

УДК 539.3

А.П. Жуков

РЕАКЦИЯ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНОГО РЕФЛЕКТОРА НА ДЕЙСТВИЕ ВОЗМУЩАЮЩЕГО ИМПУЛЬСА

Рассматривается свободно движущийся космический аппарат с крупногабаритным зонтичным рефлектором. Численно исследуется реакция отражающей поверхности рефлектора на действие возмущающего импульса. Учитываются различные особенности конструкции.

Ключевые слова: динамика, крупногабаритный рефлектор, космический аппарат, собственная частота.

К настоящему времени в системах космической связи и мониторинга земной поверхности широкое применение нашли крупногабаритные зонтичные рефлекторы с отражающей поверхностью из сетеполотна. С 2008 по 2011 г. в космос будут выведены 16 рефлекторов такого типа с диаметром апертуры до 22 м [1].

Крупногабаритный космический рефлектор относится к механическим системам с малым уровнем жесткости. Функционирование космического аппарата (КА) вызывает изменяющееся во времени возмущение отражающей поверхности, к качеству которой предъявляются жесткие требования. Ее среднеквадратическое отклонение (СКО) не должно превышать $1/50$ рабочей длины волны [2]. Вследствие этого становится актуальной задача определения реакции крупногабаритного рефлектора на различные динамические возмущения.

Динамике больших космических конструкций посвящено достаточно много работ, например [3], [4], в которых содержится обширная библиография по этой теме. Однако вопросы динамики свободно движущегося КА, имеющего в своем составе деформируемый рефлектор и панели солнечных батарей, освещены в открытой литературе очень скудно. В этой связи следует упомянуть работу [5], в которой методом суперпозиции мод ставится задача о движении КА.

В настоящей работе численными методами исследовалась реакция зонтичного рефлектора на возмущающие импульсы, приложенные к корпусу КА.

На рис. 1 показан общий вид и основные элементы конструкции рефлектора зонтичного типа.

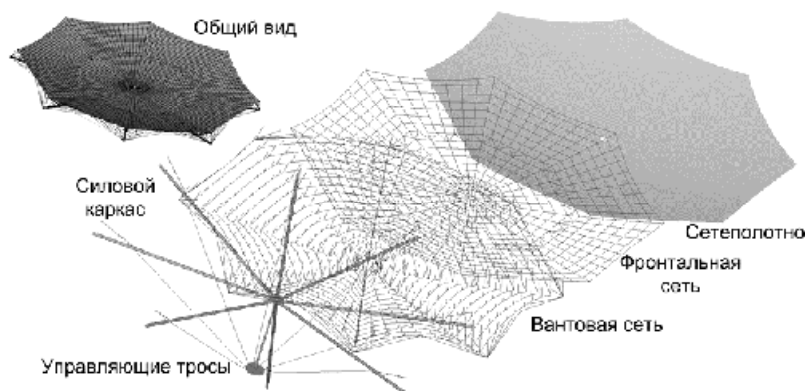


Рис. 1. Общий вид и основные элементы конструкции зонтичного рефлектора

Общий вид рассматриваемого КА с рефлектором и панелями солнечных батарей показан на рис. 2. Видно, что конструкция симметрична.

Рефлектор имел следующие геометрические параметры. Диаметр апертуры 12 м. Силовой каркас состоял из 12 спиц.

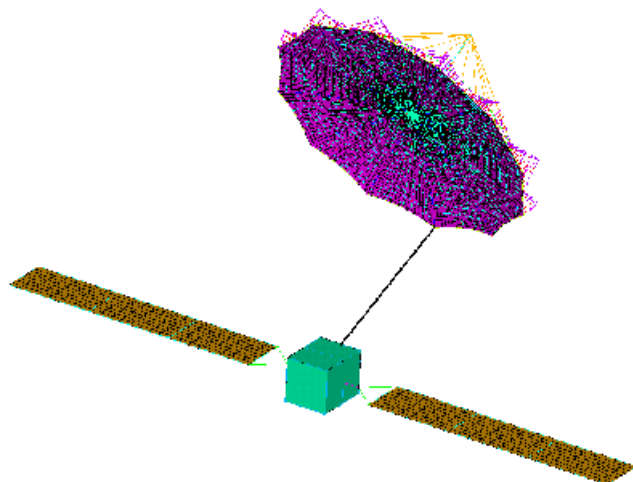


Рис. 2. Общий вид рассматриваемой модели КА

Рассматривалось два варианта вантовой сети: арочный (рис. 3, *а*) и подкосный (рис. 3, *б*).

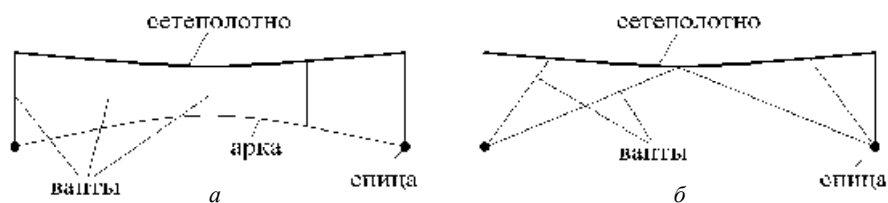


Рис. 3. Вантовая сеть: *а* – арочный вариант; *б* – подкосный вариант

Рефлектор крепился к корпусу КА с помощью трубчатой штанги за ступицу (рис. 4, *а*) либо за спицу (рис. 4, *б*).

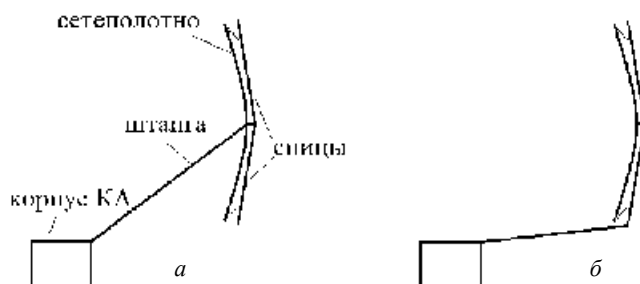


Рис. 4. Схема крепления рефлектора: *а* – за ступицу; *б* – за спицу

Движение свободного КА описывается нестационарной системой уравнений механики сплошных сред, которая учитывает геометрически нелинейный характер деформирования конструкции [6].

КА вместе с рефлектором и панелями солнечных батарей рассматривается как область Ω , представляющая совокупность конечного числа подобластей ω_m , $\Omega = \sum_m \omega_m$ [6]. Каждая подобласть ω_m заполнена материалом с заданными физико-механическими свойствами. Тогда для элементарного объема с центром в точке $\underline{x} \in \Omega$, $\underline{x} = (x_1, x_2, x_3)$, система уравнений движения записывается в виде [7]

$$\rho_m \ddot{u}_i = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\sigma_{kj} \left(\delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right); \quad (1)$$

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

$$\sigma_{ij} = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} (\varepsilon_{ij} + \frac{\nu_m}{1-2\nu_m} \delta_{ij} \varepsilon_{kk}) + \sigma_{ij}^0, \quad (3)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера; u_i , σ_{ij} , σ_{ij}^0 , ε_{ij} – компоненты вектора перемещения, второго тензора напряжений Пиолы – Кирхгофа, тензора предварительных напряжений, тензора деформаций; ρ_m , E_m , ν_m – плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона m -го материала.

Следует заметить, что закон Гука (3) записан для изотропного линейно-упругого материала. В то же время сетеполотно обладает существенной ортотропией и нелинейной зависимостью $\sigma(\varepsilon)$. Однако численными исследованиями показано [8], что в зонтичном рефлекторе условия нагружения сетеполотна таковы, что без существенной погрешности можно использовать линейно-упругую модель материала.

Система уравнений (1) – (3) дополняется начальными и граничными условиями. Граничные условия имеют вид

$$n_k \sigma_{kj} \left(\delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = p_i^n, \quad \bar{x} \in S, \quad (4)$$

где S – граница Ω ; p_i^n – напряжение на границе, характеризуемой вектором нормали $\bar{n}$.

Так как начальное напряженно-деформированное состояние рефлектора нельзя найти из каких-либо очевидных соображений, то для его определения требуется решение отдельной задачи. Решение этой задачи [6] эквивалентно выполнению процедуры настройки рефлектора, когда ищется такое напряженно-деформированное состояние, при котором отражающая поверхность имеет минимальное среднеквадратичное отклонение (СКО) от формы идеального параболоида.

Для определения спектра собственных частот и форм колебаний система уравнений (1) – (3) линеаризовалась в окрестности напряженно-деформированного состояния рефлектора, полученного после процедуры настройки [6].

Задачи настройки и динамики решаются методом конечных элементов [9], [10] с использованием пакета программ ANSYS.

При проведении расчетов рассматривался КА со следующими распределением массы и характеристиками жесткости: полная масса КА – 2900 кг; масса панелей солнечных батарей – 130 кг; масса рефлектора – 70 кг; жесткость штанги на изгиб ($EJ_{изг}$) – $2,56 \cdot 10^4$ Н/м²; жесткость штанги на кручение ($EJ_{кр}$) – $5,11 \cdot 10^4$ Н/м²; жесткость спиц и жесткость штанги одинаковы.

На рис. 5 показаны спектры собственных частот КА для различных вариантов вантовой сети и способов крепления рефлектора.

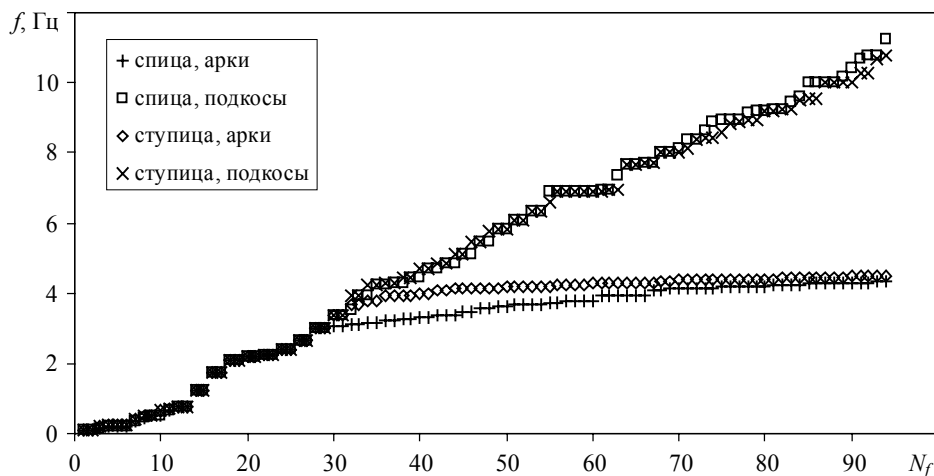


Рис. 5. Спектр собственных частот (N_f – номер частоты)

Вид спектральной зависимости в значительной степени зависит от конечно-элементного представления вантовой системы. Аппроксимация вант двумя или более конечными элементами порождает большое количество близко расположенных частот, которые маскируют существенно важные формы колебаний. На графиках колебания вантовой сети обычно начинаются с точки излома, как это можно видеть на рис. 5 (арочная вантовая система).

В рассматриваемой конечно-элементной модели КА ванты аппроксимируются одним элементом. Поэтому в рассчитанных спектрах рефлектора с подкосной системой вант отсутствуют колебания, относящиеся собственно к вантам. Арки аппроксимируются несколькими элементами (на единицу меньше, чем число вант, относящихся к данной арке). В результате в соответствующих спектрах имеются точки излома и частоты, относящиеся к колебаниям арочной вантовой системы. Во всех случаях наименьшая собственная частота составила 0,08 Гц, что соответствовало колебаниям панелей солнечных батарей. На рис. 5 видно, что начальные участки спектров, включающие около тридцати первых собственных частот, практически совпадают. Собственные формы колебаний, относящиеся к этим частотам, включают изгибные и крутильные колебания панелей солнечных батарей, колебания (поступательные и вращательные) рефлектора на штанге.

Более высокие частоты в основном соответствуют колебаниям рефлектора как конструкции, т.е. колеблются части и отдельные элементы рефлектора. Спектры, соответствующие подкосной системе, близки к линейными, а влияние на них способа крепления рефлектора к КА (за ступицу или за спицу) оказалось несущественным.

Для арочной вантовой системы заметно влияние способа крепления рефлектора. В окрестности точки излома собственные частоты, соответствующие креплению рефлектора за спицу, оказались приблизительно на 0,5 Гц ниже, чем при закреплении за ступицу. С увеличением номера частоты это различие уменьшается.

Для исследования реакции рефлектора на действие управляющего импульса корпусу КА сообщался момент импульса M_p . Для этого прикладывался момент сил M_f , действовавший в течение заданного промежутка времени Δt :

$$M_f(t) = \begin{cases} M_f^{(a)}, & 0 \leq t \leq \Delta t, \\ 0, & t > \Delta t. \end{cases} \quad (5)$$

Из (5) видно, что зависимость $M_f(t)$ представляет прямоугольный импульс с амплитудой $M_f^{(a)}$ и длительностью Δt . Направление вектора M_f было перпендикулярно плоскости симметрии КА (рис. 2).

Связь между моментом импульса и моментом сил, с учетом (5), имеет вид

$$M_p = \int_0^{\Delta t} M_f \cdot dt = M_f^{(a)} \cdot \Delta t. \quad (6)$$

Из выражения (6) по заданным значениям M_p и Δt находится величина $M_f^{(a)}$.

Реакция рефлектора на действие возмущения определяется по величине относительного СКО (СКО_{отн}), которое равно отношению возмущенного СКО к величине СКО в равновесном состоянии.

Рассмотрим КА с рефлектором, закрепленным за ступицу, и арочной вантовой системой. На рис. 6 показано изменение во времени СКО_{отн} рефлектора при сообщении корпусу КА момента импульса $M_p=1$ кг·м²/с. Время действия импульса $\Delta t = 0,25$ с, 2 с, 3 с.

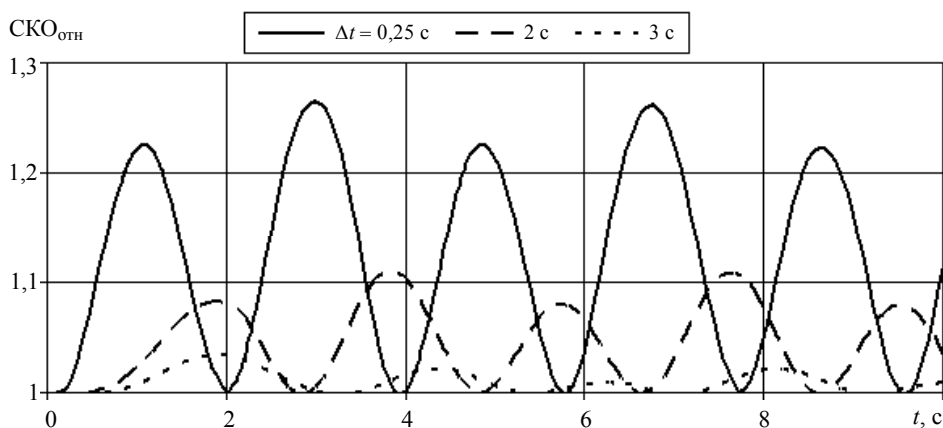


Рис. 6. Изменение СКО_{отн} при действии $M_p = 1$ кг·м²/с

После окончания действия возмущения сетеполотно свободно колеблется с периодом 3,79 с (0,264 Гц). С увеличением продолжительности действия импульса амплитуда свободных колебаний падает. Одной из причин этого является уменьшение величины действующего вращающего момента (6).

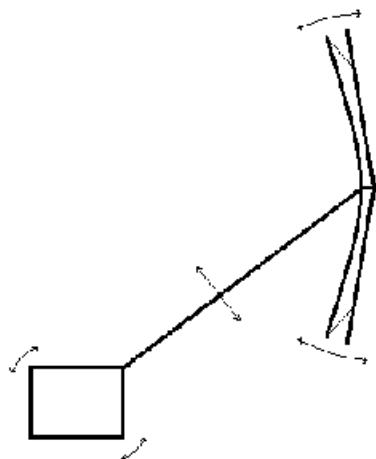


Рис. 7. Форма колебаний КА с частотой 0,264 Гц

На рис. 7 показана соответствующая форма колебаний. Она состоит из поворотов рефлектора относительно ступицы, поворотов корпуса КА, а также изгибных движений штанги.

Одной из особенностей свободных колебаний сетеполотна является различие в амплитудах двух соседних полупериодов (рис. 6). Если считать, что первый полупериод имеет максимальную амплитуду, то амплитуда второго оказывается несколько меньше.

На рис. 8 показано распределение отклонения сетеполотна от поверхности идеального параболоида, соответствующее различным фазам колебания, при $\Delta t = 0,25$ с. На этих рисунках верх рефлектора находится справа, а низ слева.

В первом полупериоде (рис. 8, а) нижняя часть сетеполотна смещается вниз на $\approx -0,74$ мм, а верхняя вверх на $\approx 5,5$ мм. Во втором полупериоде (рис. 8, б) все происходит наоборот: нижняя часть $\approx 4,3$ мм; верхняя $\approx -1,9$ мм.

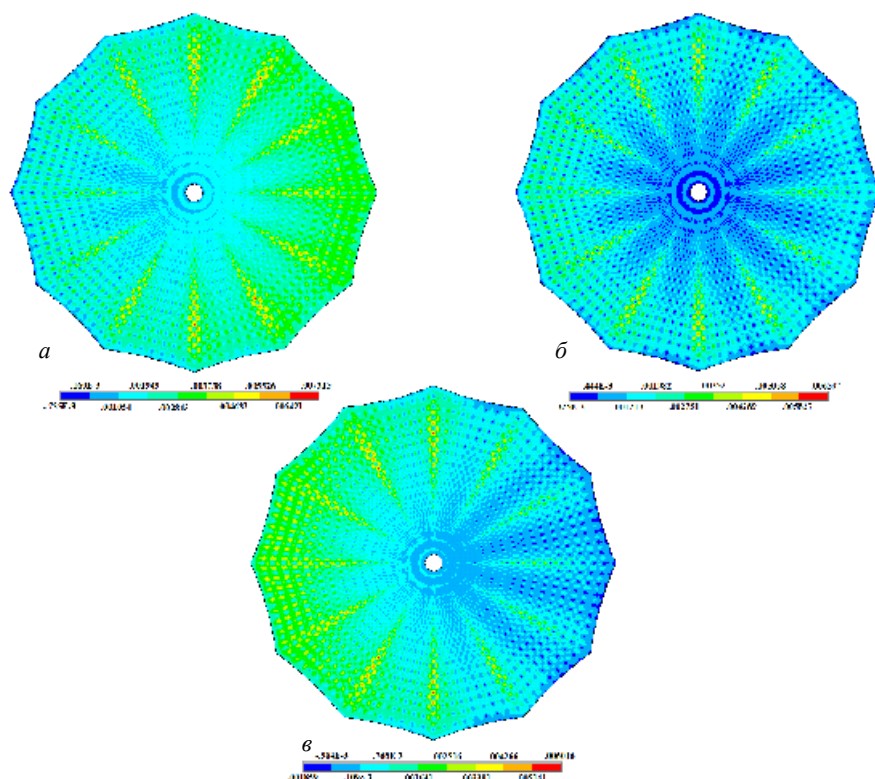


Рис. 8. Колебание сетеполотна: а – первый полупериод, $СКО_{отн}$ – максимально; б – $СКО_{отн} = 1$; в – максимум второго полупериода

Такой результат объясняется тем, что рефлектор является офсетным и зеркало антенны является поверхностью переменной кривизны. В нижней части кривизна больше, а в верхней меньше. Кроме этого, существует натяжение самого сетеполотна, фронтальной сети и вантовой системы. В результате там, где кривизна больше, перемещение вниз затруднено, так как при этом увеличивается кривизна, чему препятствует натянутая вантовая сеть и сетеполотно. Перемещение вверх ограничивает натянутая вантовая сеть. Там, где кривизна меньше, ограничивающие факторы действуют слабее. В пределе плоской поверхности сетеполотно должно колебаться симметрично.

Ранее уже упоминалось, что с увеличением Δt амплитуда свободных колебаний сетеполотна уменьшается, отчасти объясняя это уменьшением величины $M_f^{(a)}$. Еще один эффект, приводящий к уменьшению амплитуды колебаний, состоит в следующем. В начальный момент в конструкции КА под действием возмущающего импульса возбуждаются колебания. Окончание действия импульса приводит к возбуждению таких же колебаний, но обратного знака. Если разность фаз кратна 2π , то происходит гашение колебаний.

На рис. 9 показано изменение $СКО_{отн}$ во времени при $M_p=1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$ и $\Delta t=3,79 \text{ с}$, равному периоду возбуждаемых колебаний. В этом случае колебания с частотой $0,264 \text{ Гц}$ отсутствуют. Остаточные колебания относятся к другой моде, имеют частоту $0,7 \text{ Гц}$ и безразмерную амплитуду $5,4\cdot 10^{-4}$.

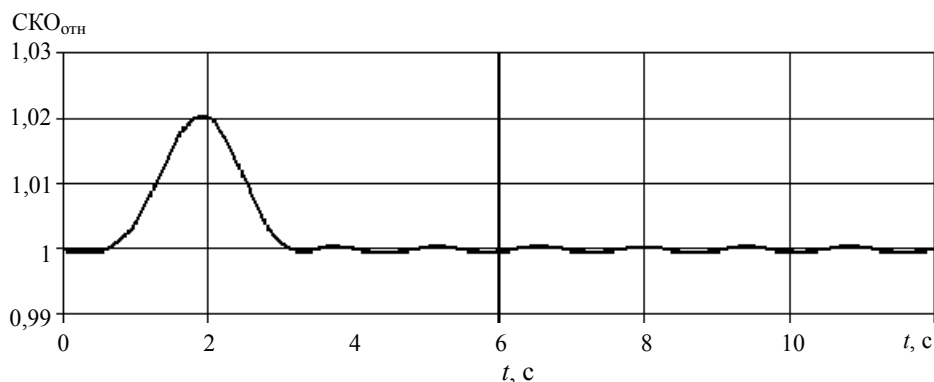


Рис. 9. Изменение $СКО_{отн}$ при действии $M_p=1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$ и $\Delta t=3,79 \text{ с}$

Расчеты показали, что динамика отражающей поверхности рефлектора с арочной вантовой системой и закреплением за ступицу качественно полностью переносится на конструкции с другими вариантами вантовой системы и способом крепления к КА. В таблице приведены соответствующие частоты колебаний сетеполотна.

Частоты колебаний сетеполотна

Крепление за ступицу		Крепление за спицу	
арки	подкосы	арки	подкосы
0,264 Гц	0,264 Гц	0,174 Гц	0,176 Гц

На рис. 10 представлен обобщенный график изменения величины амплитуды колебаний $СКО_{отн}$ при свободных колебаниях в зависимости от длительности возмущающего импульса, $M_p=1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$. Увеличение Δt приводит к уменьшению

амплитуды $СКО_{отн}$. Амплитуда равна 1, когда длительность импульса и период колебаний становятся одинаковыми. Дальнейшее увеличение Δt приводит к увеличению амплитуды. Но это повышение примерно в 15 раз меньше, чем при $\Delta t = 0,25$ с. Когда Δt становится равным двум периодам колебаний амплитуда $СКО_{отн}$ снова достигает минимума.

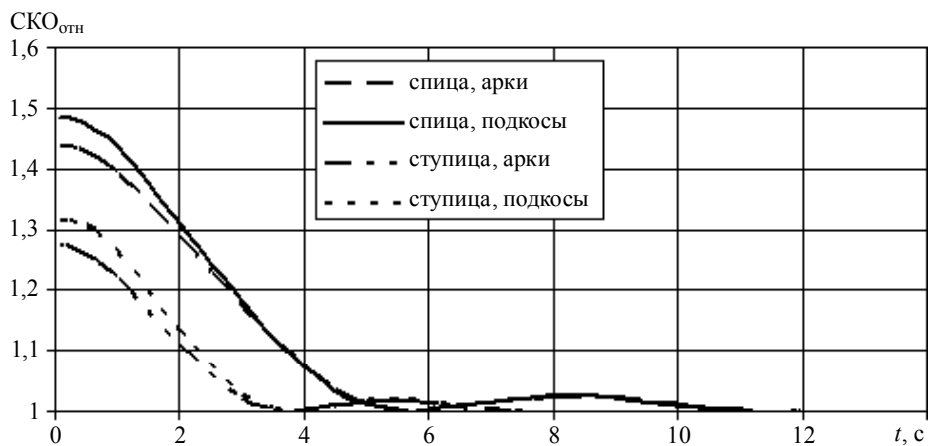


Рис. 10. Зависимость амплитуды колебаний $СКО_{отн}$ от длительности импульса Δt , $M_p = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$

На рис. 11 представлены результаты расчетов максимальной амплитуды свободных колебаний $СКО_{отн}$ при различных величинах возмущающего импульса M_p . Длительность импульса равнялась 0,25 с (рис. 11, а) и 3 с (рис. 11, б).

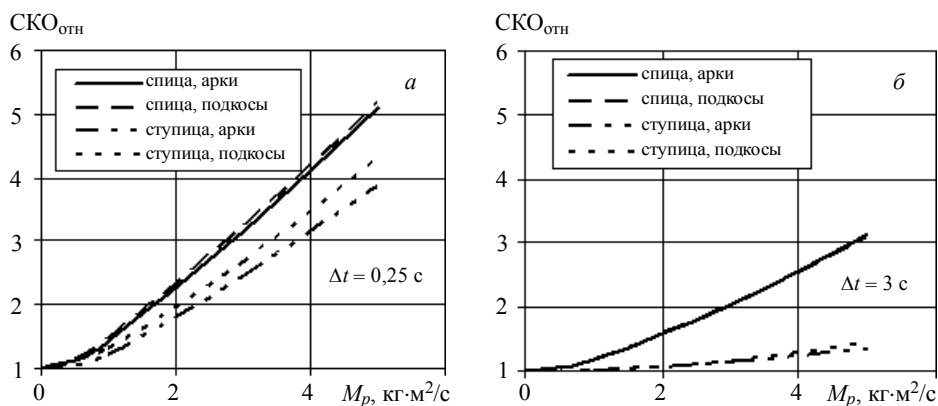


Рис. 11. Зависимость амплитуды колебаний $СКО_{отн}$ от величины импульса M_p

Полученные зависимости имеют нелинейный характер, особенно в интервале $0 < M_p < 1$. При $M_p > 1$ нелинейность выражена слабо. Наибольшая величина $СКО_{отн}$ достигается при закреплении рефлектора за спицу. Однако в этом случае влияние типа вантовой системы незначительно. Крепление за ступицу наоборот обеспечивает относительно меньший уровень $СКО_{отн}$, но увеличивает различия, обусловленные типом вантовой сети (рис. 11, а).

Увеличение продолжительности импульса ($\Delta t = 3$ с, рис. 11, б) приводит к уменьшению величины $СКО_{отн}$ и зависимости от типа вантовой сети.

Таким образом, проведен численный анализ динамики свободного КА с крупногабаритным зонтичным рефлектором при сообщении корпусу КА заданной величины момента импульса. Рассмотрены различные типы вантовой системы и способы крепления рефлектора к КА. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- возмущающий импульс вызывает в сетеполотне свободные колебания одной частоты (влияние других форм колебаний незначительно);
- изменение в широких пределах величины Δt не меняет частоту колебаний сетеполотна;
- при заданном значении M_p увеличение Δt приводит к уменьшению амплитуды колебаний сетеполотна;
- при Δt , кратном периоду колебаний, происходит гашение свободных колебаний ($СКО_{отн} = 1$);
- лучшие динамические характеристики обеспечивает рефлектор с арочной вантовой сетью, закрепленный за ступицу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomson M.W. Mechanical vs. inflatable deployable structures for large apertures or still no simple answers // Large Space Apertures Workshop – California Institute of Technology, Pasadena, California, November 10 – 11, 2008.
2. Meguro A., Harada S., Watanabe M. Key technologies for high-accuracy large mesh antenna reflector // Acta Astronautica. 2003. V. 53. P. 899–908.
3. Баничук Н.В. и др. Механика больших космических конструкций. М.: Факториал, 1997.
4. Nurre G.S., Ryan R.S., Scofield H.N., Sims J.L. Dynamics and control of large space structures // J. Guidance, Control, and Dynamics. 1984. V. 7. No. 5. P. 514–526.
5. Клишев О.П., Халиманович В.И. Анализ упругих деформаций космического аппарата на искажение формы отражающих поверхностей крупногабаритных элементов конструкции. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. 2008. Вып. 1 (18). С. 115–118.
6. Жуков А.П., Пономарев С.В. Оценка динамических характеристик космического аппарата. // Изв. вузов. Физика. 2010. № 12/2. С. 125–131.
7. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
8. Жуков А.П., Пономарев С.В. Оценка влияния физико-механических свойств сетеполотна на форму отражающей поверхности рефлектора зонтичного типа // Изв. вузов. Физика. 2010. № 12/2. С. 118–124.
9. Зенкевич О. Методы конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
10. Оден Д. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М.: Мир, 1976. 464с.

Статья поступила 20.10.2011 г.

Zhukov A.P. RESPONSE OF THE REFLECTIVE SURFACE OF A LARGE SPACE REFLECTOR TO ACTION OF A DISTURBING PULSE. A freely moving spacecraft with a large umbrella reflector is considered. Reaction of the reflecting surface of the reflector to action of an impulsive disturbance is numerically investigated. Various features of the design are considered.

Keywords: dynamics, large space reflector, spacecraft, eigenfrequency.

ZHUKOV Andrey Petrovich (Tomsk State University)

E-mail: psvh@psy.tsu.ru