектов, возникших при его проектировании и изготовлении. Кроме того, одной из задач этого этапа является составление прогноза поведения конструкции при нормированном вибрационном воздействии.

Суть второго этапа заключается в «раскачке» конструкции вибрационным воздействием такой интенсивности, при которой должны проявиться дефекты.

Несмотря на то, что полет бортовой РЭА в составе космического аппарата на орбиту происходит в условиях воздействия вибраций высокого уровня, режимы вибрационных испытаний должны выбираться таким образом, чтобы они не оказывали влияния на качество исполнения бортовой РЭА. Следовательно, режимы вибрационного нагружения обязаны, с одной стороны, быть безопасными, а с другой – способствовать проявлению дефектов. На этом

этапе обязательны расчеты безопасных режимов, которые выполняются по методике с использованием экспериментальных данных первого этапа.

Третий этап является повторением первого с последующим сопоставлением результатов испытаний с полученными на первом этапе испытаний. По изменениям идентификационных признаков определяются место и характер дефекта [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения квалификационной выпускной работы был рассмотрен подход к упрощению 3D – модели САД – системы до уровня пригодного для проведения моделирования с применением САЕ-системы и проведена проверка аналитическим и экспериментальным методом.

Решены все поставленные задачи. Проанализированы возможные ошибки модели при интеграции из САД модели в САЕ модель. Анализ ошибок позволил предложить варианты упрощения модели. Для конструкции типа бортовой РЭА возможны 2 варианта упрощения: упрощение модели полностью и частичное упрощение.

После расчета моделей на прочность определили, что требования ТЗ соответствует – $F_1 > 150$ Гц; целостность конструкции соблюдена – запас прочности больше 1. Определили время расчета для каждой конструкции.

Для проверки проведённой теоретической части был изготовлен макет аналогичный рассмотренной модели. Расчет помог определить место установки датчика. Были проведены испытания, повторяющие все виды нагрузок, которые считали торическим методом, а именно статические и резонансные нагрузки.

Рассмотрены 3 этапа расчетов с показаниями эксперимента.

1 Вариант, начальной конструкций был посчитан за 217 секунд, а погрешность расчетов между теоретическим и экспериментальным расчетом составила 61%.

2 Вариант, частичное упрощение, был посчитан за 10 секунд, а погрешность расчетов между теоретическим и экспериментальным расчетом составила 31%.

3 Вариант, полное упрощение, был посчитан за 3,5 секунд, а погрешность расчетов между теоретическим и экспериментальным расчетом составила 33%

Исходя из вышесказанного, мы можем сделать вывод, что 1 вариант нам не подходит из – за большой погрешности, т. к. большая вероятность того, что модель первой конструкции была не корректна для расчета.

2 и 3 варианты, удовлетворительны. Не большая погрешность и значительное сокращение времени расчета, 2 вариант относительно 1 варианту считается в 22 раз быстрее. Вариант 3, так же небольшая погрешность и считается, относительно 1 варианту в 62 раза быстрее.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;
- ВИП – виброизмерительные преобразователи;
- ДУЧП – дифференциальное уравнение в частных производных;
- КА – космический аппарат;
- КЭМ – конечно - элементная модель;
- МКЭ – метод конечных элементов;
- МКР – метод конечных разностей;
- МГЭ – метод граничных элементов;
- ОМД – обработка металлов давлением;
- РЭА – радиоэлектронная аппаратура;
- САПР – система автоматизированного проектирования;
- СПМ – спектральная плотность мощности (сигнала);
- ФЧХ – фазочастотная характеристика;
- ШСВ – широкополосная случайная вибрация;
- ЭВМ – электронно-вычислительная машина;
- ЭРИ – электрорадио изделие;
- CAD/CAM/CAE – системы автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа;
- NMT – самопересекающееся топологическое моделирование;
- LOD – степень детализации;
- LOA – уровень абстракции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Усюкин, В.И. Строительная механика конструкции космических техники: Учебник для студентов вузов / В.И. Усюкин. – Москва: Машиностроение, 1988. – 392 с.
- 2 Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер Пер. с англ. – Москва: Мир, 1984. - 428 с.
- 3 Клованич, С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики/ С.Ф Клованич. - Запорожье: Издательство журнала «Світгеотехніки», 2009. – 400 с.
- 4 Шимановский, А. О. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики: учебно-метод. пособие для студентов технических специальностей / А.О. Шмановский, А.В. Путято. – Гомель: БелГУТ, 2008. – 61 с.
- 5 Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – Санкт Петербург.: Питер, 2004. – 131 с.
- 6 Зыков О. Промышленная автоматизация: движение от САПР к PLM / О. Зыков // IT News. 2005. – №05. – С. 5.
- 7 Гореткина Е. Что такое PLM? / Е. Героткина // PC Week. 2003. – №34. – С. 10 – 13.
- 8 Аникеев, Г.Е. Обзор технологий интеграции CAD и CAE / Г.Е. Аникеев, А.Н. Василец // Нэтворк журнал / Московский Энергетический Институт. - Москва, 2006. – Т. 2. - №9. – С. 33-37.
- 9 Александровская Л.Н. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов и др. – Москва: Логос, 2003. – 736 с.
- 10 ГОСТ Р ИСО 10813-1-2011 Вибрация. Руководство по выбору вибростендов. Ч. 1. Оборудование для испытаний на воздействие вибрации. – Введ. 01.12.2012. Москва: АНО "НИЦ КД", 2012. – 58.

11 Коробов, А.И. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование: Учебное пособие для ВУЗов / А.И. Коробова. – Москва: Радио и связь, 1987. – 272 с.

12 ГОСТ 28231-89 Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Крепление элементов, аппаратуры и других изделий в процессе динамических испытаний, включая удар (Ea), многократные удары (Eb), вибрацию (Fc и Fd), линейное ускорение (Ga) и руководство. – Введ. 01.03,1990. – Москва: Стандартинформ, 1990. – 50 с.

13 РК-11-КТ-2011 Положение о порядке создания, производства и эксплуатации (применения) ракетных и космических комплексов: утв. Роскосмосом 22.12.2011. – Москва.: Роскосмос, 2011. – 200 с.

14 ГОСТ 16962-71 Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний. – Введ. 01.07.1971. Москва: Госстандарт. 1971. – 63.

15 Тестоедов, Н. А. Диагностика конструкций космических аппаратов по результатам вибрационных и акустических испытаний: монография / Н. А. Тестоедов, Е. А. Лысенко, В. А. Бернс. – Красноярск; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т 2016. – 204 с.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
В.Е.Косенко
подпись инициалы, фамилия
«18» 06 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Интеграция CAD – CAE моделей силовой конструкции бортовой аппаратуры
КА при проведении расчета на прочность с использованием метода конечных
элементов»
тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств»
код и наименование направления

15.04.05.02 «Технология космических аппаратов»
код и наименование магистерской программы

Научный
руководитель

18.06.21 доцент МБК ПФиКТ,
подпись, дата канд. физ-мат. наук
должность, ученая степень

А.А. Хвалько
инициалы, фамилия

Выпускник

18.06.21
подпись, дата

А.В. Фищенко
инициалы, фамилия

Рецензент

18.06.21 ведущий инженер-
подпись, дата конструктор АО «ИСС»
имени академика М.Ф.
Решетнева
должность, ученая степень

А.С. Орлов
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

16.06.21 профессор МБК
подпись, дата ПФиКТ, д-р техн.
наук, доцент
должность, ученая степень

В.Е. Чеботарев
инициалы, фамилия

Красноярск 2021