

В. Н. З и м и н

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ
КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Приведены результаты частотных испытаний крупногабаритных рефлекторов антенн космических аппаратов. Уровень динамического воздействия выбирался минимальным с точки зрения возможности рассмотрения конструкций рефлекторов как динамической системы с линейными свойствами, для которой справедливы понятия частот и форм собственных колебаний.

E-mail: sm11@sm.bmstu.ru

Ключевые слова: *крупногабаритные трансформируемые конструкции, экспериментальный метод.*

Особое место среди создаваемых в настоящее время крупногабаритных трансформируемых космических систем занимают ферменные конструкции, раскрытие которых происходит автоматически при срабатывании механизма расчехлки за счет первоначальной накопленной упругой энергии пружин, расположенных в шарнирных соединениях [1, 2].

Особенность этих конструкций заключается в технологичности, компактности при транспортировке, большом отношении объемов в раскрытом и сложенном состояниях, скорости раскрытия (единицы секунд), малой массе при значительных размерах и в то же время большой площади рабочей поверхности в раскрытом состоянии (рис. 1).

Рассматриваемые конструкции состоят из двух поясов, соединенных между собой диагональными стержнями. Пояса выполнены из складывающихся стержней. Один из поясов связан со штангой, которая закрепляется на базовом элементе конструкции либо на носителе, в частности на корпусе космического аппарата (КА).

Пояс, связанный со штангой, будем называть верхним поясом, а другой пояс — нижним. Узловые шарнирные соединения верхнего пояса располагаются на образующей поверхности, которая может быть плоской или осесимметричной. Сам же верхний пояс может не обладать симметрией. Примеры возможных вариантов конфигурации верхнего пояса для плоских и осесимметричных конструкций изображены на рис. 2 и 3.

Следует отметить, что в данном случае под осесимметричной конструкцией ферменного типа понимается конструкция, для которой узловые шарнирные соединения расположены на осесимметричной образующей поверхности.

Базовая ячейка верхнего и нижнего поясов — треугольник, образованный тремя складывающимися стержнями, а базовая ячейка рассматриваемых ферменных конструкций — тетраэдр, образованный тремя диагональными и тремя складывающимися стержнями. На базе конструкции элементарной ячейки в форме тетраэдра можно построить ферменные модули разнообразных пространственных форм (сферические, цилиндрические, параболические и другие поверхности) с различными очертаниями внешнего контура. Габаритные размеры создаваемой конструкции ферменного типа определяются конкретными требованиями решаемой технической задачи.

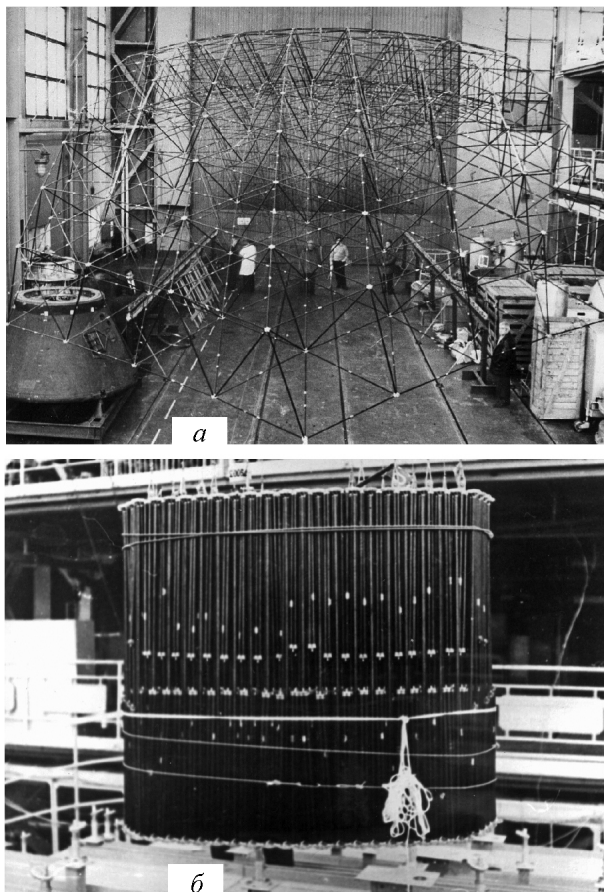


Рис. 1. Раскрывающийся крупногабаритный рефлектор ферменного типа:
a — в раскрытом рабочем состоянии; *б* — в транспортном плотно упакованном положении

Раскрытие конструкции ферменного типа происходит автоматически при срабатывании механизма расчехловки за счет первоначально накопленной упругой энергии пружин, расположенных в шарнирных соединениях. Процесс раскрытия происходит относительно некоторой точки (оси) пространства, выбор которой определяется конкретным закреплением конструкции.

На рис. 4 изображен рефлектор антенны ферменного типа, который состоит из двух поясов: верхнего, на котором закреплено сетеполотно, и нижнего. Пояса связаны между собой с помощью диагональных стержней.

Каждый складывающийся стержень длиной l верхнего и нижнего поясов выполнен из двух равных (длиной $l/2$) и соединенных шарниром элементов (рис. 5). Между собой складывающиеся стержни связаны также с помощью узловых шарниров. Здесь под длиной l складывающихся стержней понимается расстояние между центрами двух смежных узловых шарниров.

Стержни конструкции ферменного типа могут быть выполнены как из металла, так и из композиционного материала. На рис. 6, 7 и 8 представлены соответственно диагональные стержни, складывающиеся стержни и конструкции узлового шарнира и шарнира складывающихся стержней.

Определение динамических характеристик упругих крупногабаритных трансформируемых космических конструкций относится к числу наиболее важных и трудных проблем динамики, что обусловлено сложностью кон-

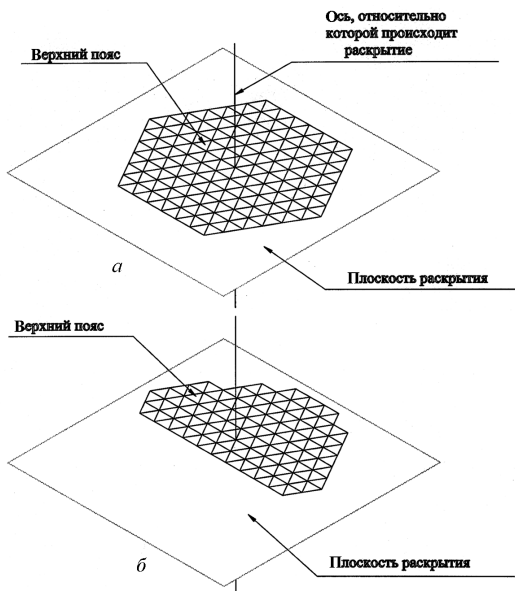


Рис. 2. Симметричная (а) и несимметричная (б) конфигурации верхнего пояса для плоской образующей поверхности

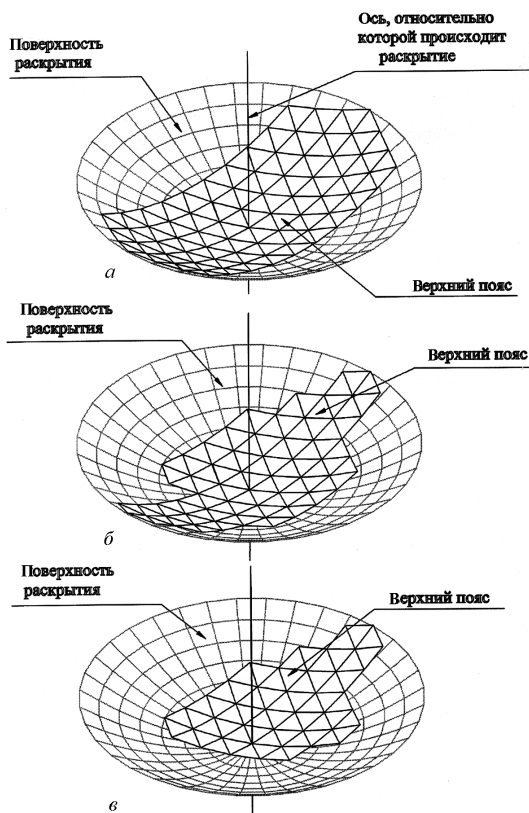


Рис. 3. Варианты конфигурации верхнего пояса для осесимметричной образующей поверхности

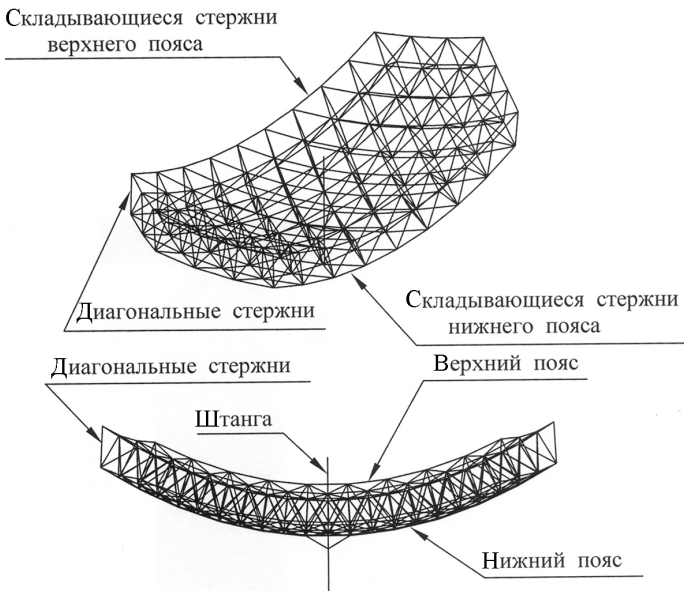


Рис. 4. Конструкция рефлектора антенны ферменного типа

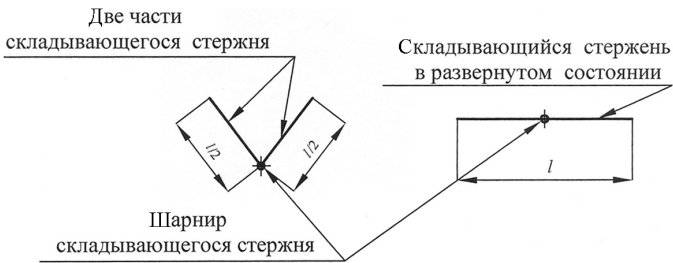
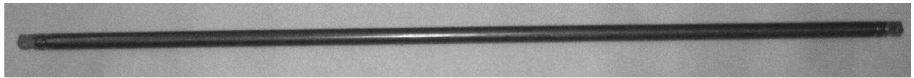
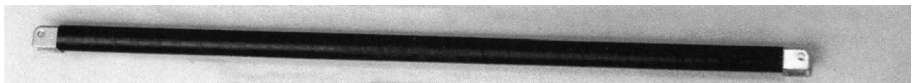


Рис. 5. Схема складывающегося стержня



a



б

Рис. 6. Диагональный стержень:

a — из стали; *б* — из композиционного материала



a



б

Рис. 7. Складывающийся стержень, трубчатые элементы которого выполнены из стали (*a*) и композиционного материала (*б*)

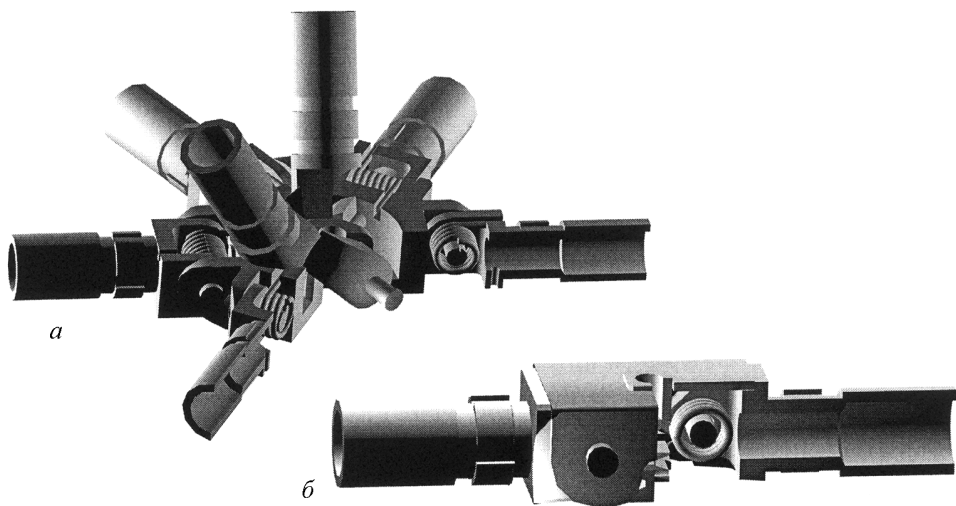


Рис. 8. Узловые шарниры, соединяющие диагональные стержни со складывающимися стержнями верхнего и нижнего поясов (а), и шарнир, соединяющий элементы складывающегося стержня (б)

струкций таких объектов, а также жесткими требованиями к точности их ориентации и стабилизации. Результаты исследований показывают, что динамические свойства таких конструкций в значительной мере определяются жесткостными и диссипативными характеристиками различных узлов соединений элементов. Как правило, поведение таких узлов является нелинейным и плохо поддается теоретическому анализу, а выявить характер нелинейностей возможно только экспериментальным путем. В связи с этим большую роль играют экспериментальные методы исследований динамических свойств крупногабаритных трансформируемых конструкций. В сочетании с теоретическими подходами, экспериментальные методы позволяют обоснованно выбрать математическую модель объекта и определить его исходные динамические характеристики.

При частотных испытаниях космических конструкций необходимо воспроизвести условия, идентичные условиям полета [3]. В ходе испытаний должны быть учтены действующие на конструкцию силы и моменты, обусловленные наличием гравитационного поля. Это особенно важно для конструкций с сочленениями, имеющими зазоры. Решение этой задачи связано с созданием систем, обеспечивающих разгрузку исследуемых объектов.

Еще одним фактором, влияющим на результаты испытаний, является наличие воздушной среды. Решение задачи исключения влияния воздушной среды возможно либо помещением объекта испытаний в вакуумную камеру, либо применением специальных методов учета влияния воздушной среды на колебания конструкции. Следует отметить, что использование вакуумных камер не всегда возможно, особенно для крупногабаритных конструкций, так как это связано со значительными материальными затратами, техническими сложностями проведения экспериментов и отсутствием вакуумных камер больших размеров. Существующие методы учета влияния воздушной среды предусматривают внесение в исследуемую конструкцию изменений, позволяющих уменьшить эффект взаимодействия ее с воздушной средой или провести дополнительные экспериментальные исследования по определению инерционных и диссипативных сил, действующих на конструкцию со стороны окружающего воздуха.

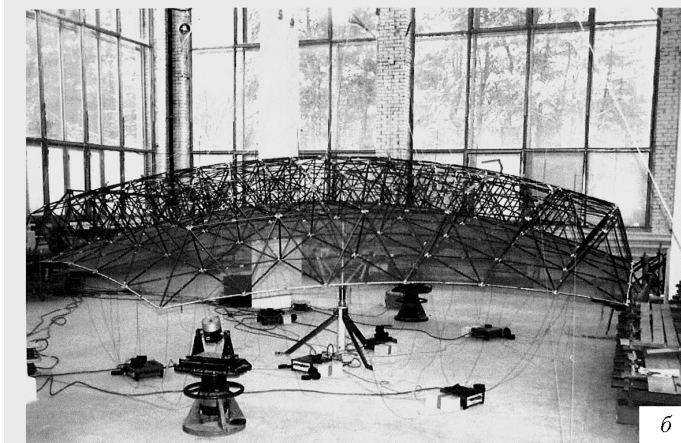
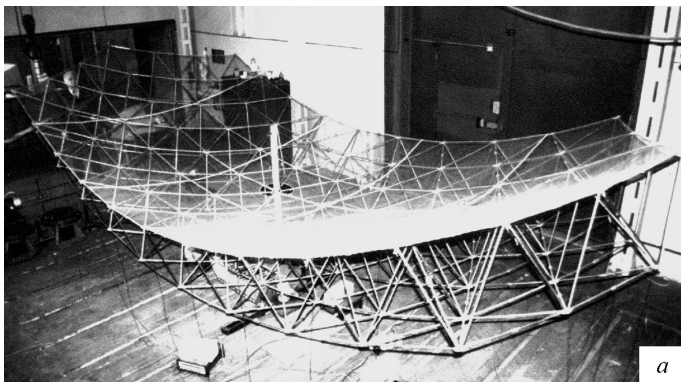


Рис. 9. Трансформируемые космические рефлекторы антенн КА:
a — рефлектор 6×3 м, стержни конструкции выполнены из металла; *б* — рефлектор, стержни которого выполнены из композиционного материала

Для моделирования условий невесомости конструкцию рефлектора необходимо обезвесить (каким-либо образом компенсировать влияние гравитационного поля). Иначе под действием собственной массы конструкция деформируется и форма рефлектора будет существенно отличаться от заданной.

На рис. 9 приведены рефлекторы антенн КА, предназначенные для наблюдения (мониторинга) Земли.

Следует отметить, что при частотных испытаниях в наземных условиях для определения влияния гравитационного поля на частоты и формы собственных колебаний рефлекторов антенн (см. рис. 9), соответствующих условиям невесомости, необходимо экспериментальные исследования проводить при расположении рефлектора антенны сетеполотном вверх и сетеполотном вниз (рис. 10).

Для придания рефлектору антенны (рис. 9, *a*) необходимой параболической формы при частотных испытаниях использовалась мягкая подвесная система в виде двух резиновых жгутов. Жгуты одним концом соединялись с силовым потолком, а другим — с верхним стержневым поясом рефлектора. Общие требования, предъявляемые к таким подвесным системам, состоят в том, чтобы свести к минимуму влияние упругих и диссипативных сил подвески на динамические характеристики исследуемой конструкции. В нашем случае жесткость каждого жгута составляла $13,9 \text{ Н/м}$.

Для придания рефлектору антенны (рис. 9, *б*) заданной параболической формы при частотных испытаниях использовалась мягкая подвесная система

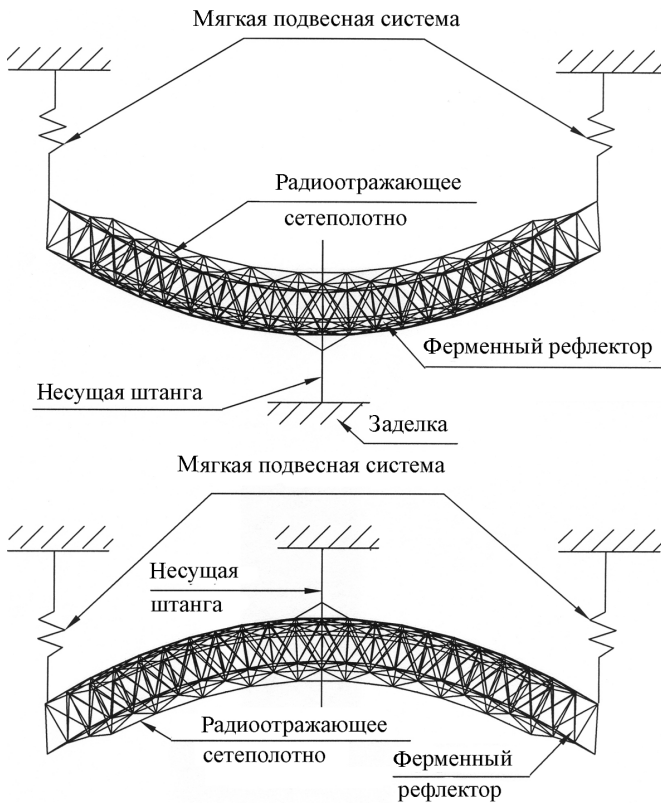


Рис. 10. Различное расположение рефлектора антенны по отношению к вектору силы тяжести

в виде капроновых нитей диаметром 0,0015 м и цилиндрических стальных пружин. Капроновые нити одним концом соединялись с цилиндрическими пружинами, а другим (через блок) — с полом испытательного зала. Цилиндрические пружины другим своим концом соединялись непосредственно с многостепенными шарнирными узлами тыльного стержневого пояса рефлектора антенны. Суммарные жесткости ветвей подвеса в направлении вектора силы тяжести были определены в процессе динамических испытаний каждой отдельно взятой ветви.

Возбуждение колебаний антенны и регистрация откликов проводились с помощью многоканальной виброустановки французской фирмы “Продера”. В качестве датчиков использовались пьезоакселерометры АС 56511 массой 0,001 кг с рабочим диапазоном 1...3000 Гц и диапазоном измеряемых ускорений 0,1...100 g. Датчики устанавливались в узлах с расположением осей чувствительности по нормали к рабочей поверхности рефлекторов.

Частотные испытания рефлекторов антенн (см. рис. 9, а, б) проводились при синусоидальном возбуждении с изменением частоты возбуждения в диапазоне 0...60 Гц. Колебания антенн возбуждались электродинамическими вибраторами ЕХ 58 с максимальной силой возбуждения 50 Н, массой подвижных частей 0,11 кг и жесткостью упругих элементов 1900 Н/м. Динамический диапазон вибраторов 0...3000 Гц, а амплитуда перемещения подвижной катушки составляет 0,007 м.

Частоты и формы собственных колебаний антенны и соответствующие им коэффициенты демпфирования определялись в диапазоне частот от 0 до 40 Гц на основе резонансного метода и метода свободных колебаний [4].

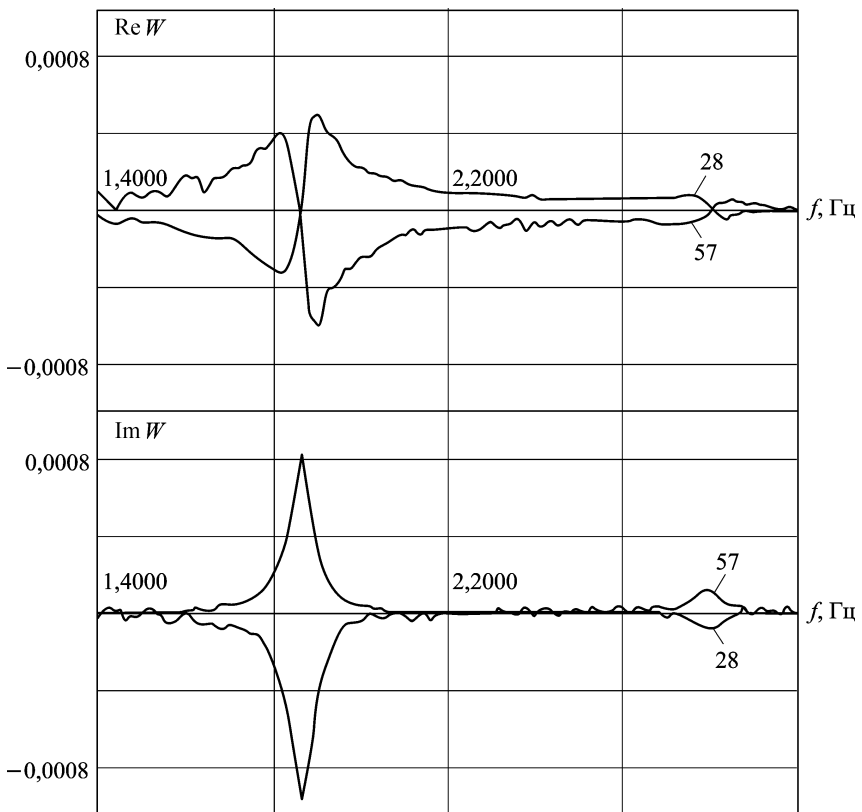


Рис. 11. Действительная и мнимая части АЧХ датчиков 28 и 57 (частоты 1,88 и 2,83 Гц)

В резонансном методе конструкции рефлекторов возбуждались гармонической силой, а амплитуда колебаний измерялась в разных узлах верхнего стержневого пояса в зависимости от частоты. Сила от вибраторов прикладывалась к узлам нижнего стержневого пояса. Для исключения возможности расположения точки возбуждения вблизи узловой линии воздействие вибраторов осуществлялось в различных местах нижнего стержневого пояса. Проводилось также одноточечное и многоточечное возбуждение конструкций.

В частотном диапазоне от 1 до 30 Гц были построены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). На рис. 11 приведены действительная и мнимая части АЧХ датчиков 28 и 57 для частот 1,88 и 2,83 Гц.

Формы колебаний рефлекторов представляют собой некоторые волнистые поверхности, что можно объяснить неоднородностью и нелинейностью свойств конструкций антенн. Этим же можно объяснить и то, что резонансные частоты для различных узлов конструкции отличаются друг от друга, как видно по АЧХ. Таким образом, следует говорить о некоторых диапазонах частот, которые соответствуют собственным колебаниям конструкций рефлекторов. В приведенных исследованиях данный диапазон составлял порядка 0,2 Гц. С ростом частоты возбуждения АЧХ для датчиков имеют все более хаотический характер, что вызвано проявлением в возрастающей степени нелинейных свойств конструкций рефлекторов антенн. На высоких частотах возбуждения колебания рефлекторов антенн сопровождаются дребезжанием вследствие люфтов в шарнирных соединениях стержней.

Известно, что в условиях эксплуатации конструкций космических антенн сила тяжести отсутствует. Определение же основных динамических характе-

ристик рефлекторов антенн проводили в наземных лабораторных условиях, при которых на значения исследуемых характеристик оказывает влияние сила тяжести. Для определения степени влияния силы тяжести конструкцию при испытаниях закрепляли различным образом по отношению к направлению ее действия — отражающим сетеполотном рефлектора вверх и вниз (см.

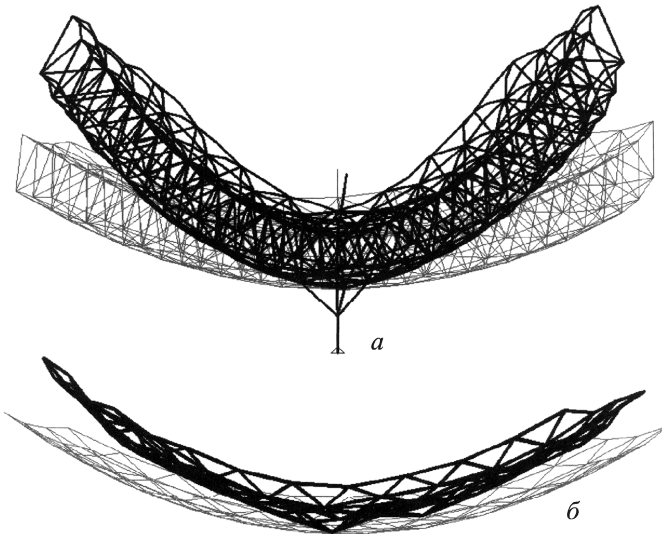


Рис. 12. Изгибные колебания рефлектора относительно его малой оси, частота 11,0 Гц:

a — теоретическая форма; *б* — экспериментальная форма

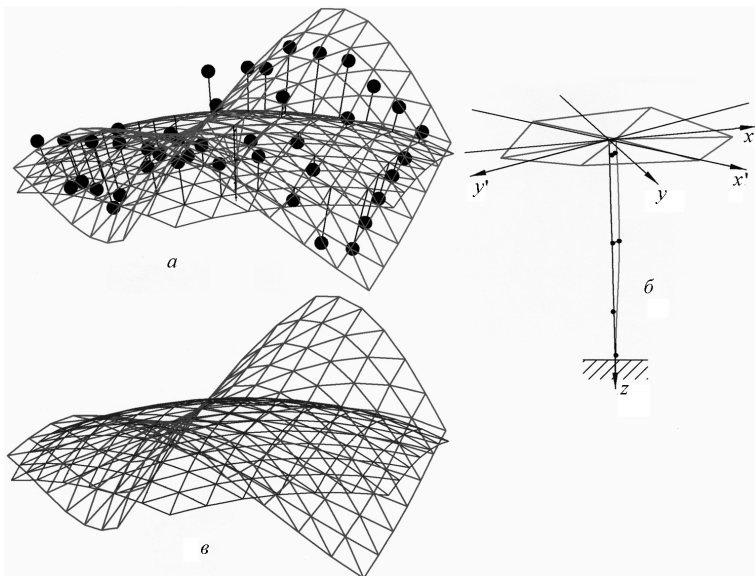


Рис. 13. Форма колебаний рефлектора в виде седловидной поверхности (гиперболический параболоид), частота 16,6 Гц:

a, б — темными точками обозначены датчики-акселерометры на экспериментально полученной форме рефлектора и стойки, соединяющей его со спутником; *в* — расчетная форма рефлектора

рис. 10). Оказалось, что значения частот и формы собственных колебаний в обоих случаях были достаточно близки. Это свидетельствует о возможности экспериментального определения динамических характеристик рефлекторов антенн при каком-либо одном варианте ее закрепления.

На рис. 12 показана форма упругих колебаний рефлектора антенны, стержни конструкции которой изготовлены из металла (см. рис. 9, а). На рис. 13 приведена форма упругих колебаний рефлектора, стержни которого выполнены из композиционного материала (рис. 9, б). В качестве базисных функций при сглаживании экспериментально полученных форм колебаний были взяты расчетные формы.

Исследования проведены в рамках поисковой научно-исследовательской работы (ГК № П776 от 20 мая 2010 г.) в рамках реализации ФЦП “Научные и научно-исследовательские кадры инновационной России” на 2010–2013 гг.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М е х а н и к а больших космических конструкций / Н.В. Баничук, Н.И. Карпов, Д.М. Климов и др. – М.: Факториал, 1977. – 302 с.
2. Б е й Н. А., З и м и н В. Н. Трансформируемые антенны больших размеров для геостационарных космических аппаратов // Антенны. – 2005. – № 10. – С. 24–27.
3. М и к и ш е в Г. Н. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1978.
4. З и м и н В. Н., К о л о с к о в И. М., М е ш к о в с к и й В. Е. Динамические испытания раскрывающейся зеркальной космической антенны // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2000. – № 2. – С. 120–124.

Статья поступила в редакцию 24.12.2010

Владимир Николаевич Зимин родился в 1958 г., в 1980 г. окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, директор НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители”. Автор 85 научных работ в области раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций.

V.N. Zimin (b. 1958) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1980. D. Sc. (Eng.), director of the Research Institute for Special Machinery Engineering of the Bauman Moscow State Technical University, professor of “Spacecrafts and Launch Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 85 publications in the field of deployable large space structures.

