

ПРОБЛЕМА РАСЧЕТА ВОЛНОВОДОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ

**Кудрявцев И.В., Барыкин Е.С., Гоцелюк О.Б., Горохова Е.Ю., Фоминцев Л.А.,
научный руководитель д-р техн. наук Сильченко П.Н.
Сибирский федеральный университет**

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-257.2013.8

Современными тенденциями в космическом машиностроении являются повышенные требования к функционально-эксплуатационным характеристикам, как отдельных узлов, блоков, систем, так и космического аппарата связи в целом.

Применительно к бортовой системе связи космического аппарата, это выражается в увеличении срока активного существования (САС), повышении мощности передаваемых сигналов, изменяются диапазоны частот и др., что приводит к возрастанию нагрузок на их конструкцию.

Одновременно, ведется поиск путей по снижению минимизации массогабаритных показателей всех механических систем и механизмов космического аппарата связи. Очевидно, что эти тенденции находятся в противоречии друг с другом, что приводит к необходимости разработки уточненных методов расчета для всех узлов, блоков и систем космического аппарата с учетом возможных воздействий на них в течении всех их этапов жизненного цикла, при изготовлении, сборке, монтаже и эксплуатации.

Одним из важнейших элементов космического аппарата являются волноводно-распределительные системы (ВРС) крупногабаритных антенно-фидерных устройств космических аппаратов связи, которые предназначены для передачи сигналов между приемо-передающими антеннами и бортовой аппаратурой.

Конструкция волноводно-распределительных систем состоит из отдельных участков в виде последовательного набора отдельных прямых и криволинейных тонкостенных элементов прямоугольного поперечного сечения, соединенных между собой при помощи пайки через соединительные муфты или фланцы [1].

На различных этапах жизненного цикла, волноводы подвергаются воздействию различных статических и динамических нагрузок: силовых, деформационных, температурных и др.

На этапе изготовления конструкция ВРС подвергается локальным температурным воздействиям при пайке элементов, совместно с силовыми нагрузками. При этом в каждом соединении происходит нарушение его действительной геометрии от расчетной вследствие различных причин: погрешности изготовления и установки элементов, смещения при пайке в индукционном поле и др.

При монтаже собранных участков ВРС на космический аппарат, вследствие накопленных отклонений в геометрии, отверстия на фланцах волновода могут не совпадать с местами крепления на антеннах и блоках КА. Принудительное совмещение данных креплений приведет к появлению монтажных напряжений, которые будут действовать на всем протяжении этапа эксплуатации космического аппарата, суммируясь с рабочими нагрузками, и в сумме могут превысить допустимые значения.

Этап эксплуатации состоит из двух частей: вывод космического аппарата на орбиту и его эксплуатация в течении заданного срока активного существования (10-15 лет).

В течении всего времени вывода на орбиту космический аппарат подвергается целому комплексу нагрузок. В результате ускорения ракеты-носителя после старта, на космический аппарат и все его системы действуют квазистатические нагрузки в виде

сил инерции. Работа двигателей ракеты-носителя вызывает появление вынужденных колебаний космического аппарата, а также акустические воздействия. В процессе полета на ракете-носителе происходит отделение ее отработавших ступеней, которое эквивалентно ударному нагружению.

После вывода космического аппарата на орбиту, в течении заданного САС, волноводы подвергаются температурным воздействиям, вызванных нагревом от солнечного излучения и работой различных его систем. Также, нагрев волноводов происходит и при передаче по ним сигналов большой мощности.

Условия работоспособности волноводов, помимо выполнения требований статической и динамической прочности на все вышеуказанные воздействия, включают в себя и ограничения на прогиб стенки для протяженных тонкостенных прямых и криволинейных элементов, поскольку искажение профиля их поперечного сечения отрицательно сказывается на качестве передаваемого сигнала и, следовательно, ухудшает работу антенно-фидерной системы КА в целом.

Для выполнения вышеуказанных требований, методика расчета должна позволять рассчитывать напряженно-деформированное состояние ВРС с соответствующей точностью, что для тонкостенных конструкций требует применения теории оболочек. Однако использование такого подхода приведет к тому, что для расчета участка ВРС из N тонкостенных прямых и криволинейных элементов необходимо будет составить и одновременно решить N систем дифференциальных уравнений равновесия высокого порядка с соответствующими граничными условиями.

Аналитическое решение такой задачи весьма сложно, а численные методы приводят к существенным погрешностям в решении, особенно в динамике.

Особенностью предлагаемого метода расчета является то, что с целью снижения сложности расчета все прямые и криволинейные тонкостенные элементы ВРС моделируются набором подобных «базовых» прямых тонкостенных элементов, соединенных между собой непосредственно, либо под некоторым углом с соответствующими условиями перехода для силовых и деформационных факторов. Это позволяет унифицировать решение и рассчитывать на основе одного «базового» элемента участка волноводов любой конфигурации.

Для описания напряженно-деформированного состояния тонкостенного «базового» элемента можно использовать теорию оболочек, поскольку для его конструкции выполняются известные гипотезы Кирхгофа.

Однако, существующая теория тонких оболочек и пластин имеет особенность, что она позволяет описывать напряженно-деформированное состояние (НДС) только таких конструкций, поверхность которых можно описать в двух главных направлениях координатных линий гладкими и непрерывными функциями главных радиусов кривизны $R_1(\alpha_1)$ и $R_2(\alpha_2)$. Для этого случая получено большое число вариантов дифференциальных уравнений равновесия оболочки, вывод которых незначительно различается используемым подходом [2,3,4].

Независимо от конкретного вида уравнений равновесия, всем им присущ тот недостаток, что в случае, если исследуемая тонкостенная конструкция будет иметь резкие изменения геометрии в каком-либо направлении (например, складки), то соответствующая им функция радиуса кривизны будет претерпевать разрыв, стремясь в области складки к нулевому значению:

$$R_i(\alpha_i) \rightarrow 0 \quad (i=1,2). \quad (1)$$

Использование разрывной функции радиуса кривизны приводит к трудностям в получении корректного аналитического решения, особенно в области складок,

вследствие необходимости использования разрывных функций [5], а также ошибок сопоставления малых и больших чисел из-за наличия в знаменателях членов системы уравнений равновесия бесконечно малой величины радиуса кривизны (1). При таком подходе для общего случая нагружения возможно получить только численное решение в виде рядов, однако их точность и сходимость зачастую являются неопределенными.

Поперечное сечение неосесимметричной конструкции «базового» элемента волновода содержит четыре угловых точки, в которых происходит разрыв функции радиуса кривизны, что не позволяет его описать одной непрерывной функцией, как того требует теория оболочек.

Выходом из данной ситуации является моделирование оболочечной конструкции волновода в виде составной конструкции из отдельных пластин, для описания напряженно-деформированного состояния которых теория оболочек и пластин.

Толщина стенки оболочечных элементов ВРС весьма мала, и ее прогиб может превышать толщину в несколько раз, следовательно, вывод разрешающих уравнений для пластинок необходимо сделать с учетом геометрической нелинейности задачи [4]. Для каждой пластинки нами получена система нелинейных дифференциальных уравнений, которая с учетом температурных воздействий будет иметь вид [1]:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^4 \omega_i &= \frac{1}{D} \left[\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial \alpha_i^2} h \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i^2} - 2h \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial \alpha_i \partial \beta_i} \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i \partial \beta_i} + \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial \beta_i^2} h \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \beta_i^2} - q_{\alpha i} \frac{\partial \omega_i}{\partial \alpha_i} - q_{\beta i} \frac{\partial \omega_i}{\partial \beta_i} + q_{z i} - \rho h \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial t^2} \right]; \\ \nabla^4 \varphi_i &= Eh \cdot \left(\left(\frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i \partial \beta_i} \right)^2 - \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i^2} \cdot \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \beta_i^2} \right) - E\alpha \nabla^2 (T - T_0), \quad \ddot{\alpha} \ddot{\alpha} \quad i = 1, 2, 3, 4. \end{aligned} \right\} (2)$$

Граничные условия для каждой пластинки определяют ее поведение в составе «базового» элемента в целом и условия нагружения по краям.

Система (2) определяет полное напряженно-деформированное состояние «базового» элемента в целом и учитывает взаимосвязь всех внутренних деформационных и силовых факторов при действии статических, динамических и температурных нагрузок.

Вместе с тем, система (2) для оболочечной конструкции «базового» прямого тонкостенного прямоугольного поперечного сечения элемента весьма сложна и нами в научной литературе не обнаружено информации об ее аналитическом решении [2].

Известны только частные случаи аналитического решения для отдельной пластинки при определенных упрощенных условиях нагружения и закрепления. На эту проблему указывал еще С.П. Тимошенко в своем известном труде [6] на стр. 463.

Проведенные конечно-элементные расчеты статического и динамического напряженно-деформированного состояния участков волноводов в известных пакетах (Ansys, Nastran) показали, что даже при незначительной протяженности участков ВРС необходимо большое число КЭ, которое существенно ограничивается ресурсами применяемой ЭВМ. Поэтому расчет для волноводно-распределительной системы в целом такой подход неэффективен.

Для выполнения проектно-конструкторских расчётов нами разработана методика расчета [1], согласно которой исследуемый участок или волноводно-распределительная система в целом моделируются пространственной стержневой конструкцией, потом выделяется опасный участок, который транслируется в виде твердотельной модели в ППП Ansys (Nastran и др.) и расчет его выполняется методом конечных элементов.

Для верификации полученных решений этой задачи нами была проведена серия экспериментов по исследованию напряженно-деформированного состояния прямых участков волноводов на действие простых видов нагружения в статической постановке [7].

Данные о состоянии волновода брались с миниатюрных тензодатчиков, закрепленных на нем в характерных точках таким образом, чтобы можно было оценивать как локальное, так и глобальное поведение исследуемой конструкции.

По полученным данным методом кубической интерполяции строились кривые деформированной формы тонкостенной конструкции волновода при различных простых случаях нагружения (растяжение-сжатие, изгиб, кручение).

На последнем этапе, общее численно-экспериментальное решение строим комбинированным, состоящим в основе из кубического сплайна и ряда уточняющих функций. В сумме, полное решение системы дифференциальных уравнений (2), описывающих статическое и динамическое состояние образцов будет иметь вид:

$$\omega(\alpha, \beta) = \omega_0(\beta) + \sum_n [\omega_{\text{ш}}(\alpha, \beta) + \omega_y(\alpha, \beta) + \omega_d(\beta) + \omega_z(\alpha, \beta)],$$
$$\varphi(\alpha, \beta) = \sum_n [\varphi_{\text{ш}}(\alpha, \beta) + \varphi_y(\alpha, \beta) + \varphi_d(\beta) + \varphi_z(\alpha, \beta)], \quad (3)$$

где $\omega_0(\beta)$ – кубический сплайн;

$\omega_z(\alpha, \beta)$ и $\varphi_z(\alpha, \beta)$ – функции в виде рядов Фурье, полученные на основе аппроксимации экспериментальных данных, уточняющие общее решение и подтверждающие его достоверность.

Уточняющие функции $\omega_z(\alpha, \beta)$ и $\varphi_z(\alpha, \beta)$ получены путем разложения в ряды Фурье кривых, построенных на деформированной поверхности образцов. Данные уточняющие функции будут подчинять общее решение полное решение системы дифференциальных уравнений (2) значениям в местах установки датчиков деформации для каждого из случаев простого нагружения.

Каждый этап решения оформлен в виде отдельного модуля (подпрограммы), которые в совокупности образуют единый вычислительный комплекс, рассчитывающий тонкостенные конструкции любой протяженности и конфигурации [8].

Результаты численных исследований используются в ОАО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнёва» при создании волноводно-распределительных систем космических аппаратов различного назначения («Экспресс», «Глонасс», «Луч-5А» и др.).

Библиографический список

1. Сильченко П.Н. Методика расчёта напряжённо-деформационного состояния волноводно-распределительных систем космических аппаратов / Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Наговицин В.Н. // Журнал СФУ. Серия: Техника и технологии. 2012 г. №2. С 150-161.
2. Новожилов В.В. Линейная теория тонких оболочек – Л., 1991. – 656 с
3. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки – М., пер. с англ. изд.3, 2009.– 640 с.
4. Вольмир А.С. - Гибкие пластинки и оболочки, М.,1956 - 420с
- 5 Михайлов Б.К.- Пластины и оболочки с разрывными параметрами, Л., 1980- 196с
6. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки/ С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер – М.: Эдиториал УРСС, пер. с англ. изд.3, 2009.– 640 с.
7. Разработка методов оценки прочности и живучести протяженных пространственных коробчатых тонкостенных оболочечных конструкций с неосесимметричной формой поперечного сечения: отчет по гранту РФФИ №12-08-31058, рук. Кудрявцев И.В.
8. Статический анализ прочностных параметров складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением / Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Барыкин Е.С. и др.// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661200 от 10.12.2012г.