

**НАЗЕМНАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОТРАБОТКА
АНТЕНН КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Рассмотрены вопросы построения экспериментально-теоретической методики обеспечения требований к параметрам трансформируемых антенн зонтичного типа.

Ключевые слова: антенна зонтичного типа, радиус кривизны, трансформируемая конструкция, оболочка, частота собственных колебаний, амплитуда.

Анализ известных технических решений исполнения трансформируемых антенн по совокупности их параметров показывает, что практический интерес представляют зеркальные антенны зонтичного типа. Зеркала таких антенн образованы отражающим электромагнитные волны гибким материалом, натянутым на каркас, выполненным из радиальных ребер, закрепленных в центральной ступице (втулке) и складываемых по принципу зонтика. Антенны зонтичного типа отличаются простотой, оперативностью процесса развертывания – свертывания, многократностью использования, устойчивостью конструкции к изменяющимся условиям внешней среды [1].

В составе космического аппарата (КА) на орбите требуется обеспечить электрические характеристики, а проектирование, конструирование и отработку провести с учетом влияния особенностей самой трансформируемой конструкции.

Испытаниям трансформируемых антенн уделено много внимания. Многочисленных отказов на орбите удастся избежать за счет обнаружения возможных отказов во время наземной экспериментальной отработки (НЭО). Трансформируемая антенна должна пройти всестороннюю качественную проверку, сводящую к минимуму риски отказов в работе космического аппарата на орбите. Стандартные правила определения объема испытаний, необходимого для трансформируемых антенн, устанавливаются на проектных стадиях разработки. Данный подход к верификации летной матчасти был разработан на основании существующего опыта. Он настоятельно рекомендуется для всей матчасти, так как является необходимым для раскрываемых систем.

Испытания крупногабаритных трансформируемых конструкций представляют собой уникальный метод для конструкций, которые не являются устойчивыми. По этим же причинам испытания необходимы. Из-за большого количества вопросов, относящихся к правильному функционированию раскрываемых систем, они не могут быть полностью решены только аналитическим методом. Важно также знать, каким образом проводить испытания для конструкций, которые не могут поддерживать свой собственный вес.

В процессе НЭО устройств КА решаются следующие задачи:

– квалификация системы на соответствие системы нормативным требованиям по внешним воздействиям;

– подтверждение функционирования и работоспособности системы после (во время) внешних воздействий;

– выявление дефектов сборочных и монтажных операций;

– подтверждение устойчивости технологических процессов;

– выдача заключения о положительных результатах испытаний и допуск к последующему этапу.

Целью испытаний является *подтверждение правильности* заложенных конструктивных решений; прочности несущих элементов конструкции; работоспособности трансформируемых антенн в условиях, приближенных к эксплуатационным; влияния воздействия факторов нагружения на геометрическую форму; *выявление* возможных конструктивных и технологических дефектов; определение коэффициентов вибропередачи в элементах конструкции, усилий срабатывания замков зачековки; моментов сопротивления в шарнирных узлах [2].

Задачи испытаний следующие:

– подтверждение первых собственных частот объекта испытаний в трех направлениях в сложном состоянии (испытания по определению жесткости);

– подтверждение достаточности несущей способности силовой конструкции;

– проведение испытаний на раскрытие в нормальных условиях;

– подтверждение заданной точности в раскрытом положении в ходе проведения испытаний.

Критериями положительной оценки результатов испытаний являются:

– сохранение целостности объекта испытаний после (во время) воздействия механических нагрузок. Отсутствие механических повреждений;

– соответствие жесткости объекта испытаний техническим требованиям (собственная частота объекта испытаний в сложном положении, жестко закрепленном по стыку с платформой не ниже чем 40 Гц в продольном направлении и 15–17 Гц в поперечном направлении);

– сохранение заданной зонтичной поверхности конструкции антенны в раскрытом положении в пределах 1,5 мм (отклонение профиля поверхности зеркала от параболоида вращения);

– подтверждение работоспособности механических устройств зачековки и раскрытия при десяти раскрытиях (срабатывание устройства зачековки –

расчетки; срабатывание контактных датчиков; раскрытие конструкции в рабочем положении под действием приводов за определенное время, например, 90...270 с; фиксация антенны в рабочем положении; запас по приводному моменту раскрытия больше трех относительно момента сопротивления раскрытию на всей траектории раскрытия).

Характерной особенностью зонтичных антенн является периодическое (по азимутальной координате) отклонение профиля поверхности зеркала между ребрами от параболоида вращения. Электрические характеристики складной антенны зонтичного типа существенно зависят от степени этого отклонения. Поэтому при моделировании зонтичных антенн на ЭВМ важно знать форму отражающей поверхности между ребрами. Для этого может быть использована теория оболочек.

Рассмотрим влияние растягивающих усилий в срединной поверхности на частоту собственных колебаний. Если статистический прогиб оболочки не мал, по сравнению с ее толщиной, то при вычислении собственных частот нужно учесть растягивающие усилия в срединной поверхности. Наличие этих усилий приводит к увеличению потенциальной энергии и, следовательно, к повышению частоты собственных колебаний. Известен метод С. П. Тимошенко [3] и приближенная оценка влияния растяжения срединной поверхности вследствие изгиба на частоту первого тона круглой защемленной по контуру пластины [4]:

$$\omega_1 = \frac{10,33}{R^2} \sqrt{\frac{D}{m_0}} \sqrt{1+1,464 \frac{f_{ст}^2}{h^2}}, \quad (1)$$

где $f_{ст}$ – статический прогиб центра пластины. С увеличением отношения $f_{ст}/h$ частота собственных колебаний возрастает. По этой же причине частота собственных колебаний будет повышаться с увеличением амплитуды колебаний. Здесь мы имеем дело с нелинейными колебаниями.

Если зонтичную антенну представить по форме в виде полой сферической оболочки, то известен расчет собственных осесимметричных колебаний. Уравнение колебаний имеют вид [4]

$$\nabla^4 \omega + \frac{Eh}{DR^2} \omega + \frac{r_0^4}{D} \rho_0 h \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = 4 \frac{r_0^2}{DR} (C_2 + C_4 \ln \rho), \quad (2)$$

где R, h, ρ_0 – радиус кривизны, толщина и плотность материала оболочки; r_0 – краевой радиус (радиус контура оболочки); r – расстояние от произвольной точки оболочки до оси симметрии; $\rho = \frac{r}{r_0}$.

Полагая, что колебания совершаются в соответствии с одной из собственных форм $\omega_i(\rho)$, из уравнения (2) получаем

$$\nabla^4 \omega_i - k_i^4 \omega_i = 4 \frac{r_0^2}{DR} (C_2 + C_4 \ln \rho), \quad (3)$$

$$k_i^4 = \frac{r_0^4}{D} Eh \left(\frac{\rho_0 \omega_i^2}{E} - \frac{1}{R^2} \right). \quad (4)$$

Для оболочки, защемленной по контуру, граничными условиями будут

$$\rho = 1, \quad \omega_i = 0, \quad \omega_i' = 0, \quad \varepsilon_\phi = 0, \quad (5)$$

где ε_ϕ – деформация в окружном направлении.

Ниже приведены результаты решения уравнения (3) при условиях (5). Характеристическое уравнение для определения собственных чисел k_i , с помощью которых находят частоты собственных колебаний, имеет вид

$$\begin{aligned} & [J_0(k_i)I_1(k_i) + I_0(k_i)J_1(k_i)] \times \\ & \times \left[\frac{R^2 h^2 k_i^4}{12r_0^4(1-\mu^2)} + 1 \right] + \\ & + \frac{1}{1-\mu} \left[\frac{2(1+\mu)_0 J_1(k_i)I_1(k_i)}{k_i} - \right. \\ & \left. - (J_0(k_i)I_1(k_i) + I_0(k_i)J_1(k_i)) \right] = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

здесь J_0, J_1 – функции Бесселя первого рода, I_0, I_1 – модифицированные функции Бесселя первого рода.

В случае тонкой оболочки с малой степенью пологости $\frac{h}{r_0} \leq \frac{1}{30}$, $\frac{H_1}{2r_0} \leq \frac{1}{10}$ для основного тона по сравнению с единицей, слагаемым

$$\frac{R^2 h^2 k_i^4}{12r_0^4(1-\mu^2)}$$

в уравнении (6) можно пренебречь, и это уравнение упрощается:

$$-J_0(k_i)I_1(k_i) + I_0(k_i)J_1(k_i) + 4 \frac{J_1(k_i)I_1(k_i)}{k_i} = 0. \quad (7)$$

Из равенства (4) получаем формулу для вычисления частоты собственных колебаний:

$$\omega_i^2 = \frac{E}{\rho_0} \left[\frac{1}{R^2} + \frac{k_i^4 h^2}{12r_0^4(1-\mu^2)} \right]. \quad (8)$$

Уравнение (6) имеет один нулевой корень $k_0 = 0$, которому соответствует низшая безузловая форма колебаний (при колебаниях во всех точках одновременно увеличивается или уменьшается радиус кривизны сферической оболочки). Соответствующая этому корню частота равна

$$\omega^2 = \frac{E}{\rho_0 R^2}. \quad (9)$$

В трансформируемых конструкциях антенн космических аппаратов одной из основных характеристик является жесткость.

При проектировании и конструировании жесткость определяется теоретически исходя из геометрических характеристик конструкции и материалов, например, по предложенной методике в первом приближении.

При выявлении стержневых элементов с несовершенствами формы, а также при определении устойчивости конструкций рекомендуется использовать ре-

зультаты анализа и совершенствования методик оценки технического состояния элементов стержневых конструкций и их устойчивости, приведенные в работах [5; 6].

Определяется амплитуда и частота собственных колебаний конструкции и сравнивается с требованиями ТЗ.

Однажды сам алгоритм расчета должен быть протестирован, а конструкция трансформируемой антенны квалифицирована на соответствие требованиям ТЗ.

Для этого проводятся испытания, при которых экспериментально определяются амплитуды и частоты колебаний конструкции. Затем находят жесткость. Определяют характеристики на соответствие требованиям ТЗ.

Предлагается в первом приближении по указанной методике определить собственную частоту колебаний зонтичной антенны в раскрытом напряженном состоянии, уточнив необходимые параметры по результатам НЭО: плотность, толщину и др.

Библиографические ссылки

1. Гряник М. В., Ломан В. И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. М. : Радио и связь, 1987.

2. Шатров А. К., Назарова Л. П., Машуков А. В. Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2006.

3. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки / пер. с англ. В. И. Контовта ; под ред. Г. С. Шапиро. 2-е изд., стереотип. М. : Наука, 1966.

4. Основы строительной механики ракет : учеб. пособие для вузов / Л. И. Балабух, К. С. Колесников, В. С. Зарубин и др. М. : Высш. шк., 1969.

5. Ереско С. П., Алифанов Л. А., Морозов С. В. Анализ методик оценки технического состояния стержневых элементов металлоконструкций с несовершенствами формы // Вестник университетского комплекса / под общ. ред. Н. В. Василенко. Красноярск : ВСФ РГУИТП, НИИ СУВПТ. 2006. Вып. 7 (21). С. 3–7.

6. Ереско С. П., Алифанов Л. А., Морозов С. В. О совершенствовании расчетных методик оценки устойчивости при проектировании металлоконструкций // Вестник университетского комплекса / под общ. ред. Н. В. Василенко. Красноярск : ВСФ РГУИТП, НИИ СУВПТ. 2006. Вып. 8 (22). С. 190–192.

G. V. Dvirniy, S. P. Eresko

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL GROUND-BASED TESTING OF SPACECRAFT ANTENNAS

In this article the authors consider design aspects of experimental-theoretical procedure, supporting the requisitions to parameters of transforming umbrella-form antennas.

Keywords: umbrella antenna, curve radius, flexible structure, shell, natural frequency, amplitude.

© Двирный Г. В., Ереско С. П., 2012

УДК 532.542:621.67-762:62

М. В. Краев

ТУРБУЛЕНТНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ «ЖИДКОСТЬ–ГАЗ» ПОЛОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ РОТОРНЫХ ГИДРОМАШИН*

На основе представленной картины течения в поле центробежных сил жидкости и газа в межлопаточном канале полуоткрытого рабочего колеса роторной гидромашины выполнен расчет параметров поверхности раздела «жидкость–газ» с анализами устойчивости вращающейся поверхности с экспериментальными данными.

Ключевые слова: рабочее колесо, вращение, вихрь, поверхность, граница раздела, жидкость–газ.

Высокооборотные роторные гидромашин (ГМ) широко применяются в качестве агрегатов подачи различных рабочих тел в энергодвигательных установках летательных аппаратов (ЛА), ротор которых состоит из различных типов рабочих колес, дисков, узлов уплотнений, систем перепусков и т. п. [1].

Вопросам исследования гидродинамики плоскостей вращения роторных гидромашин с частично смоченной торцевой поверхности полуоткрытого рабочего колеса (РК) посвящены работы [2; 3; 4],

авторы которых принимают в расчетах, что граница раздела жидкостной и газовой фаз представляют собой размытую цилиндрическую поверхность. Такой подход приводит к существенным ошибкам в расчетах осевых сил ротора агрегата и неопределенности о работоспособности расположенных на валу уплотнительных устройств [5].

Картина течения между вращающимися РК полуоткрытого типа с радиальными лопатками и гладкими корпусами довольно сложна.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. ГК № 231 от 23.04.2010 г.