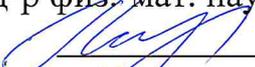


Министерство образования и науки Российской Федерации  
(МИНОБРНАУКИ РОССИИ)  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (ТГУ)  
Физико-Технический Факультет  
Кафедра прикладной газовой динамики и горения

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

д-р физ.-мат. наук, профессор

 Г.Р. Шрагер

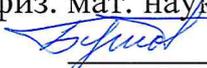
« 23 » июня 2016 г.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО  
КАРКАСА АНТЕННЫ ЗОНТИЧНОГО ТИПА В УСЛОВИЯХ  
ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Магистерская диссертация  
по направлению 15.04.06 – Мехатроника и робототехника  
магистерская программа Моделирование  
робототехнических систем  
Власов Алексей Сергеевич

Руководитель:

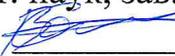
доктор физ. мат. наук, профессор

 В.Г. Бутов

«    »    2016

Консультант:

канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. НИИПММ

 В.А. Солоненко

Автор работы:

Студент гр.10413

 А.С. Власов

Томск 2016

Томский государственный университет  
Физико-технический факультет  
Кафедра прикладной газовой динамики и горения

Руководитель ООП  
д-р физ.-мат. наук, профессор  
 Шрагер Г.Р.  
« 01 » 09 2015 г.

Задание

на выпускную работу магистранта ФТФ *Власова А.С.*

Тема работы: анализ напряженно-деформируемого состояния силового каркаса антенны зонтичного типа в условиях вибрационного воздействия.

Научный руководитель: профессор Бутов В.Г.

Срок представления законченной работы на кафедру: 08 июня 2016 г.

Содержание работы и сроки исполнения:

№	Название раздела работы	Сроки выполнения
1	Проведение литературного поиска по изучаемой проблеме.	01.09.2015- 15.10.2015
2	Формулировка математической постановки задачи напряженно-деформированного состояния антенны зонтичного типа.	15.10.2015- 01.11.2015
3	Разработка метода расчета, написание и отладка программы для ЭВМ.	01.11.2015- 15.02.2016
4	Проведение параметрических исследований (в т.ч. проведение модального и гармонического анализа).	15.02.2016- 01.05.2016
5	Написание отчета.	01.05.2016- 01.06.2016

Рекомендуемая для изучения литература:

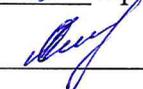
1. Бутов В. Г., Бухтяк М. С., Жуков А. П., Пономарев С. В., Солоненко В. А., Усманов Д. Б., Халиманович В. И., Шипилов Г. В., Ящук А. А. Моделирование вантово-оболочечных конструкций рефлекторов // Ракетно-космическая техника. Фундаментальные и прикладные проблемы механики:

Материалы Международной научной конференции, посв. 90-летию В.И. Феодосьева. Москва, 4-6 мая 2006 г.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 93 с.

2. Усманов Д. Б. Моделирование напряженно-деформированного состояния крупногабаритного трансформируемого рефлектора: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2006. – 179 с.

3. Гряник М. В., Ломан В. И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа – М.: Радио и связь, 1978 – 72 с.: ил.

4. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. Ред. Д.Г.Красковского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.:ил.

Руководитель работы  проф. Бутов В. Г.  
Задание принял к исполнению  Власов А.С.

## РЕФЕРАТ

магистерской диссертации Власова А.С. «анализ напряженно-деформируемого состояния силового каркаса антенны зонтичного типа в условиях вибрационного воздействия»

Диссертация содержит 51 страницу, 26 рисунков, 3 таблицы и 16 источников

Ключевые слова: антенна зонтичного типа, рефлектор, метод конечных элементов, напряженно деформированное состояние, статическое нагружение, модальный анализ, гармонический анализ.

Предметом исследования в настоящей диссертационной работе являлось исследование антенны зонтичного типа при задании граничных условий, соответствующих вибрационному воздействию на конструкцию.

В результате написания данной работы:

- описаны типы крупногабаритных конструкций и черты, присущие определенным видам антенн;

- дано описание моделируемой антенны зонтичного типа, ее особенности построения, достоинства и недостатки на фоне других видов антенн, а также характеристики элементов, составляющих конструкцию рефлектора;

- рассмотрены такие основные темы как: уравнение движения конструкции, модальный и гармонический анализы, метод конечных элементов и построение сетки конечными элементами.

- физическая постановка включает в себя алгоритм построения модели антенны-рефлектора, а также результаты проведения модального и гармонического анализа упрощенной модели на примере металлической пластинки и каркаса рефлектора.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1.	ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ	6
2.	ВВЕДЕНИЕ	7
3.	ТИПЫ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	8
3.1	Антенны зонтичного типа	11
4.	МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	15
4.1	Уравнение движения конструкции	16
4.2	Модальный анализ	17
4.3	Модальный анализ предварительно напряженной конструкции	18
4.4	Гармонический анализ	19
4.5	Динамика переходных процессов	20
4.6	Определение и описание демпфирования	21
4.7	Метод конечных элементов	23
4.8	Построение сетки конечных элементов	26
5.	ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	27
5.1	Алгоритм построения модели антенны	27
5.2	Модальный анализ металлической пластинки	39
5.3	Модальный анализ антенны	43
5.4	Гармонический анализ металлической пластинки	46
5.5	Гармонический анализ антенны	47
6.	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	49
7.	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	50

## **ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

НДС – напряженно-деформированное состояние

АЗТ – антенна зонтичного типа

ГСО – геостационарная орбита

ГУ – граничные условия

МА – модальный анализ

ГА – гармонический анализ

ПП – переходный процесс

НЭ – нелинейные эффекты

МД – матрица демпфирования

МКЭ – метод конечных элементов

КНФ – кусочно-непрерывная функция

СУ – система уравнений

КЭМ – конечно-элементная модель

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время эксплуатация космических конструкций, большинство решаемых задач являются очень важной составляющей научно-технического прогресса и требуют соответствующих затрат на эмпирическое исследование. Исходя из этого, компьютерное моделирование является достаточно эффективной и доступной возможностью анализа таких задач. Также не стоит забывать про исследование и развитие численных методов, которые расширили груз и сферу задач, анализируемых на практике. Данные, полученные благодаря этим методам, используются практически в каждой сфере техники и науки в целом.

При написании работы, была поставлена следующая цель:

Расчет отклика конструкции крупногабаритного трансформируемого рефлектора зонтичного типа при воздействии на него заданных внешних нагрузок.

На данном этапе работы основными задачами являются:

1. Выбор конструкции трансформируемого зонтичного рефлектора;
2. Создание математической модели конструкции трансформируемого рефлектора зонтичного типа;
3. Разработка алгоритма параметрического построения конструкции рефлектора при помощи встроенного языка программирования APDL Ansys;
4. Определение НДС для случая статистического нагружения;
5. Проведение модального и гармонического анализов с учетом напряженного состояния предварительного этапа.

## ТИПЫ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

На сегодняшний день, освоение космоса и создание аэрокосмической техники, в том числе и антенн, является очень важной задачей [1]. В общем случае, разрабатываемые в данный момент времени космические крупногабаритные аппараты, по конструктивным принципам и технологии своего построения делятся на несколько типов, рассмотренных ниже. Их классификацию приводит А.С. Гвамичава [2]. Все эти типы конструкций могут комбинироваться.

*Механические конструкции* – самый распространенный вид конструкций. За счет жесткости каркаса обеспечивается сохранение первоначально заданной формы, вплоть до начала функционирования.

*Центробежные конструкции* – когда конструкция начинает вращаться вокруг центра масс, то возникают центробежные силы, за счет которых и происходит раскрытие, а вследствие этого, и поддержание формы спутников;

*Надувные конструкции* – пневматические конструкции, раскрытие и сохранение формы которых идет из-за избыточного внутреннего давления. Каркас антенны, чаще всего, выполняется в виде надувной подушки (тора), к которой крепятся отражающая и вспомогательная поверхности, которые изготавливаются из синтетических пленок. Такая конструкция антенны показана на рисунке 1.

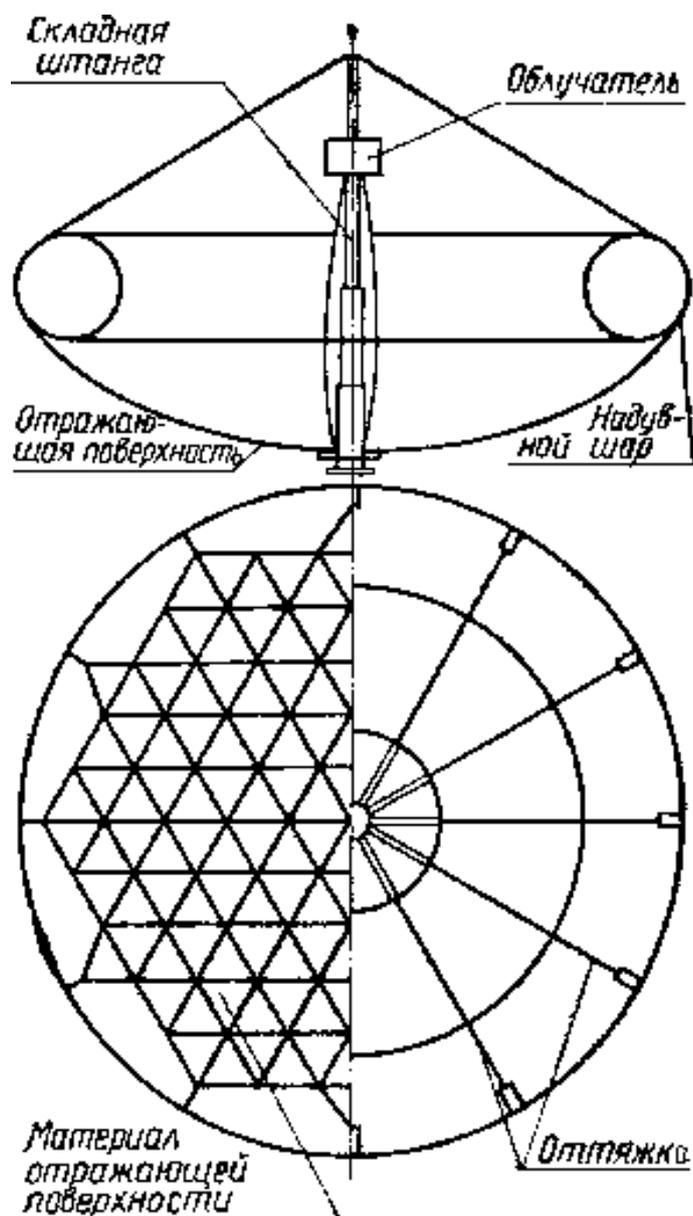


Рисунок 1 – Схема надувной конструкции космической антенны

Натяжение поверхностей обеспечивается давлением в замкнутом объеме, созданным порохами. При помощи системы оттяжек надувной подушки, крепится само облучающее устройство.

Основной недостаток таких антенн – это потеря их работоспособности при пробивании тора космическим мусором, либо метеороидными телами.

*Электростатические конструкции* - благодаря взаимодействию электростатических зарядов происходит поддержание формы такого типа конструкции (рисунок 2).

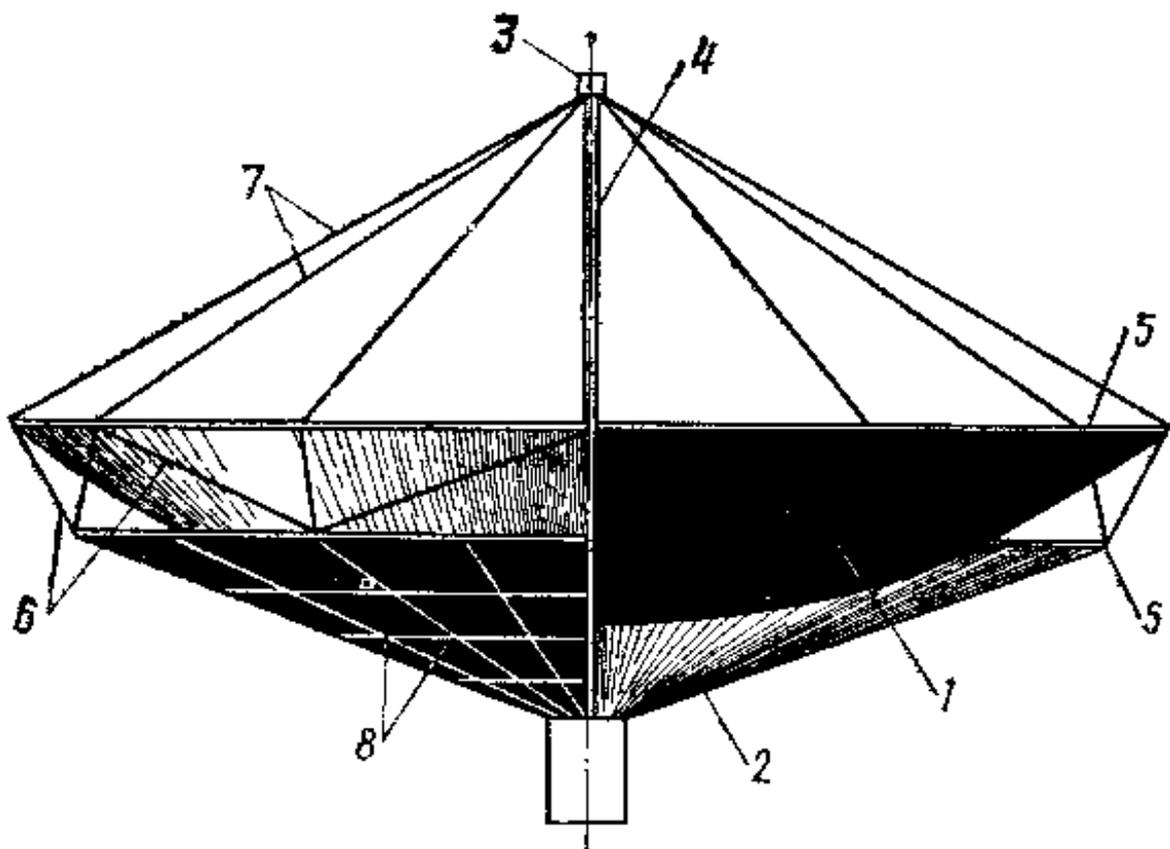


Рисунок 2 – Схема электростатической конструкции; 1 – отражающая поверхность, 2 – вспомогательная поверхность, 3 – облучатель, 4 – штанга, 5 – кольцо жесткости, 6 – растяжки, 7 – валки, 8 – электроды

Такие космические антенны были предложены взамен надувных конструкций, которые были лишены их недостатков и подчеркивали их достоинства. Энергозатраты на поддержание зарядов показывают, что дипольная система является более экономичной. Дипольная система представляет собой взаимодействующие поверхности, заряженные противоположными знаками.

Недостаток конструкции в том, что сила взаимодействия зарядов, согласно закону Кулона, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между заряженными поверхностями.

## Антенны зонтичного типа

Ссылаясь на ряд авторов [2, 3], антенны зонтичного типа – антенны из класса зеркальных, конструкция и принцип работы которой напоминает «зонтик». Складная антенна зонтичного типа, представленная на рисунке 3, сочетает в себе легкость и простоту конструкции, хорошую устойчивость к ветровым нагрузкам, что повышает ее спрос для применения в подвижных станциях. Учитывая их электродинамические характеристики и невысокую стоимость, эти антенны стали давно применять в различных радиотехнических системах. Эти антенны имеют жесткие, складные и гибкие ребра, веревочные элементы (ванты), сетеполотно – так называемую отражающую поверхность, обычно параболической формы, которая крепится вдоль ребер.

Конструкция силового каркаса АЗТ представляет собой комплекс различных деталей, а также соединительных узлов, которые обеспечивают передачу движения отдельным элементам конструкции.

Жесткие спицы, являющиеся элементами формообразующей структуры, располагаются радиально относительно ступицы, с которой они соединены шарнирно, тем самым образуя каркас антенны. Этот каркас поддерживает отражающую поверхность (зеркало), выполненную из тонкой металлической ткани. Перед отправкой на орбиту, антенна и поддерживающие ее форму ваны требуют тщательной укладки, т.к. запутывание их может привести к невозможности раскрытия конструкции. Спицы антенны складываются к оси симметрии антенны.

После вывода антенны на орбиту, происходит ее развёртывание, благодаря упругости материала. Металлическая ткань натягивается, образуя поверхность параболической формы.

Параболические АЗТ используются наиболее часто, по сравнению с антеннами, рассмотренных выше. Такие антенны обладают очень высоким процентом передачи данных даже при низкой мощности.

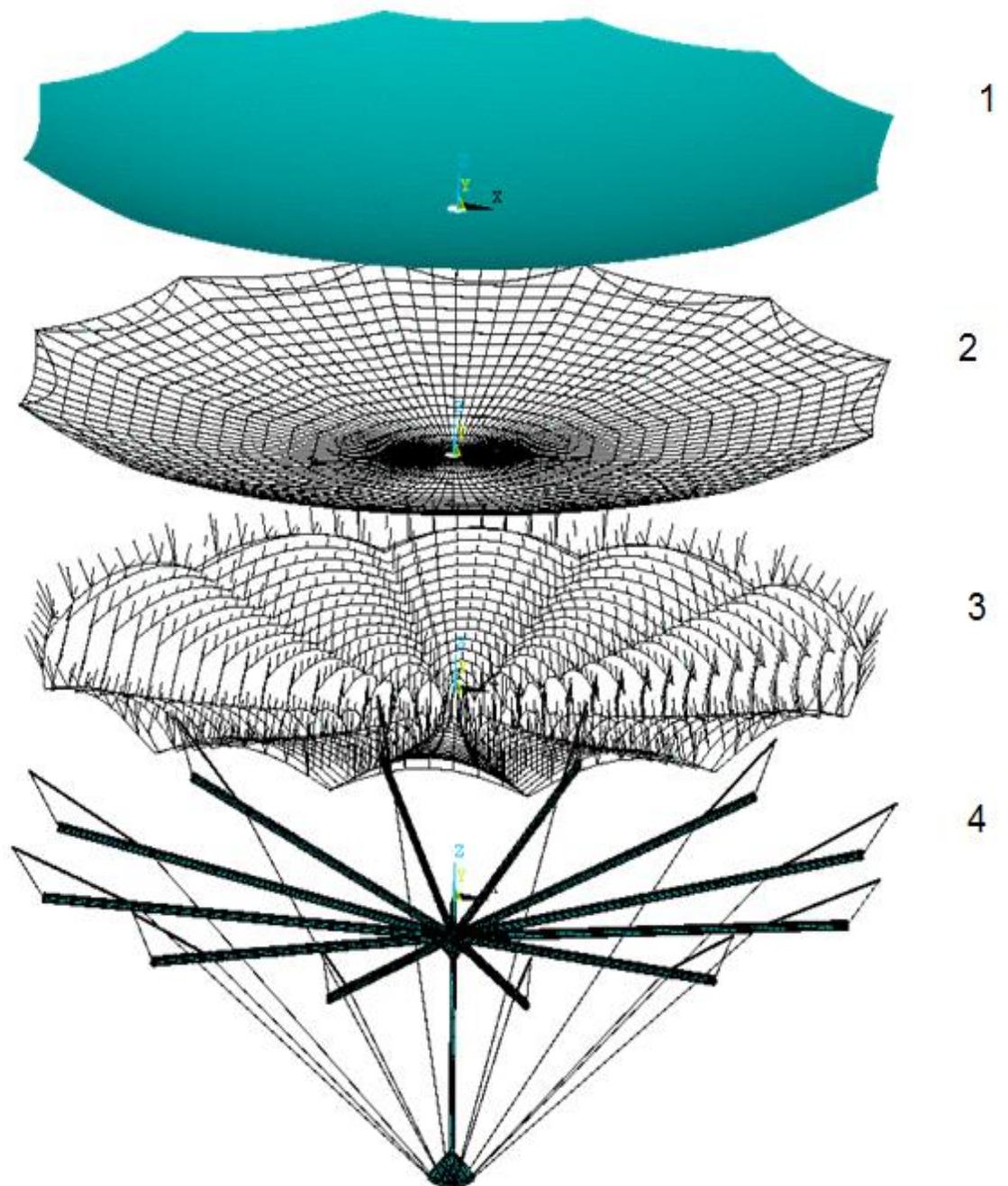


Рисунок 3 – Зонтичный рефлектор, с жесткими спицами, имеющий вантово - оболочечную конструкцию: 1 – радиоотражающая поверхность, 2, 3 – формообразующая структура, 4 – силовой каркас

Как видно из рис.3, антенна состоит из нескольких элементов. Ввиду сложности построения такой конструкции антенны зонтичного типа, в данной работе было принято решение о моделировании более простой ее версии.

В рассматриваемой антенне отсутствуют промежуточные элементы формообразующей структуры фронтальной сети, связывающие фронтальную сеть со спицами, а также такие элементы силового каркаса (тросы, мачта), что упрощает решение поставленной задачи. Жесткие ребра нашей конструкции, которые крепятся непосредственно к ступице, уже находятся в напряженном состоянии. Общий вид конструкции представлен на рисунке 4. В рассматриваемой модели отсутствие ступицы является упрощением модели. Она заменяется соответствующими ГУ в основании спиц.

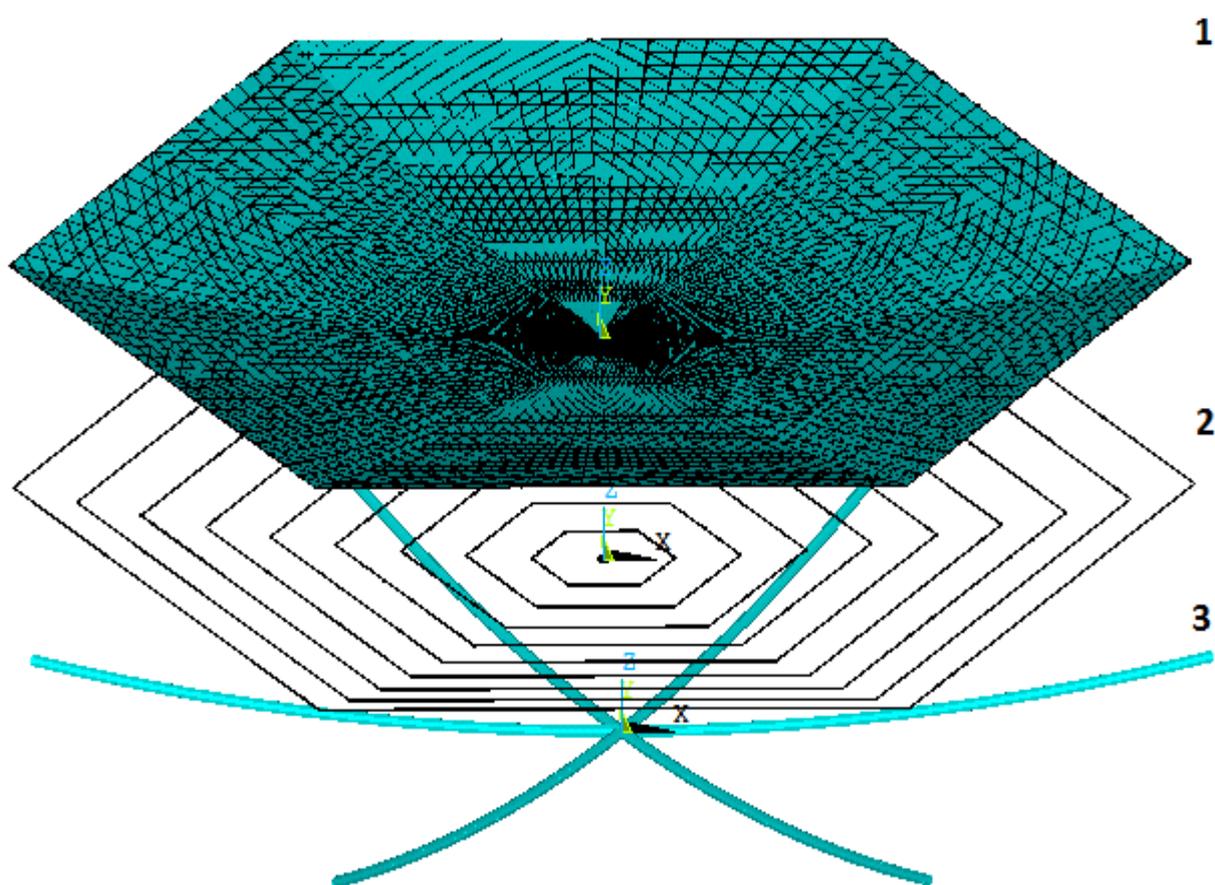


Рисунок 4 – Каркас рассматриваемой антенны: 1 – отражающая поверхность, 2 – формообразующая структура, 3 – жесткие ребра без ступицы

Элементы рефлектора имеют свои характеристики. Авторы, на основании своих опытов, демонстрируют некоторые постоянные величины [4], которые берутся за основу. Например, отражающая поверхность предварительно

растянутая с усилием  $F_{x,y} = const$  - ее эффективная толщина поверхности составляет  $h=10^{-4}$ м. При этом эффективный модуль упругости материала из которого она изготовлена имеет значение  $10^6$  Н/м<sup>2</sup>. Спицы, изготовленные из углепластика, имеющего модуль упругости  $E= 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>, представляют из себя полые трубки, внешний радиус которых  $r_{внешн} = 0,02$ м, с толщиной стенки  $h_0=10^{-3}$ м, которые имеют сечение в виде кольца с внешним радиусом. Вид спицы представлен на рисунке 5:

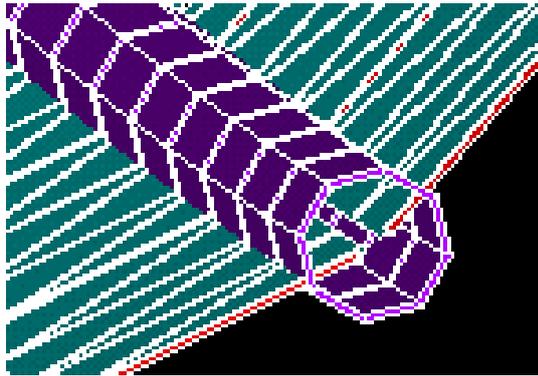


Рисунок 5 – Вид спицы

Элементы формообразующей структуры – веревочные элементы, которые в реальности изготовлены из современных высокотехнологичных материалов, таких как кевлар или других композитных материалов, модуль упругости имеют близкий к значению  $E=10^{11}$ Н/м<sup>2</sup>. С точки зрения кинематики, данные элементы работают только на растяжение, не оказывая никакого сопротивления сжимающей силе. В рассматриваемой задаче их толщина составляет 1 мм.

Предполагается, что закрепление конструкции реализовано в основании ступицы, а отражающая поверхность предварительно растянута с погонным усилием 5 гс/см.

В результате воздействия внутренних усилий, с учетом прикладываемых ГУ, вся конструкция антенны должна принять положение устойчивого равновесия.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве системы определяющих уравнений описывающих напряженно-деформированное состояние (НДС) антенны-рефлектора приведены уравнения сохранения количества движения и уравнения связи смещений, деформаций и механических напряжений в виде [5]:

$$\int_S [\sigma] n^r dS = 0 \quad (1)$$

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

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

где:  $\rho$  - плотность материала в элементарном объеме;

$\vec{F}$  - результирующий вектор массовых сил;

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

$\lambda$  - коэффициент демпфирования материала

$[\sigma] n^r$  - вектор внешних поверхностных сил, выраженный через тензор напряжений и единичный вектор нормали к элементарной площадке на поверхности тела;

$\varepsilon_{ij}$  - компоненты тензора деформаций;

$\sigma_{ij}$  - компоненты тензора напряжений;

$\nu$  - коэффициент Пуассона для материала;

$E$  – модуль упругости материала.

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

$$\overset{p}{u} = \overset{p}{u}^{(s_1)}(t, \overset{p}{x}), \text{ для } \overset{p}{x} \in S_1 \quad (4)$$

$$[\sigma] \overset{p}{h} = \overset{p}{F}^{(s_2)}(t, \overset{p}{x}), \text{ для } \overset{p}{x} \in S_2 \quad (5)$$

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

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

$$\overset{p}{u}(\overset{p}{x}) = \overset{p}{u}_k \psi_k(\overset{p}{x}) \quad (7)$$

В этом случае функция  $\psi_k(\overset{p}{x})$  может рассматриваться как базисная функция для окрестности узла с индексом  $k$ .

Данная задача будет решаться при помощи численных методов, а именно метода Ньютона-Рафсона [6].

### **Уравнение движения конструкции**

Запишем уравнение движения конструкции в виде матричного уравнения:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{F\} \quad (8)$$

здесь  $\{u\}$  – вектор перемещения узлов,  $\{\ddot{u}\}, \{\dot{u}\}$  – векторы ускорений и скоростей точек тела,  $[K], [C], [M]$  – матрицы жесткости, демпфирования и масс соответственно,  $\{F\}$  – вектор эквивалентных узловых сил.

Матрицу демпфирования  $[C]$  можно получить точно также, как и матрицы жесткости и масс. При этом вводится некоторая константа

внутреннего трения, суммируя соответствующие матрицы элементов, но не в общем случае. Демпфирование необходимо для того, чтобы аппроксимировать рассеивание энергии.

Уравнение (8) используется для статического анализа, модального и гармонического.

Моделирование взаимодействия тел возможен с учетом контактного взаимодействия. Следовательно, можно более точно определять компоненты напряженно-деформированного состояния (НДС). [7]

### **Модальный анализ**

Модальный анализ (МА) - это процесс нахождения собственных частот и (мод) колебаний некоторой конструкции. Анализ нацелен на конструкции с линейным поведением. Если встречается любой вид нелинейности – он сразу же игнорируется.

Уравнения свободных колебаний конструкции в матричном виде имеет вид:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (9)$$

Свободные колебания – гармонические вследствие того, что присутствует линейность. Они записываются следующим образом:

$$\{u\} = \{\varphi\}_i \cos \omega_i t \quad (10)$$

где  $\{\varphi\}_i$  – i-й вектор, под которым предполагается мода колебаний, соответствующая i-тый собственной частоте,  $\omega_i$  – i-тая круговая частота, измеряемая в рад/сек, t – время.

Подставим (10) в (9):

$$(-\omega_i^2 [M] + [K])\{\varphi\}_i = 0 \quad (10)$$

Это равенство считается верным, если  $\{\varphi\}_i=0$  или  $([K] - \omega^2 [M])$  равен нулю. Первый случай неинтересен, т.к. решение получается тривиальным. Второй случай показывает проблему собственных значений (10).

Решение обобщенной проблемы соб. значений - есть  $n$  пар частот  $\omega^2$  и собственных векторов  $\{\varphi\}$ , при этом  $n$  – число степеней свободы, т.е. порядок системы.

Помимо круговой частоты  $\omega_i$  присутствует собственная частота  $f_i$ . Эта частота есть число колебаний в единицу времени:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (11)$$

Главная особенность этой задачи в том, эти самые формы определяются с очень хорошей точностью, а точнее до постоянного множителя, поэтому возникает смысл в том, чтобы их нормировать. Самое популярное нормирование - по отношению к матрице масс. Кроме того, собственные формы к матрице масс ортогональны:

$$\{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_j = \delta_{ij} \quad (12)$$

### **Модальный анализ предварительно напряженной конструкции**

Модальный анализ конструкции, которая находится в напряжении заранее, выполняется на основе уравнения, аналогичного (9). Отличие состоит лишь в том, что к матрице жесткости  $[K]$  добавляется матрица  $[K]_g$  – так называемая геометрическая матрица жесткости. Второе слагаемое получается на основе тензора напряжений в совокупности с нелинейной частью тензора деформаций.

Наличие такой добавки не с проста, т.к. благодаря ей объясняется, почему, например, собственные частоты изгибных колебаний предварительно растянутой балки выше, чем в балке без предварительных напряжений.

## Гармонический анализ

Гармонический анализ (ГА) – определяет вынужденные колебания конструкции под действием периодической нагрузки. Нагрузка изменяется по гармоническому (синусоидальному) закону во времени.

Уравнения движения могут решаться при помощи ГА. Условием для таких задач является то, что колебания имеют установившийся характер. Ниже описывается общее уравнение движения:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\} \quad (13)$$

Когда процесс является установившимся, то частоты всех точек конструкции одинаковы. При этом возможны различные сдвиги по фазе. Причина, по которой может возникнуть фазовый сдвиг - наличие демпфирования. Перемещения точек конструкции можно представить в следующем виде:

$$\{u\} = \{u_{\max} e^{i\varphi}\} e^{i\Omega t} \quad (14)$$

где  $u_{\max}$  – амплитуда перемещений,  $\Omega = 2\pi f$  и  $f$  – круговая частота и частота внешних сил соответственно,  $i$  – мнимая единица,  $\varphi$  – фазовый сдвиг,  $t$  – время. Необходимо заметить, что для различных степеней свободы  $u_{\max}$  и  $\varphi$  могут отличаться друг от друга.

Для вынужденных колебаний вводятся определенные обозначения. При этом уравнение (14) принимает вид:

$$\{u\} = \{u_{\max} (\cos \varphi + i \sin \varphi)\} e^{i\Omega t} \text{ или } \{u\} = (\{u_1\} + i\{u_2\}) e^{i\Omega t} \quad (15)$$

здесь  $\{u_1\} = \{u_{\max} \cos \varphi\}$  и  $\{u_2\} = \{u_{\max} \sin \varphi\}$  – действительная и мнимая часть вектора перемещений соответственно. Вектор сил может определяться также, как и вектор перемещений:

$$\{F\} = \{F_{\max} e^{i\psi}\} e^{i\Omega t} \text{ или } \{F\} = (\{F_1\} + i\{F_2\}) e^{i\Omega t} \quad (16)$$

где  $F_{\max}$  – амплитуда сил,  $\psi$  – фазовый сдвиг для сил.

Подставляя (10) и (11) в (9), получим:

$$(-\Omega^2 [M] + i\Omega [C] + [K])(\{u_1\} + i\{u_2\}) e^{i\Omega t} = (\{F_1\} + i\{F_2\}) e^{i\Omega t} \quad (17)$$

Зависимость от времени ( $e^{i\Omega t}$ ) уничтожается, ввиду того, что она одинакова для левой и правой частей уравнения (17):

$$\left(-\Omega^2[M] + i\Omega[C] + [K]\right)\left(\{u_1\} + i\{u_2\}\right) = \left(\{F_1\} + i\{F_2\}\right) \quad (18)$$

Для решения уравнения (18) используются полный, сокращенный и метод суперпозиции мод, описанных ранее [8].

### **Динамика переходных процессов (ПП)**

Для определения параметров поведения динамики конструкций используется анализ ПП. Определенные параметры меняются во времени. Рассмотрим методы решения таких задач:

- полный метод
- метод приведения
- метод суперпозиций. Все методы содержат общее динамическое уравнение движения.

*Полный метод* – является общим и самым мощным среди всех остальных. Полный метод для решения использует следующие матрицы: масс [M], сопротивлений [C], жесткостей [K]. Здесь учитывается огромный набор таких нелинейностей как: пластичность материала, ползучесть, деформации и т.д. Также разрешены механические и тепловые нагрузки. Нагрузки могут быть в узлах, по элементу, связанные с инерцией. Есть возможность моделирования конструкций у которой присутствуют незакрепленные соединения. Также в данном методе присутствует автовыбор шага относительно времени. При переменном шаге достигается баланс между затратами ресурсов компьютера с точностью решения.

При применении методов приведения или суперпозиции допускается пренебрежение НЭ, дабы ускорить решение задач динамики (принимается линейность матриц).

*Метод суперпозиции* и *метод приведения* для предварительного исследования объекта подходят лучше всего, т.к. они расходуют гораздо меньше ресурсов. Разумеется, после предварительного анализа следует более

точное выполнение необходимого анализа. Временной шаг принимается постоянным.

Рассмотрим алгоритмы решения последних двух методов в отдельности.

Для метода приведения идет в два этапа: Первый этап - определение дислокации узлов для главных степеней свободы. Если необходимо найти некоторые определенные значения напряжений, деформаций, реакций и т.п., то в силу вступает второй этап - повторный проход, необходимый для определения дислокации узлов для всех остальных степеней свободы.

Метод суперпозиции схож с методом приведения - с его помощью можно выполнить линейный анализ, состоящий из нескольких шаговых операций. При этом шаг остается постоянным. Различия этих двух методов также присутствуют.

В зависимости от конкретизации задачи и потребностей пользователя происходит выборка метода для анализа переходных динамических процессов, разумеется наиболее подходящего. Например для анализа, который зависит от времени, процесса удара автомобиля – в этом случае требуется применение полного метода. Если НЭ очень малы или требуется предварительный анализ модели, то нет необходимости колоссальных затрат ресурсов, а, следовательно, можно выбрать метод наиболее простой. [9]

### **Определение и описание демпфирования**

В пакете ANSYS матрица демпфирования (МД)  $[C]$  используется для таких видов анализа как: модальный, гармонический и динамическом анализе. Все эти виды анализов связаны с демпфированием. МД используется при создании суперэлементов (substructure). Рэлеевское демпфирование - есть общая форма задания демпфирования:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \quad (19)$$

где  $\alpha$  - постоянный множитель к матрице масс (команда ALPHAD);

$\beta$  - постоянный множитель к матрице жесткости (команда BETAD) [10].

Матрица в модальных координатах принимает вид:

$$[C] = \alpha[I] + \beta[\Lambda], \quad (20)$$

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \omega_n^2 \end{bmatrix}$$

где  $I$  – единичная матрица,  $\omega_r$  - собственная частота  $r$ -ой моды собственных колебаний, то есть матрица  $[C]$  диагональна. Таким образом, для любой  $r$ -ой моды уравнение движения (8) может быть отделено и записано в форме [10]:

$$\ddot{q}_r + (\alpha + \beta\omega_r^2)q_r + \omega_r^2 q_r = Q_r \quad (21)$$

Полагая

$$2\zeta_{mr}\omega_r = \alpha + \beta\omega_r^2, \quad (22)$$

перепишем уравнение (21) в виде:

$$\ddot{q}_r + 2\zeta_{mr}\omega_r \dot{q}_r + \omega_r^2 q_r = Q_r \quad (23)$$

где  $\zeta_{mr}$  есть  $r$ -я модальная степень демпфирования.

Значения  $\alpha$  и  $\beta$  не известны. Они вычисляются через модальные степени демпфирования  $\zeta_{mr}$ . Как известно из (22),  $\zeta_{mr}$  - это отношение между действительным и критическим демпфированием для  $r$ -ой моды колебаний. Из формулы (22) записывается:

$$\zeta_{mr} = \frac{\alpha}{2\omega_r} + \frac{\beta}{2}\omega_r \quad (24)$$

В большинстве задач  $\alpha$  - демпфирование или фрикционное демпфирование, которое можно не учитывать ( $\alpha=0$ ). В то же время  $\beta$  можно найти по значениям  $\zeta_{mr}$  и  $\omega_r$ , которые описывают демпфирование материала конструкции. При пошаговом нагружении можно задать только одно значение  $\beta$ , поэтому для определения  $\beta$  необходимо выбрать наиболее активную частоту на шаге нагружения.

## Метод конечных элементов

Исследование математической модели, т.е. решение дифференциального уравнения при заданных граничных условиях, будем осуществлять при помощи метода конечных элементов, используя программный пакет Ansys [11, 12].

*Метод конечных элементов* (МКЭ) — численный метод решения интегральных и дифференциальных уравнений с частными производными. Данный метод очень широко используется для решения задач не только механики, но а также задач теплообмена, электродинамики и гидродинамики.

МКЭ заключается в том, что всякую непрерывную величину, будь то температура, давление, либо некая другая величина, можно аппроксимировать моделью, которая будет состоять из отдельных элементов/участков. На каждом из этих элементов непрерывная величина будет аппроксимироваться кусочно-непрерывной функцией (КНФ). КНФ строится на значениях исследуемой непрерывной величины в конечном числе точек участка/элемента, который рассматривается.

Перед тем как перейти к общему случаю, нужно понимать, что непрерывная величина заранее неизвестна, поэтому нужно определить значения этой величины в некоторых внутренних точках рассматриваемой области. Дискретная модель очень легко строится, если предположить, что в некоторых точках области, так называемые узлами, известны числовые значения этой величины, показанных на рисунке 6. После этого можно перейти к общему случаю.

Алгоритм построения дискретной модели непрерывной величины выглядит следующим образом [13]:

1. Область определения непрерывной величины делится на конечное число элементов, которые имеют общие узловые точки. А в совокупности, все эти элементы аппроксимируют форму области.
2. В исследуемой области фиксируется конечное число точек. Эти точки называются узлами.

3. Значение непрерывной величины во всех узловых точках сначала считаем известными, затем они определяются из-за наложения на них дополнительных ограничений. Ограничения зависят от физической постановки задачи.

4. Определяется значение исследуемой величины внутри области. Для этого используются аппроксимирующая функция, а также значения непрерывной величины в узловых точках. Аппроксимирующие функции (в основном) имеют вид линейных, квадратичных и кубических полиномов. Полиномы подбираются таким образом, чтобы сохранялась непрерывность величины вдоль границ элемента. Такой полином, связанный с данным элементом, называют «функцией элемента».

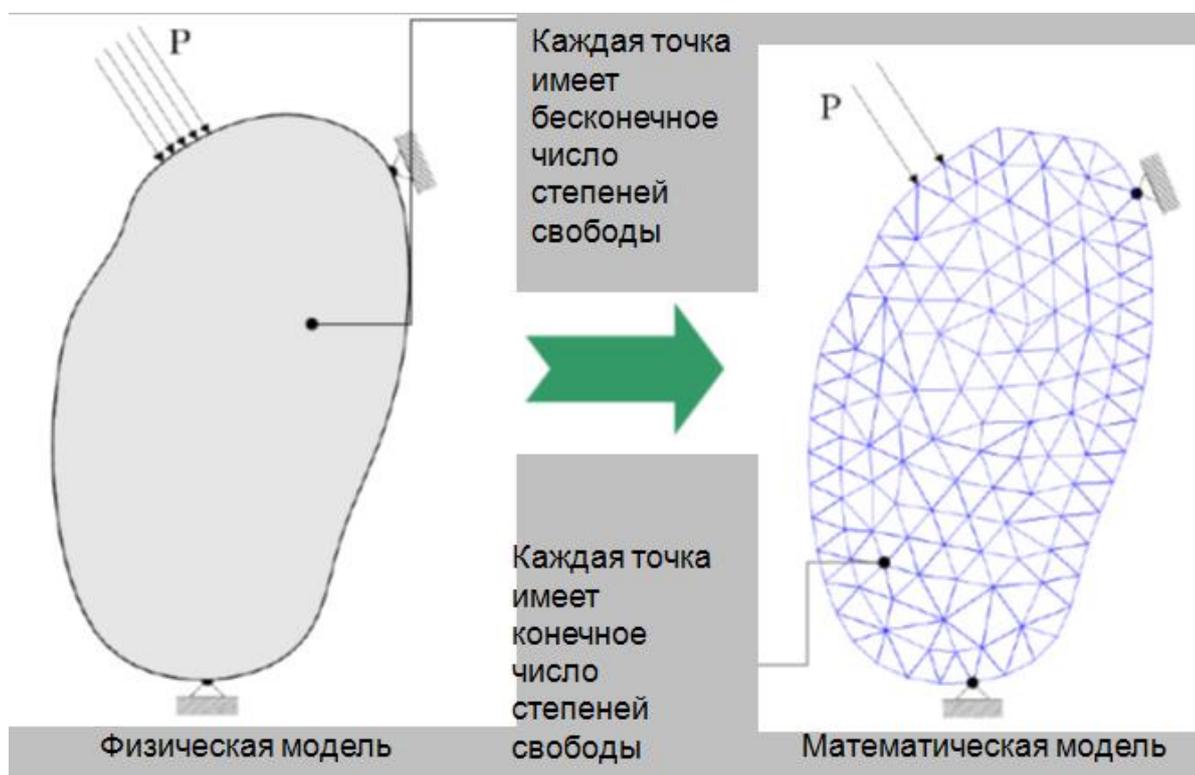


Рисунок 6 – Физическая и математические модели (Ansys)

Как следует из основной концепции МКЭ, вся модель конструкции (или отдельной ее части) делится на множество конечных элементов, соединенных между собой в вершинах (узлах), проиллюстрированная на рисунке 7. Силы действуют в узлах. Конечный элемент не является «абсолютно жестким» телом.

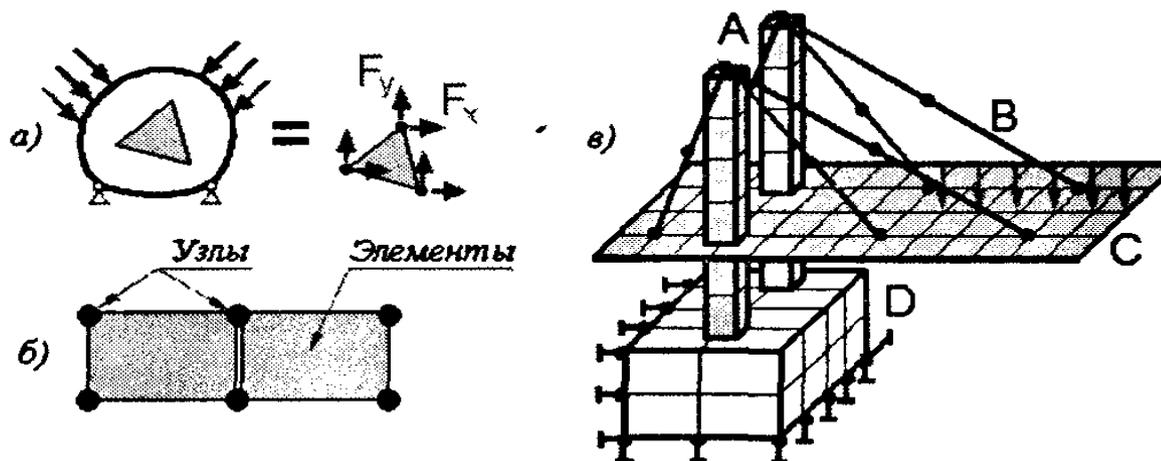


Рисунок 7 – Конечные элементы

Имеются несколько наиболее употребительных типов конечных элементов: брус (А), стержень (В), тонкая пластина или оболочка (С), двумерное или трехмерное тело (D). При построении модели могут быть использованы несколько типов элементов [11].

В исследуемой нами задаче, необходимо исследовать 2 типа элементов – это стержень и оболочка. Заметим, что можно внести некоторые упрощения: в силу того, что у балочного элемента одно характеризующее его измерение во много раз больше его двух других измерений, а оболочечный элемент имеет одно измерение во много раз меньше двух других, то будем рассматривать их как прямую и как пленку (оболочку) соответственно. Из этого следует, что если пренебречь некоторыми измерениями в элементах конструкции, то это значительно может упростить решаемую задачу.

Как говорит МКЭ, сложная модель конструкции разбивается на более мелкие конечные элементы. Эти элементы более простой формы и в их пределах ищется приближенное решение. Результат моделирования – поле напряжений и смещений всей конструкции целиком.

Запишем следующие основные этапы, из которых состоит решение задачи с применением МКЭ:

- создание геометрии модели;
- разбиение модели на сетку конечных элементов;

- написание граничных условий;
- автоматическое численное решение СУ;
- анализ результатов.

### **Построение сетки конечных элементов**

Построение на модели сетки, состоящей из конечных элементов, очень важный этап при анализе конструкции. В программном пакете ANSYS существует два метода построения сетки – это упорядоченный и произвольный. Это построение показано на рисунке 8. При построении произвольной сетки, геометрические размеры элементов сетки могут отличаться друг от друга, что делает упорядоченное построение более предпочтительным. Чем меньше линейный размер элемента, тем больше элементов сетки, причем ошибки уменьшаются, а время анализа увеличивается.

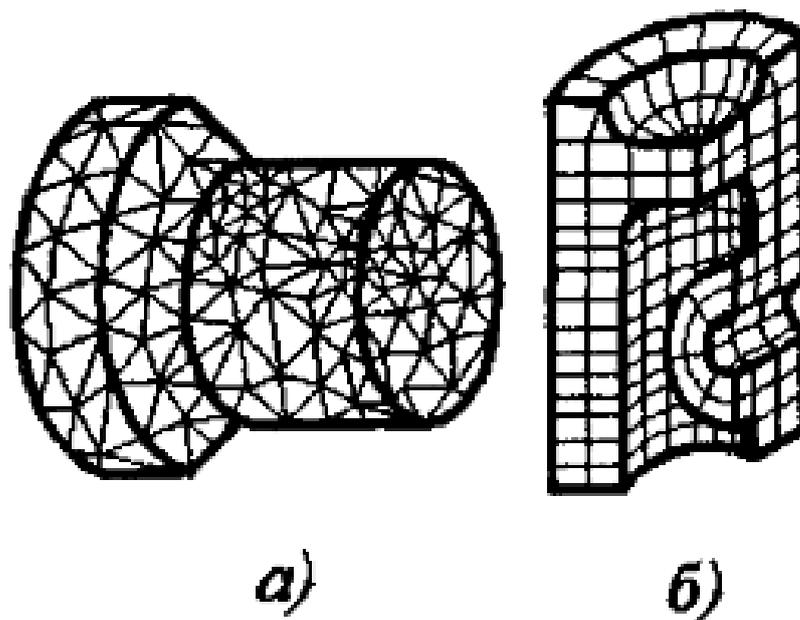


Рисунок 8 – Построение сетки конечных элементов:

а) произвольное, б) упорядоченное

Необходимо правильно выбирать форму элементов, т.к. в отличие от вытянутых элементов, элементы с одинаковыми сторонами дают меньшую ошибку [11, 13].

## ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### Алгоритм построения модели антенны

Для построения геометрии [14,15] АЗТ типа было решено создать алгоритм построения ее модели в программном комплексе ANSYS. Для начала записываются все, заданные нами, константы, указав, что мы будем работать со спицами, уже находящиеся в напряжении.

finish

/CLEAR,START

/UIS,MSGPOP,3

/NERR,5,1000000

N= 10

M= 6

F= 2

r0= 0.01

R= 1

h0= 0.0001

s0= 5

d= 0.02

h= 0.001

$dL = 0.111 / 6$ , где N – число точек разбиения одной спицы антенны, M – число спиц, F – фокусное расстояние, R – длина проекции спицы на ось X, r0 – радиус ступицы, d – внешний радиус сечения балки, h0 – толщина стенки балки. Начиная работу с разделом PREPROCESSOR, укажем разбиение спиц в цилиндрической системе координат.

/prep7

$dx = (R - r0) / (N - 1)$

$dfi = 360 / M$

csys, 1

```

*do, j, 1, M
fi= dfi* (j- 1)
*do, i, 1, N
x0= r0+ dx* (i- 1)
z0= x0**2/ (4* F)
k, i+ N* (j -1), x0, fi, z0
*enddo
FLST, 3, N, 3
*do, i, 1, N
FITEM, 3, i+ N* (j -1)
*enddo

```

где  $z_0 = \frac{x_0^2}{4F}$  - формула идеального параболоида. Проводим сплайн через

получившиеся точки, как на рисунке 9, убирая вспомогательное построение.

```

BSPLIN, ,P51X
KDELE, 2+ N* (j -1), N- 1+ N* (j -1)
LDIV, (j- 1)* (N- 1)+ 1,, N- 1, 0
*enddo

```

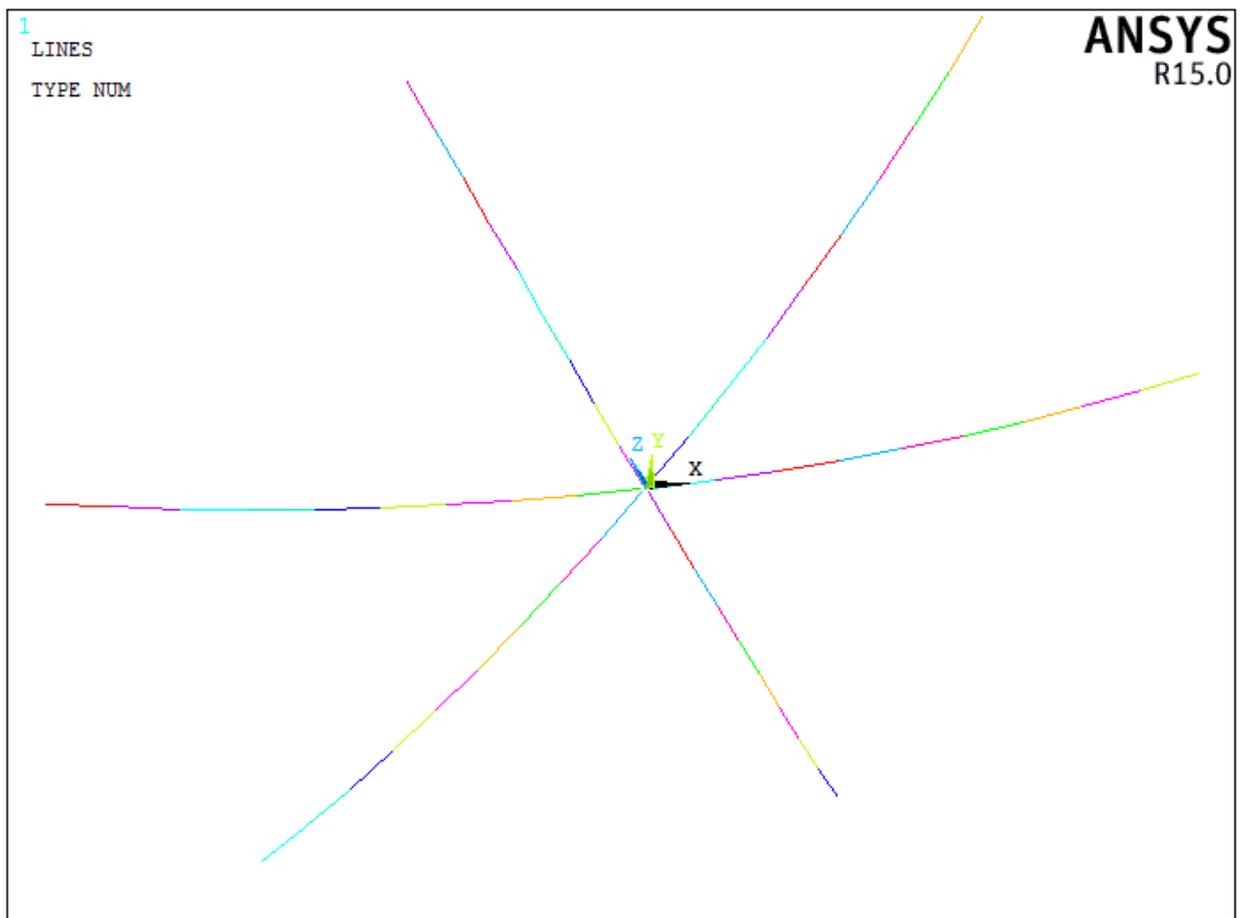


Рисунок 9 – Построение сплайна

Переходим снова к декартовой системе координат. На следующем этапе необходимо создать алгоритм соединения точек для получения шести сплайнов.

```

csys, 0      ! 0-декартова система координат
*do, j, 1, M-1
*do, i, 1, N
L, i+(j-1)*N, i+j*N      !L-отрезок между двумя точками
*enddo
*enddo
*do, i, 1, N
L, i+(M-1)*N, i
*enddo

```

Задание алгоритма построения плоскости через 4 точки выполняется следующим образом, показанном на рисунке 10:

```
csys, 0
```

```
*do, j, 1, M-1
```

```
*do, i, 1, N-1
```

```
A, i+(j-1)*N, i+j*N, i+j*N+1, i+(j-1)*N+1 !A-построение плоскости
```

ограниченной последующими отрезками

```
*enddo
```

```
*enddo
```

```
*do, i, 1, N-1
```

```
A, i+(M-1)*N, i, i+1, i+(M-1)*N+1
```

```
*enddo
```

```
!/eof
```

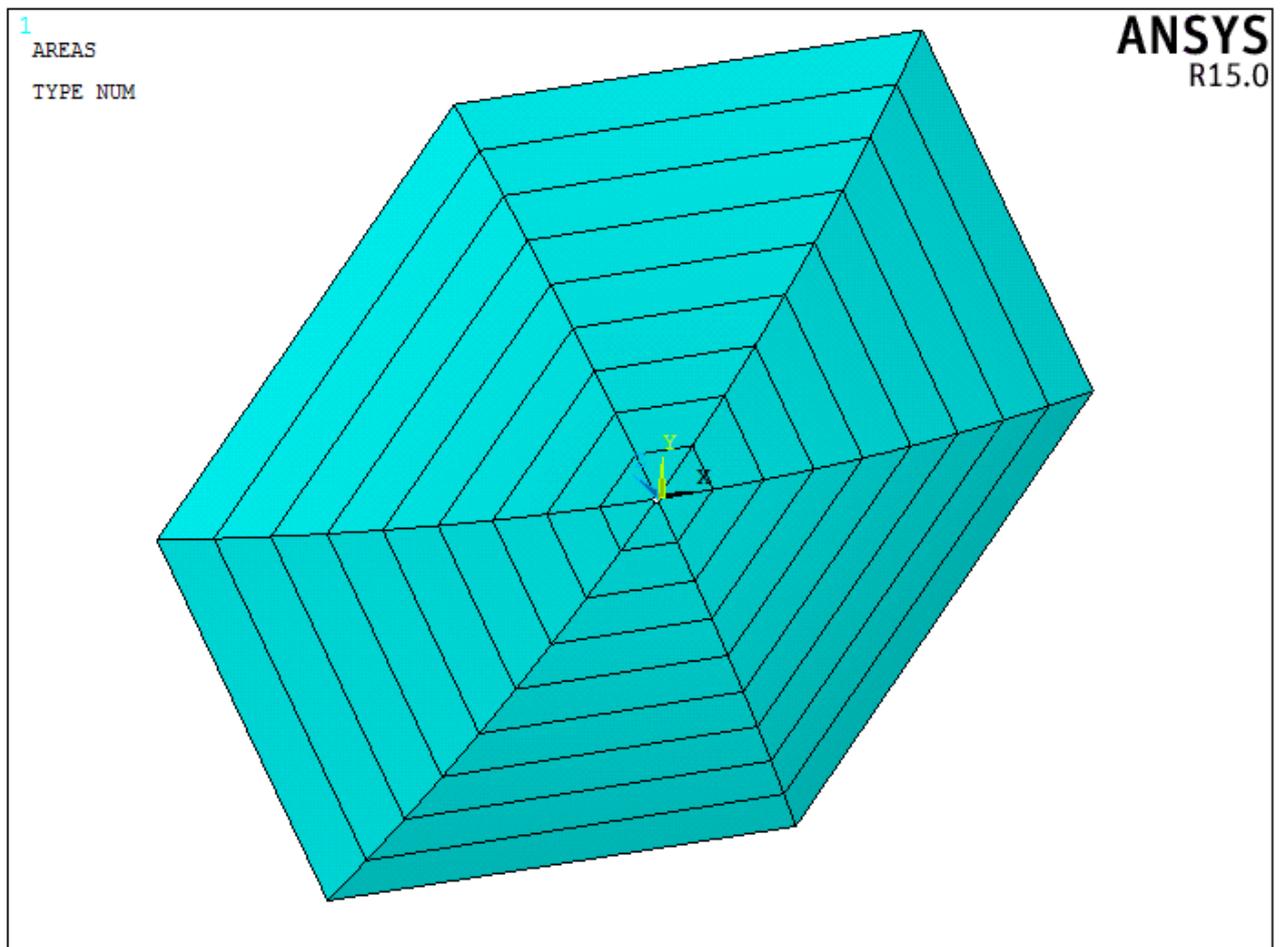


Рисунок 10 – Построение плоскостей

Получившимся плоскостям задается тип материала, внутренние напряжения. После этого эти плоскости разбиваются на конечные элементы (п-угольники), также задается структурность этих элементов.

```
ET,1,SHELL181 !тип элемента
```

```
MPTEMP,,,,,,,,
```

```
MPTEMP,1,0
```

```
MPDATA,EX,1,,1e6 !задание напряжения
```

```
MPDATA,PRXY,1,,0.3
```

```
sect,1,shell,,
```

```
secdata, 0.0001,1,0.0,3
```

```
secoffset,MID
```

```
seccontrol,,,, , , ,
```

```
ESIZE, 0.05 !размер элемента
```

```
MSHAPE, 1, 2D !геометрия участка: 1 – треугольник, 2D - плоский
```

```
MSHKEY, 1
```

```
AMESH, all !применение ко всем
```

Задаем узлы, проиллюстрированные на рисунке 11, на элементарные элементы. Также задаем тип материала, внутренние напряжения, форму сечения для балочных элементов.

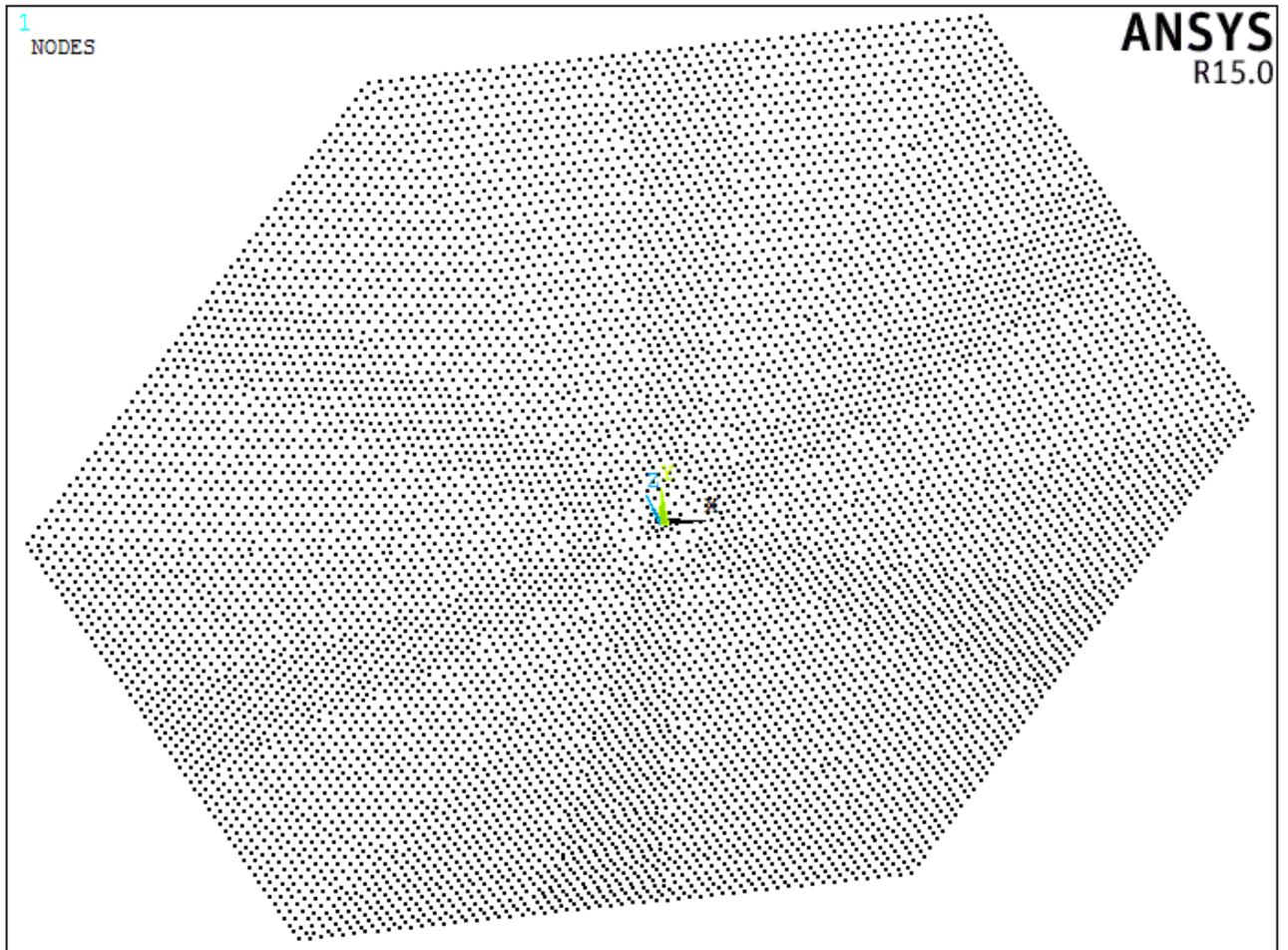


Рисунок 11 – Совокупность узлов сетки

```

ET,2,BEAM188 !тип элемента
ET,3,LINK180 !тип элемента
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,1e11 ! задание напряжения
MPDATA,PRXY,2,,0.3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,1e11
MPDATA,PRXY,3,,0.3
SECTYPE, 2, BEAM, CTUBE, , 0

```

SECOFFSET, CENT

SECDATA,D/2-h0, D/ 2 ! задание геометрии

TYPE, 2

MAT, 2 ! тип материала

SECNUM, 2 ! тип сечения

LSEL, S,,, 1, M\* (N-1)

LMESH, all

R,3, pi\*0.001\*\*2/4, ,0 ! Площадь сечения

real, 3

TYPE, 3

MAT, 3

На последнем этапе необходимо задать граничные условия для нашей конструкции и зафиксировать ее положение на ступице:

LSEL, S,,, M\*(N-1)+1, (2\*M+1)\*(N-1)-3 ! выбор точек закрепления

LMESH, all

allsel, all

KSEL,S, , ,1, (M-1)\*N+1, N

NSLK,S

D, all, ,0, , , ,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ ! задание граничных условий

ALLSEL,ALL

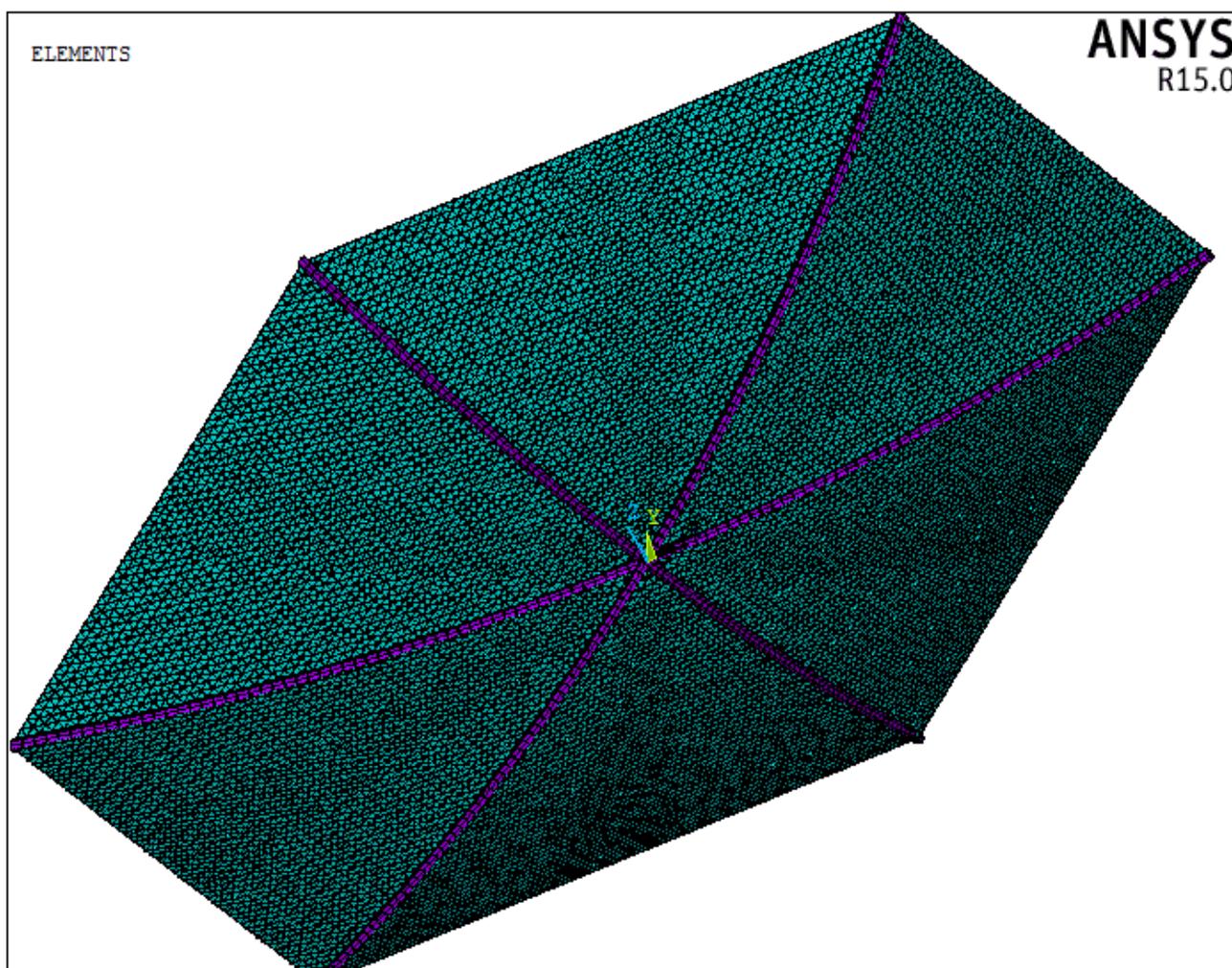


Рисунок 12 – Готовая модель антенны зонтичного типа

После построения антенны, как на рисунке 12, необходимо провести ее анализ. Как показывает практика расчетов, если сразу нагрузить антенну, учитывая граничные условия, устойчивого сходящегося решения добиться чрезвычайно трудно. Дабы этого избежать, было решено применить метод пошагового нагружения конструкции. Для этого на первом этапе задается нагружение вдоль всех спиц. С этими «дополнительными» ГУ и происходит первая итерация получения решения. После получения результата расчета часть «лишних» ГУ убирается, а полученное на первом этапе напряженно-деформированное состояние используется как начальное. В этом и состоит суть пошагового нагружения – в постепенном изменении граничных условий, что влечет изменение воздействия на конструкцию. Это особенно важно для случая нелинейных задач решаемых итерационными способами.

В зависимости от сложности конструкции, характеристик материалов и т.д. таких шагов может быть и достаточно много.

На рисунках ниже представлены результаты, полученные для выбранной конструкции антенны после шести шагов изменения (снятия) граничных условий. Как видно из рисунка 13, наибольшее отклонение точек конечно-элементной модели будет наблюдаться между спицами (порядка 3мм), а наименьшее отклонение будет находиться вдоль спиц. Это связано с тем, что отражающая поверхность стремится уменьшить площадь за счет внутренних усилий.

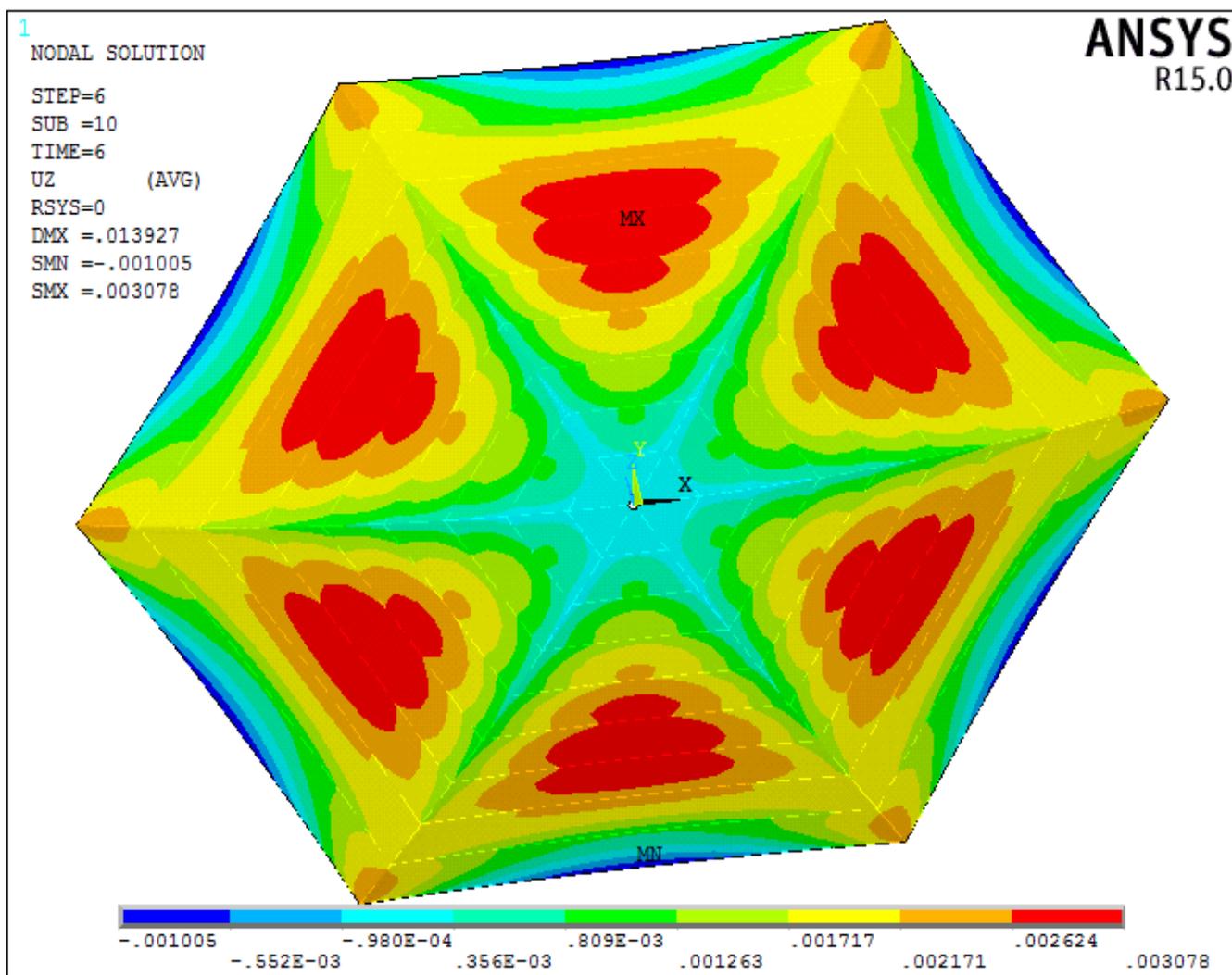


Рисунок 13 – Иллюстрация перемещения точек конечно-элементной модели

На рисунке 14 проиллюстрированы растягивающие усилия в сетеполотне, получающиеся в результате расчета. Видно, что максимальное усилие,

возникающее в отражающей поверхности сохраняется на уровне первоначальных 5-ти гс/см. Ближе к границам сетеполотна наблюдается падение усилий до 3-х гс/см.

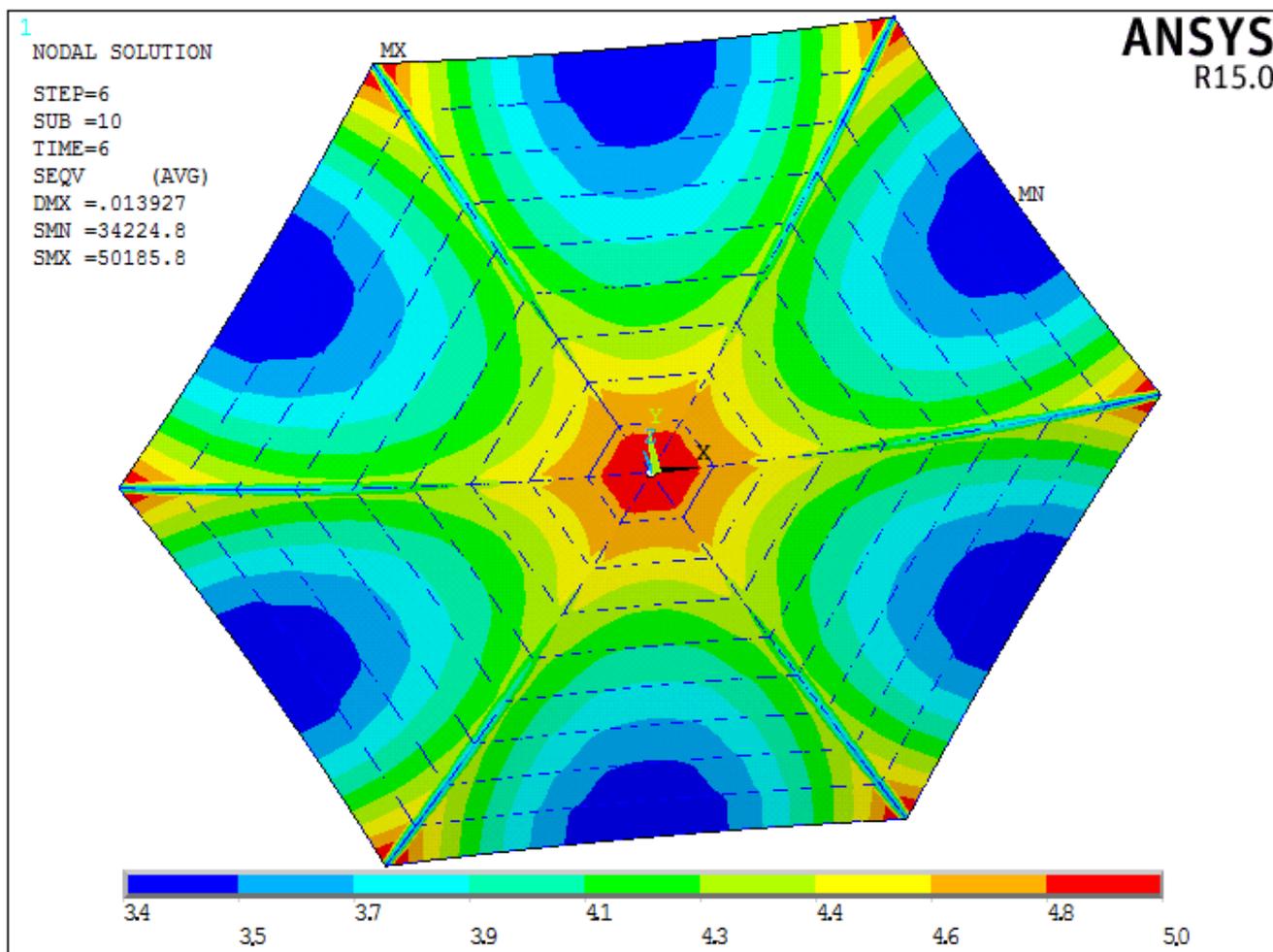
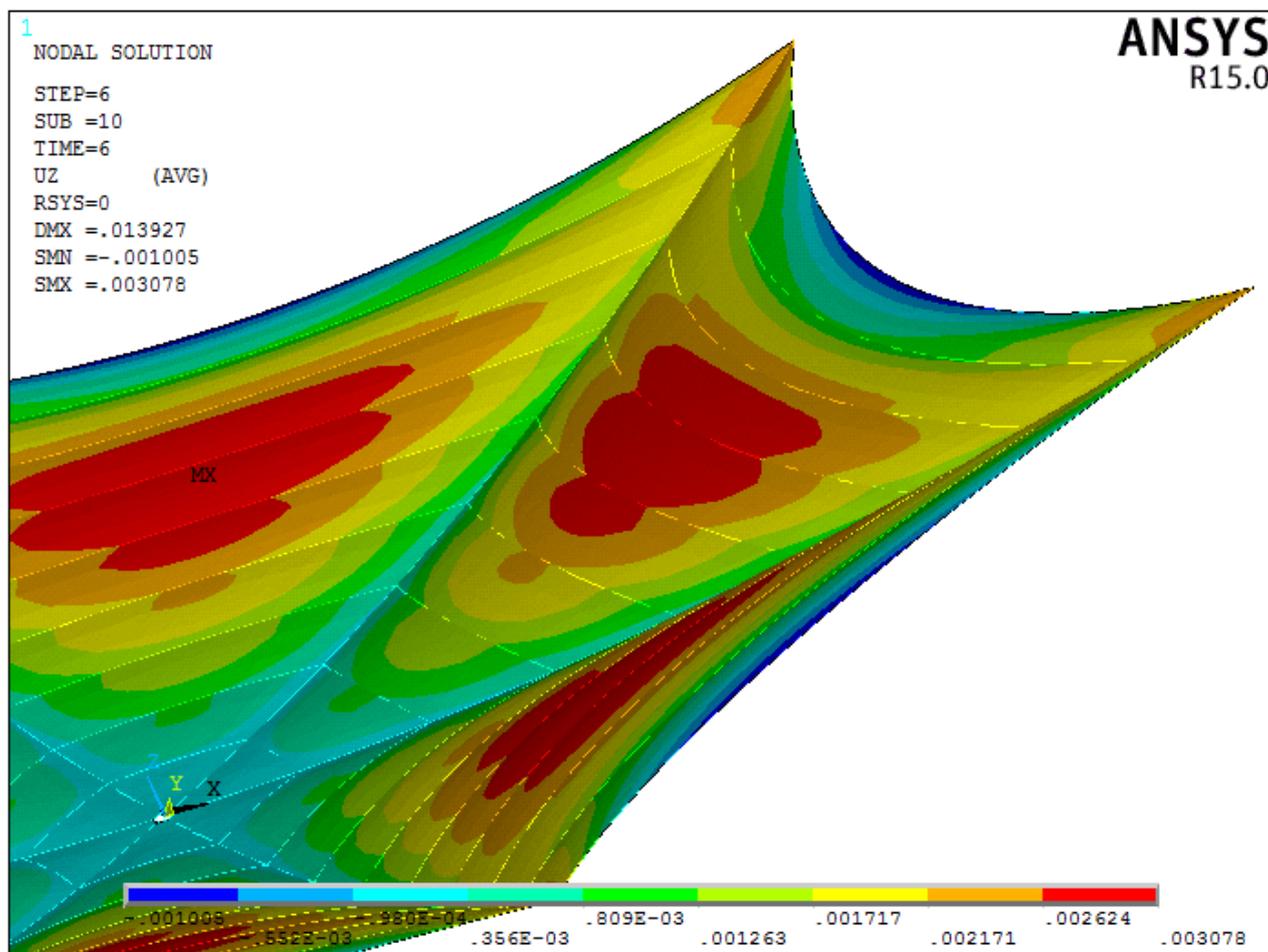


Рисунок 14 – Растягивающие усилия в сетеполотне

В масштабе можно увидеть, как искривляются отражающая поверхность и спицы на рисунке 15.



На данный момент невозможно произвести сверку с экспериментальными данными.

По результатам серии расчетов, был построен график сеточной сходимости в зависимости от количества элементов. Как он показывается на рисунке 16, уже после разбиения сетки до размеров элемента  $\approx 3$  мм, точность результатов не меняется. Дальнейшим разбиением сетки на более мелкие элементы можно считать не целесообразным.

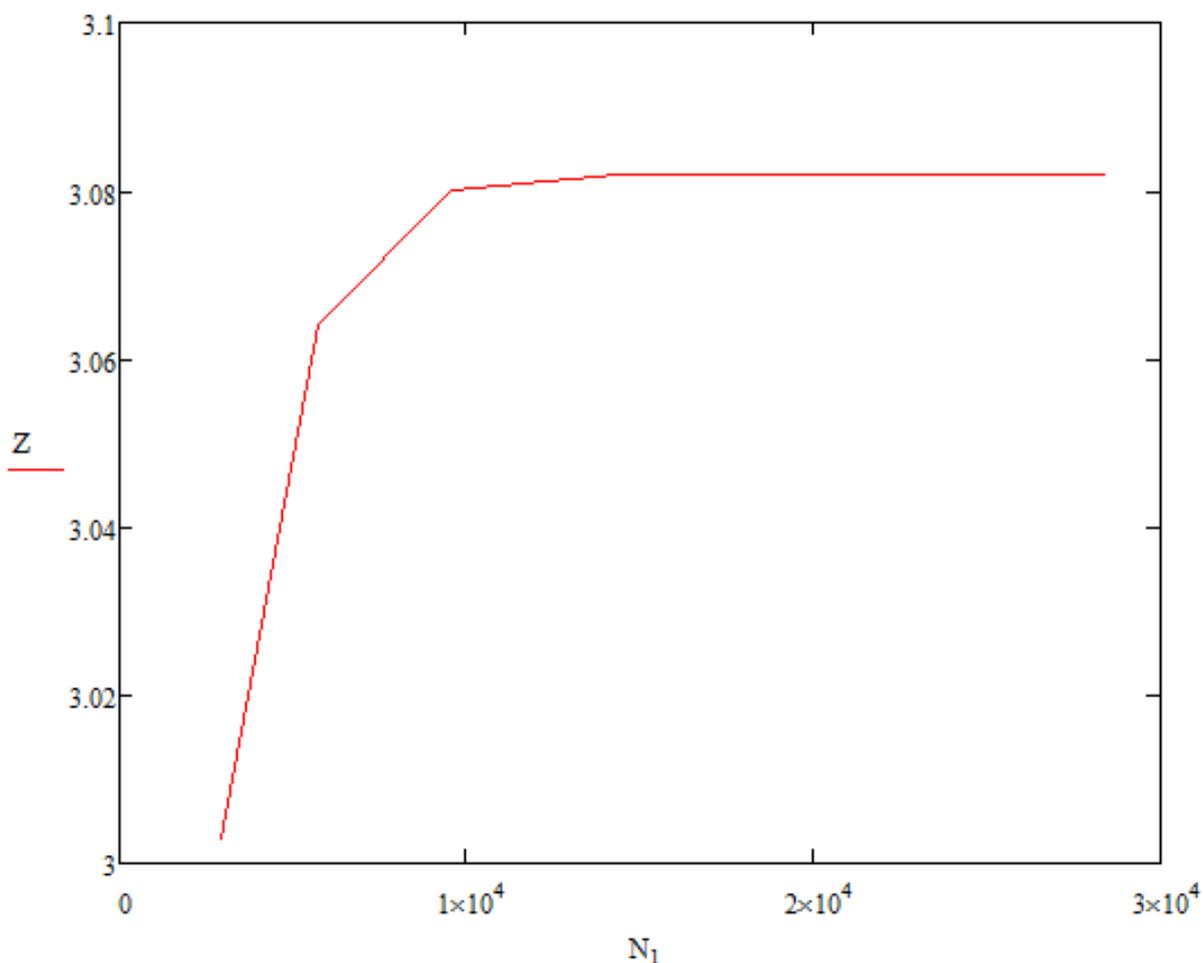


Рисунок 16 – Зависимость сеточной сходимости от числа элементов, где Z- отклонение отражающей поверхности от идеального параболоида по оси z,  $N_1$  – число элементов

Полученные результаты согласуются с результатами полученными другими авторами [4, 15].

## Модальный анализ пластинки

Прежде чем переходить к проведению модального анализа на модели АЗТ проведем анализ упрощенной модели на примере металлической пластинки для оценки достоверности и адекватности результатов.

Конечно-элементная модель (КЭМ) – шарнирно-опертая по контуру квадратная металлическая пластинка.

Исходные данные:	$a = 1\text{ м}$	- длина пластинки
	$h = 0.005\text{ м}$	- толщина пластинки
	$\rho = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	- плотность
	$E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$	- модуль упругости материала
	$\nu = 0.3$	- коэффициент Пуассона
	$U_x = U_y = U_z = 0$	- граничные условия (ГУ)

Первоначально была построена геометрическая модель пластинки, показанная на рисунке 17, и заданы ГУ шарнирной опертости.

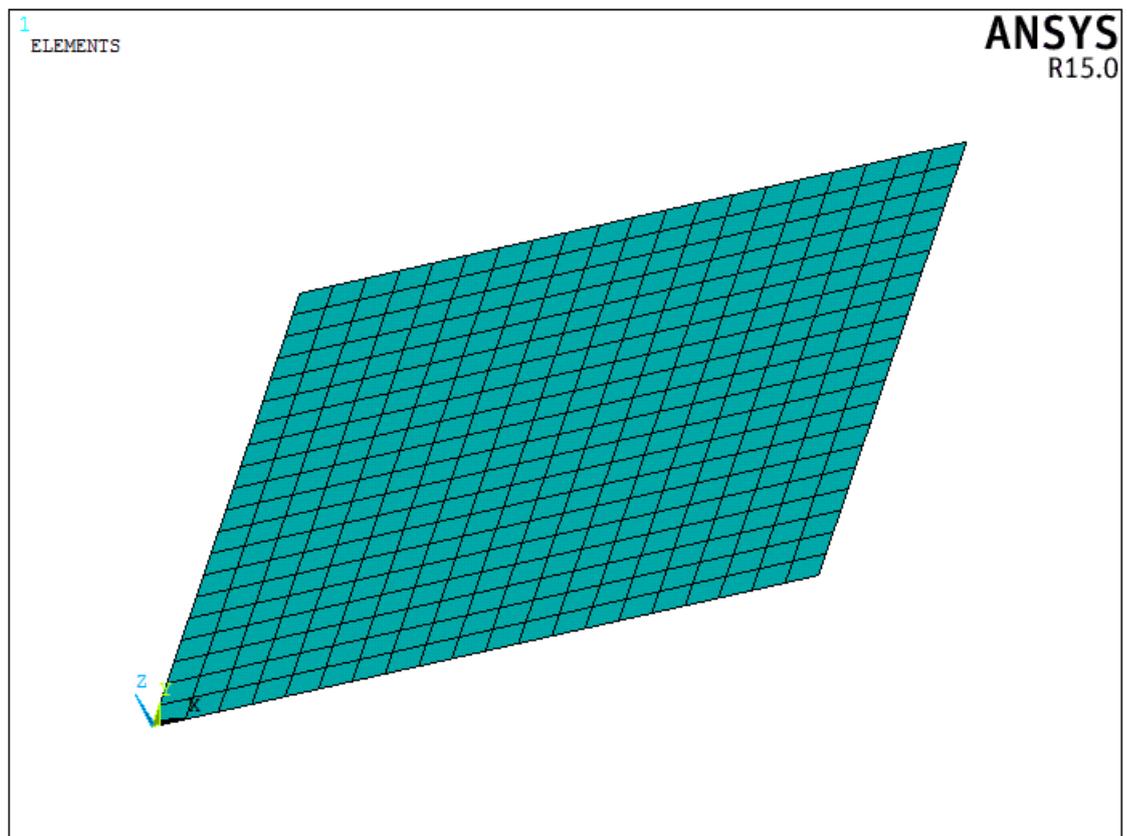


Рисунок 17 – Конечно-элементная модель

Модальный анализ проводился на КЭМ с размерами элементов разбиения 0.1, 0.05, 0.025, 0.005. Аналитический расчет произведен по следующей формуле [16]:

$$\omega = (m^2 + n^2) \frac{\pi^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \text{ где } D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu)} \quad (25)$$

Результаты показаны ниже в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимости частоты от разбиения сетки

Мода	n	m	Частота (аналит)	Частота L=0.1	Погр.1, %	Частота L=0.05	Погр.2, %	Частота L=0.025	Погр.3, %	Частота L=0.0125	Погр.4, %
1	1	1	24.652	24.884	0.94	24.712	0.24	24.665	0.05	24.644	0.03
2	2	2	98.608	102.27	3.71	99.499	0.9	98.799	0.19	98.59	0.018

где m и n - число полуволн

Как видно из результатов погрешность минимизируется с уменьшением размера элемента разбиения. По результатам серии расчетов был построен график как на рисунке 18 зависимости собственной частоты от количества элементов.

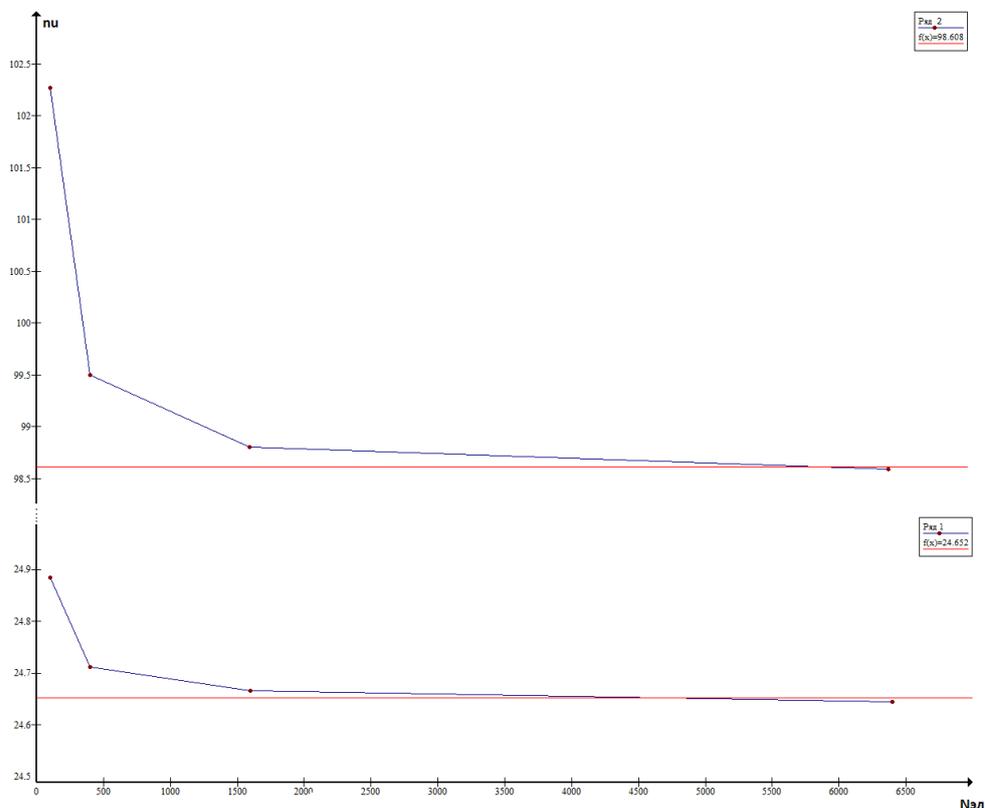


Рисунок 18 – Зависимость частоты I и II порядка от числа элементов

Как видно из графика, достаточно разбиения до 4500-4700 элементов для частот I порядка и 5700-5800 элементов II порядка, чтобы считать полученные результаты достоверными, т.к. погрешность становится минимальной (порядка 0,02-0,03%).

Иллюстрации модального анализа приведены ниже на рисунках 19 и 20.

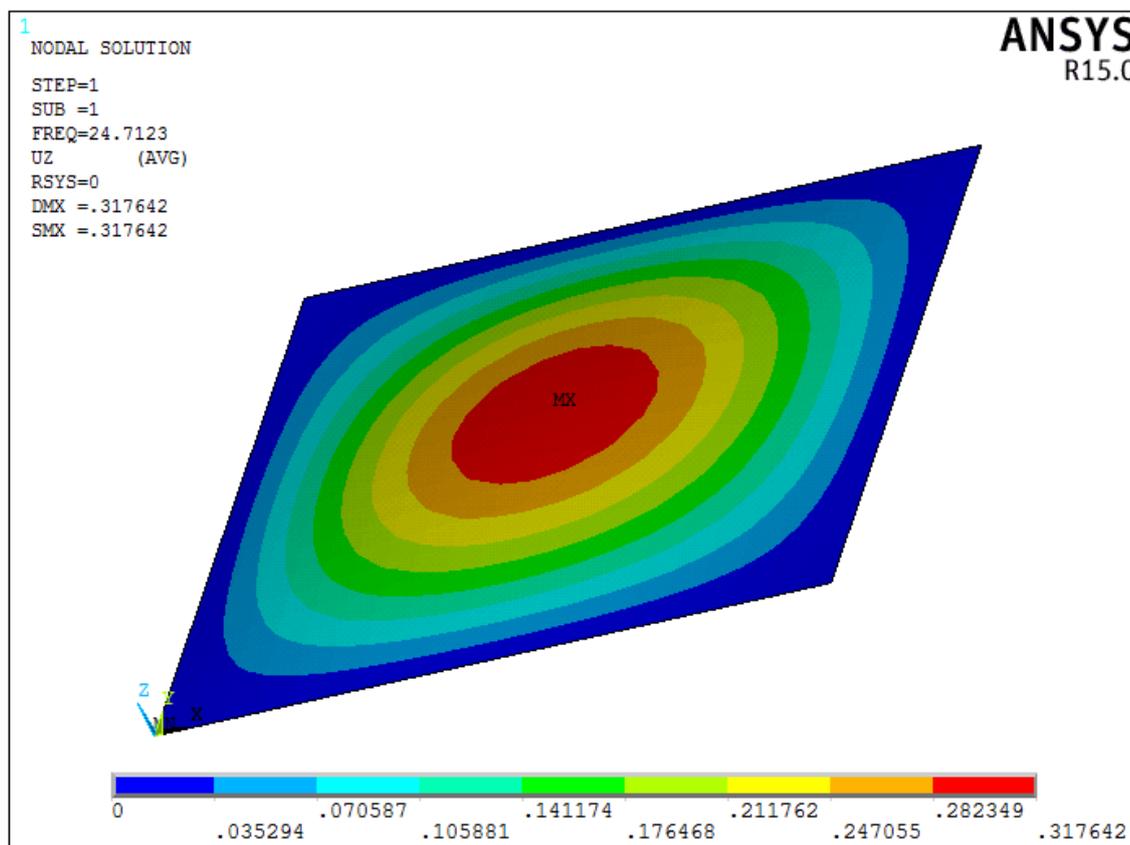


Рисунок 19 – Модальный анализ, полуволны  $n=1$  и  $m=1$

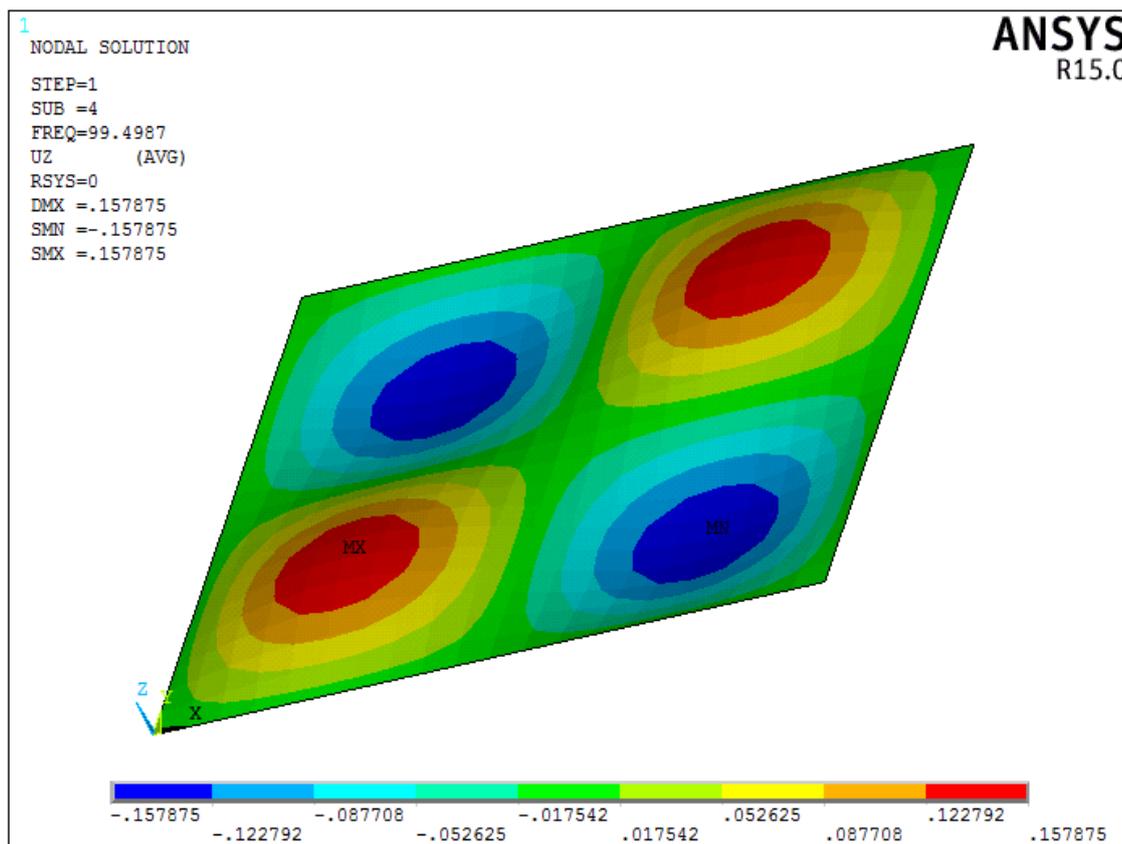


Рисунок 20 – Модальный анализ, полуволны  $n=2$  и  $m=2$

Результаты, полученные программой, согласуются с аналитическим решением и могут считаться достоверными [13].

Таким образом, можно сделать вывод, что используемые методы определения собственных частот могут быть применены к более сложным конструкциям сходного типа.

## Модальный анализ антенны

Упростим нашу конструкцию: уберем сетеполотно. После удаления сетеполотна из конструкции исчезают и внутренние напряжения [13]. Следовательно, необходимо их компенсировать. Используя теорию упругости, натягиваем тросы антенны с дополнительным усилием. После решения задачи с заданными параметрами, конструкция выглядит следующим образом, как на рисунке 21:

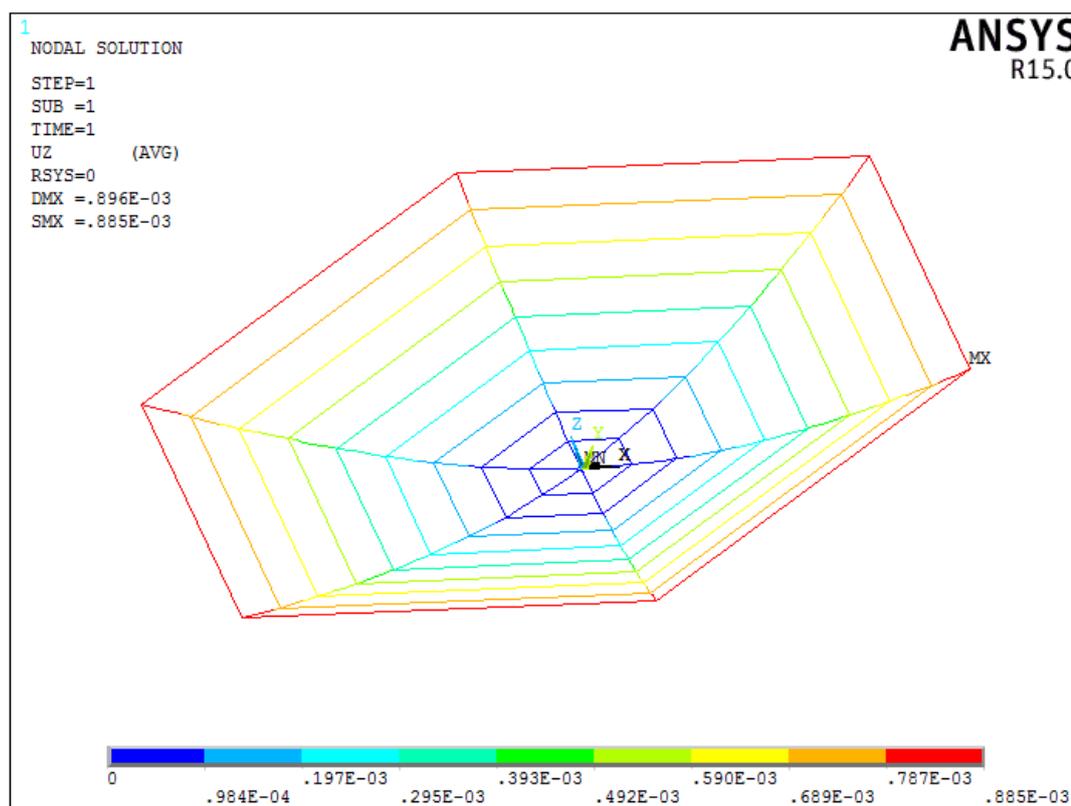


Рисунок 21 – перемещения точек каркаса антенны без сетеполотна

Заметим, что концы спиц имеют наибольшее отклонение 0.88мм, в местах закрепления спиц (на ступице) деформации не наблюдается. Переходим к проведению модального анализа: задаем несколько мод для определения собственных частот конструкции.

Результаты модального анализа конструкции без сетеполотна описаны в таблице 2 ниже.

Таблица 2 – Зависимость роста частоты от номера моды

Мода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ч-та	28.28	28.53	28.53	28.88	28.88	29.13	63.63	175.5	175.5	177.0

Рассмотрим модальный анализ конструкции при натянутом сетеполотне. На рисунке ниже представлены результаты, полученные для выбранной конструкции антенны после шести шагов изменения (снятия) ГУ. Как видно из рисунка 22 наибольшее отклонение точек КЭМ будет наблюдаться ближе к концу спиц (порядка 3мм), а наименьшее отклонение будет находиться вдоль спиц. Это связано с тем, что отражающая поверхность стремится уменьшить площадь за счет внутренних усилий, а также натяжение веревочных элементов приподнимает спицы.

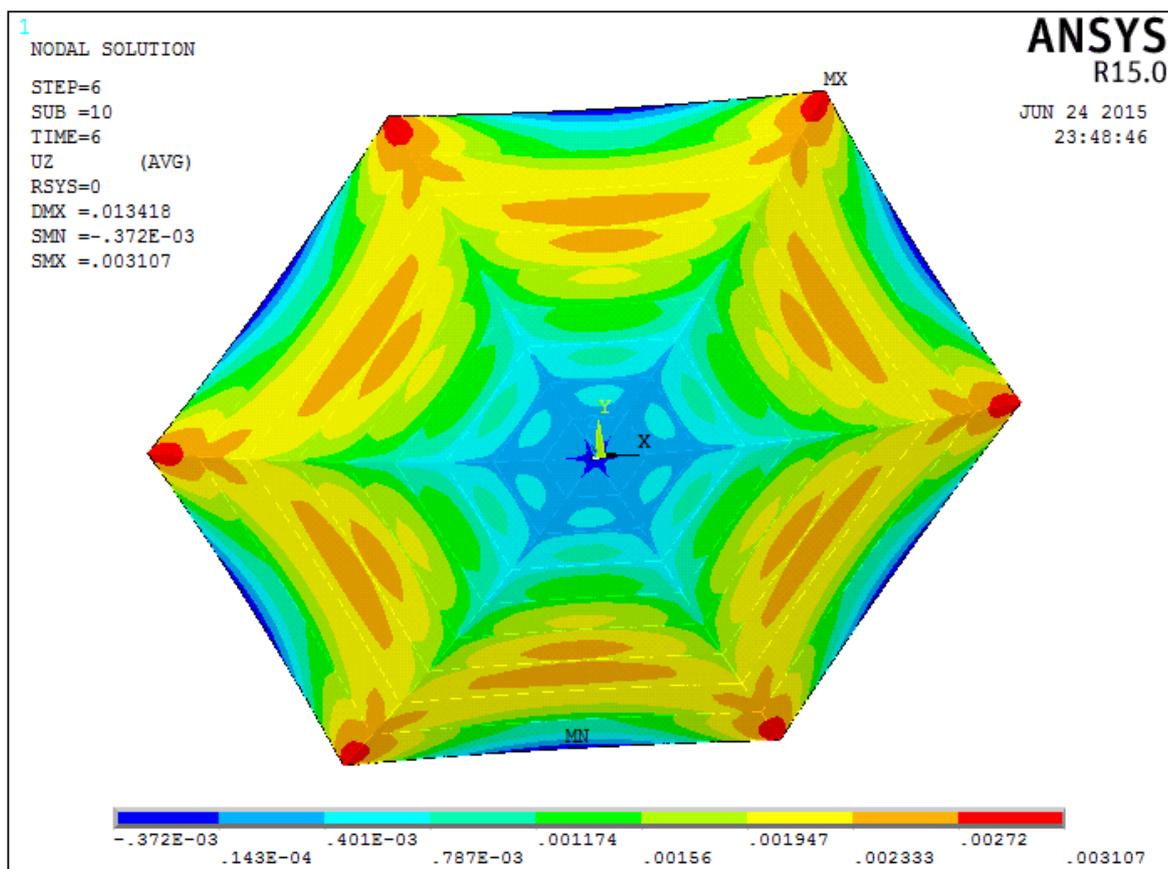


Рисунок 22 – Перемещения точек КЭМ с сетеполотном

Проводим МА полученной конструкции, результаты которого показаны ниже в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимость роста частоты от номера моды

Мода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ч-та	28.81	28.81	29.01	30.5	30.5	31.5	48.13	49.92	50.6	50.6

На рисунках 23, 24 показаны первые моды колебаний собственных частот каркаса антенны и каркаса с сетеполотном.

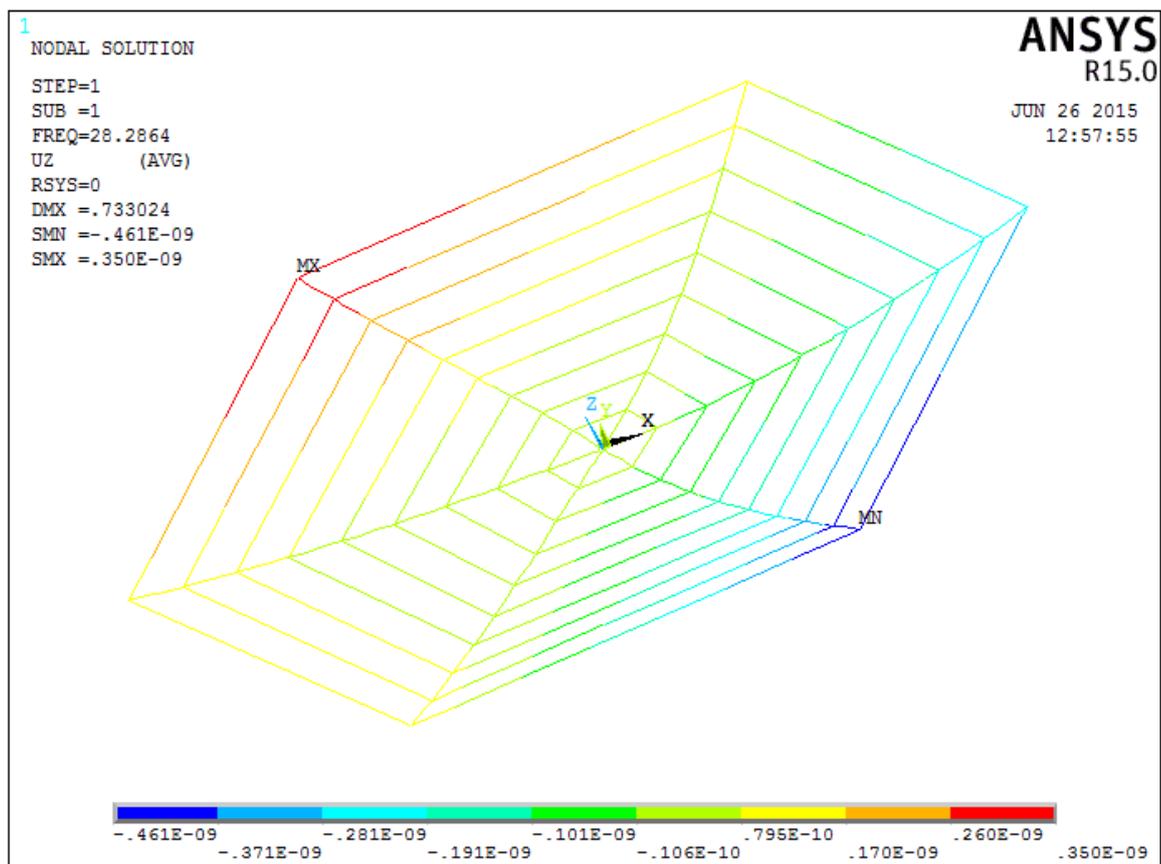


Рисунок 23 – I мода модального анализа антенны без сетеполотна

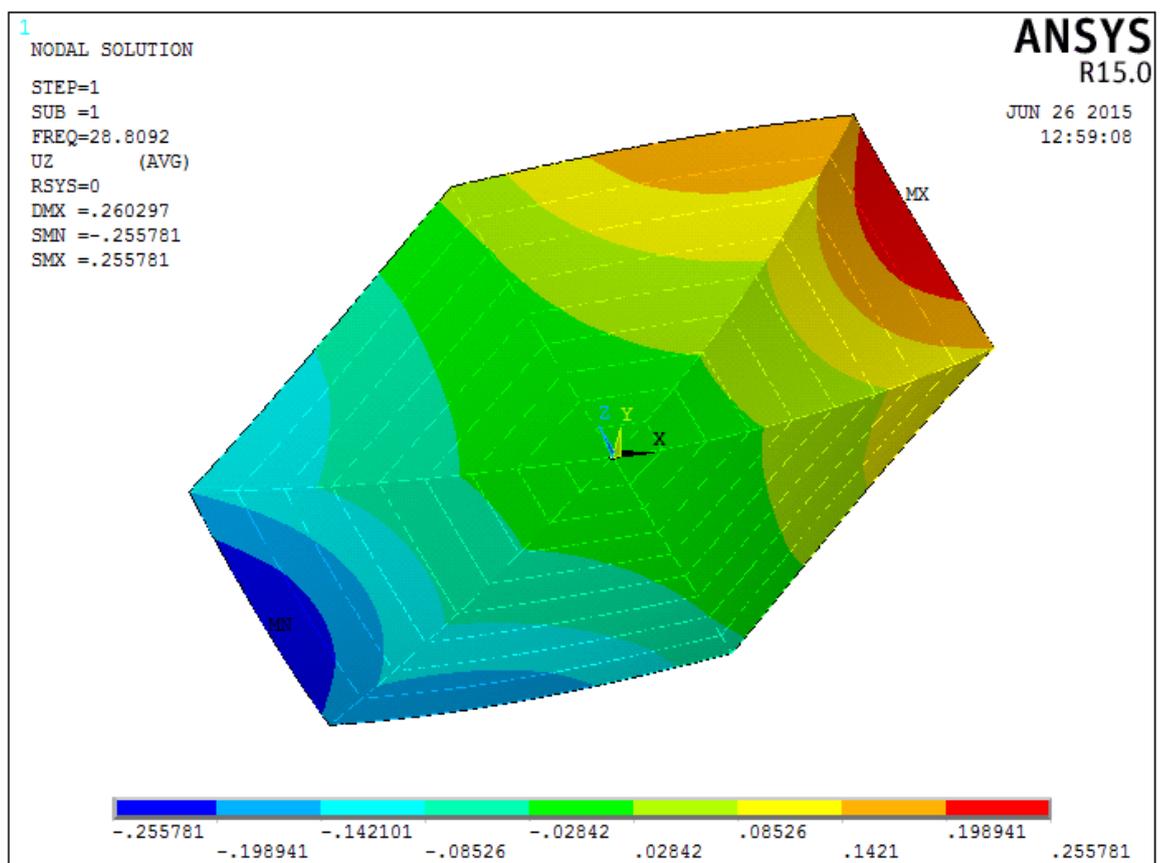


Рисунок 24 – I мода модального анализа антенны с сетеполотном

По результатам таблиц 2 и 3 можно сделать ряд следующих выводов:

1. Жесткость конструкции с сетеполотном увеличивается;
2. Сетеполотно минимизирует риск закручивания спиц;
3. Модальный анализ показал, что конструкция, содержащая сетеполотно, более стойка к вибрациям;
4. Достоверность модели подтверждается результатами модального анализа пластинки.

### **Гармонический анализ пластинки**

Колебательное воздействие на антенну производит ее гармонический отклик. Гармонический анализ необходим для того, чтобы предсказать то или иное поведение конструкции. Позволяет проверить: на сколько успешно конструкция будет вести себя в резонансе, также определить усталость, и другие вредные эффекты вынужденных колебаний.

После проведения модального анализа начинаем гармонический анализ. Ввиду получения точных результатов анализа, начинаем анализ не на самой конструкции антенны, а с анализа упрощенной модели металлической пластинки.

По полученным данным модального анализа первым делом берется найденная ранее одна из мод колебаний. В нашем случае была взята первая мода. В качестве диапазона воздействий был взят диапазон возбуждения частот 12-39 Гц, разбитый на 25 подшагов. В качестве граничных условий приложена сила к центральному узлу.

После проведения анализа можно заметить, что подходя к моде колебаний в диапазоне возбуждений можно увидеть резонанс. Иллюстрации к гармоническому анализу продемонстрированы на рисунке 25.

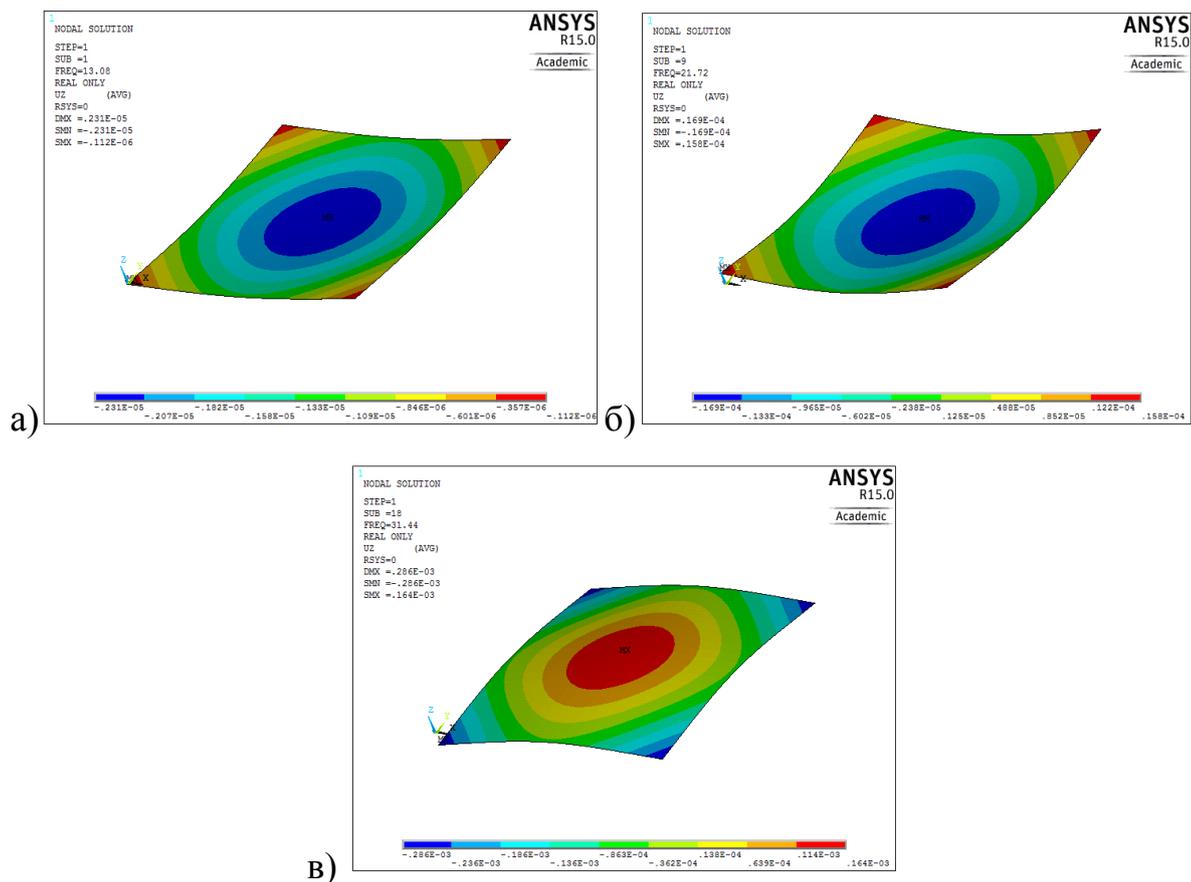


Рисунок 25 – Гармонический анализ металлической пластинки при воздействии частоты а)13 Гц, б)21.7 Гц, в)31.5 Гц

### Гармонический анализ силового каркаса

После проведения гармонического анализа пластинки переходим к проведению гармонического анализа силового каркаса.

Была также взята первая мода колебаний из модального анализа, а также прикладываются граничные условия к основанию антенны. Диапазон частот взят 20-40 Гц.

Результаты гармонического анализа силового каркаса антенны приведены ниже на рисунке 26, на которых указано первоначальное положение и ее отклонение от него в результате воздействия тех или иных частот.

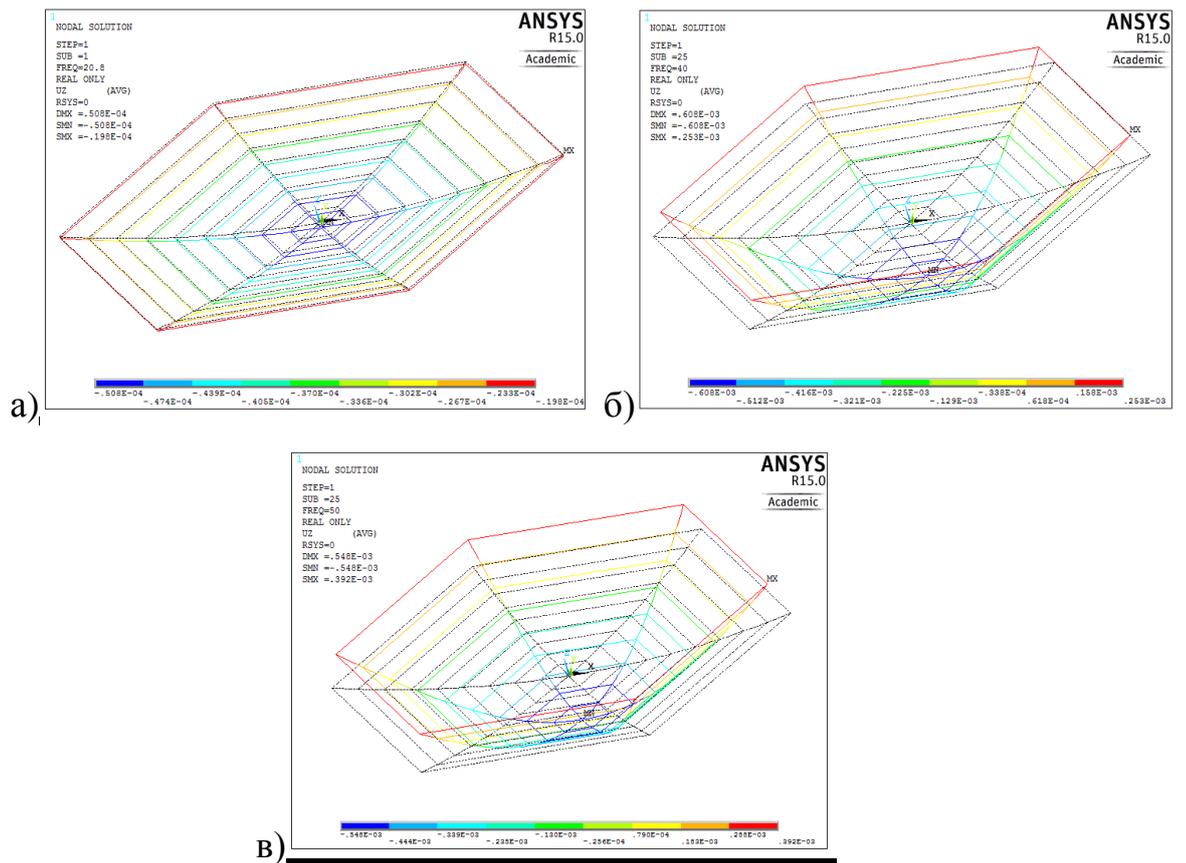


Рисунок 26 – Гармонический анализ силового каркаса АЗТ при воздействии частоты а) 20.8 Гц , б) 40 Гц , в) 50 Гц

В результате гармонического анализа можно сделать вывод, что конструкция при заданных параметрах коэффициента демпфирования и заданных ГУ ведет себя вполне адекватно [15] в диапазоне частот близких к резонансу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе написания данной работы была определена и создана математическая модель конструкции трансформируемого рефлектора зонтичного типа.

При помощи встроенного языка программирования APDL ANSYS разработан алгоритм параметрического построения рефлектора;

Определено НДС конструкции рефлектора при выбранных граничных и начальных условиях, с учетом нелинейных эффектов. Анализ результатов расчета показал, что модель АЗТ ведет себя адекватно и ее поведение соответствует поведению реальных конструкций такого типа.

Проведены модальный и гармонический анализы конструкции при заданных условиях. Модель антенны показала себя устойчиво в диапазоне частот близких к резонансу.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хаджпет Дж. Аэрокосмическая техника. – М., 1983. – Т. 1, № 6. – С. 127 - 136.
2. Гвамичава А. С. Строительство в космосе / А. С. Гвамичава, В. А. Кошелев. – М.: Знание, 1984.– 64 с.
3. Гряник М. В., Ломан В. И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа – М.: Радио и связь, 1978 – 72 с.: ил.
4. Бутов В. Г., Бухтяк М. С., Жуков А. П., Пономарев С. В., Солоненко В. А., Усманов Д. Б., Халиманович В. И., Шипилов Г. В., Ящук А. А. Моделирование вантово-оболочечных конструкций рефлекторов // Ракетно-космическая техника. Фундаментальные и прикладные проблемы механики: Материалы Международной научной конференции, посв. 90-летию В.И. Феодосьева. Москва, 4-6 мая 2006 г.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 93 с.
5. Бовсуновский А.Б. Механический анализ конструкции бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов / А.Б. Бовсуновский. – Томск : НИ ТГУ, 2013. – 10-11 с.
6. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование.—М.: Издательство Физико-математической литературы. – 2002. — 209-211 с.
7. Леонтьев Н.В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике». – Нижний Новгород, 2006, – 101 с.
8. ANSYS 8.1 ANSYS. Документация
9. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования / А.В. Жидков – Нижний Новгород, 2006. – 115 с.
10. On-line ANSYS Theory Reference, Release 5.6.

11. Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
12. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. Ред. Д.Г.Красковского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.:ил.
13. Маслов Л.Б., Сабанеев Н.А. Практикум по курсу вычислительной механики на базе современных программных средств численного анализа (ANSYS): Учеб. - метод. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина». – Иваново, 2009. – 76с.
14. Басов К. А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. – М.: ДМК Пресс. – 2006. – 240 с.
15. Усманов Д. Б. Моделирование напряженно-деформированного состояния крупногабаритного трансформируемого рефлектора: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2006. – 179 с.
16. Биргер И. А. Прочность. Устойчивость. Колебания. Справочник в трех томах / И. А. Биргер, Я. Г. Пановко. – М. : Издательство «Машиностроение», 1968. – т.3, 567 с.

Уважаемый пользователь! Обращаем ваше внимание, что система «Антиплагиат» отвечает на вопрос, является ли тот или иной фрагмент текста заимствованным или нет. Ответ на вопрос, является ли заимствованный фрагмент именно плагиатом, а не законной цитатой, система оставляет на ваше усмотрение.

## Отчет о проверке № 1

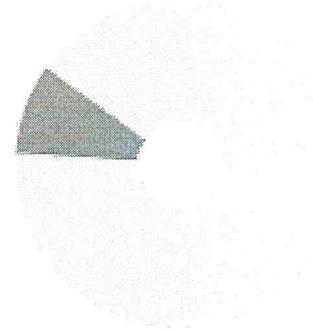
дата выгрузки: 06.06.2016 07:15:41  
 пользователь: [vlasovalex19051992@gmail.com](mailto:vlasovalex19051992@gmail.com) / ID: 3134488  
 отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»  
 на сайте <http://www.antiplagiat.ru>

### Информация о документе

№ документа: 27  
 Имя исходного файла: Диплом\_dis\_ Власов.doc  
 Размер текста: 1588 кБ  
 Тип документа: Не указано  
 Символов в тексте: 44069  
 Слов в тексте: 5386  
 Число предложений: 321

### Информация об отчете

Дата: Отчет от 06.06.2016 07:15:41 - Последний готовый отчет  
 Комментарий: не указано  
 Оценка оригинальности: 91%  
 Заимствования: 9%  
 Цитирование: 0%



Оригинальность: 91%  
 Заимствования: 9%  
 Цитирование: 0%

### Источники

Доля в тексте	Источник	Ссылка	Дата	Найдено в
2.75%	[1] Основные идеи метода конечных элементов — Мегаобучалка	<a href="http://megaobuchalka.ru">http://megaobuchalka.ru</a>	23.03.2016	Модуль поиска Интернет
2.14%	[2] Посмотреть автореферат	<a href="http://sun.tsu.ru">http://sun.tsu.ru</a>	16.11.2012	Модуль поиска Интернет
1.92%	[3] не указано	<a href="http://unn.ru">http://unn.ru</a>	раньше 2011 года	Модуль поиска Интернет

*Власов В.Т.*  
*Израгел И.О.*  
*Власов А.С.*