



УДК 629.7.017.26

В. Д. Атамасов, И. И. Дементьев, В. И. Погорелов, А. Н. Устинов

Методика определения проектных параметров систем гашения колебаний конструкций космических аппаратов

В конструкциях современных космических аппаратов используются выносные упругие элементы для размещения аппаратуры и устройств, которые при изменении угловых положений аппаратов и их стабилизации на орбитах приходят в колебательное движение. Для снижения влияния колебаний на динамику аппаратов резервируют время ожидания их успокоения, составляющее единицы минут. Представлена методика определения проектных параметров систем гашения колебаний, обеспечивающих успокоение колебательных движений в миллисекундных диапазонах времени.

Ключевые слова: космический аппарат, система гашения колебаний, проектные параметры, напряженно-деформированное состояние, выносные упругие элементы, колебания, антирезонанс.

Введение

Перед современной космонавтикой в настоящее время стоят следующие задачи [1]:

- освоение околоземного космического пространства;
- выполнение полетов на планеты Солнечной системы;
- создание обитаемых баз на Луне и Марсе.

Для решения этих задач в организациях ракетно-космической промышленности Российской Федерации создают многофункциональные космические аппараты (КА) с длительными сроками активного существования, высокими показателями надежности и энергооборуженности. Такие КА имеют сложные конструктивно-компоновочные схемы с большим количеством выносных упругих элементов (ВУЭ).

При включении двигателей КА возникают колебания ВУЭ, препятствующие приведению КА в ориентированные положения, стабилизации аппаратов перед стыковками с модулями космических станций или посадками на поверхности небесных тел, удержанию угловых положений КА при маневрировании в космическом пространстве.

Для снижения влияния колебаний ВУЭ на движения автоматических КА, предназначенных для функционирования на орбитах Земли, в циклограммах режимов полетов резервируют время ожидания успокоения колебательных движений. Этот метод можно эффективно использовать при наличии резервов

времени для демпфирования колебаний порядка единиц минут. Для КА, выполняющих исследования дальнего космоса, осуществляющих межпланетные перелеты или доставку грузов на планеты Солнечной системы, указанные временные затраты на гашения колебательных движений ВУЭ являются неприемлемыми.

Цель работы – сокращение длительности полетных операций по маневрированию КА и изменению их угловых положений.

Метод стабилизации выносных упругих элементов конструкций космических аппаратов

В работах [2–4] представлен метод стабилизации ВУЭ конструкций КА, основанный на управляемых гашениях их колебательных движений, реализующихся в миллисекундных диапазонах времени. При этом для решения задач по демпфированию колебаний ВУЭ предлагается использовать в составе систем управления движением (СУД) КА системы гашения колебаний (СГК), принцип функционирования которых основан на генерировании и регулировании антирезонансных вынужденных колебаний ВУЭ. В качестве исполнительных органов СГК следует использовать [3, 4] многорежимные приводные устройства ВУЭ конструкций космических аппаратов. Структурная схема управляемой системы гашения колебаний представлена на рис. 1, 2.

Проектные параметры управляемых систем гашения колебаний

Начальные этапы раннего проектирования СГК сопряжены с необходимостью обоснования и определения их проектных параметров.

© Атамасов В. Д., Дементьев И. И., Погорелов В. И., Устинов А. Н., 2017

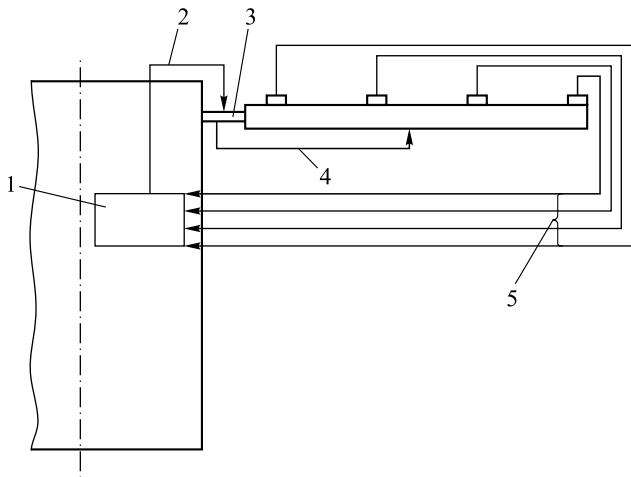


Рис. 1. Структурная схема управляемой системы гашения колебаний (главный вид):
 1 – бортовая вычислительная машина;
 2 – управляющий сигнал; 3 – многорежимное приводное устройство; 4 – управляющее динамическое воздействие, стабилизирующее выносной элемент путем создания антирезонанса;
 5 – информационные потоки, содержащие данные о параметрах колебаний ВУЭ

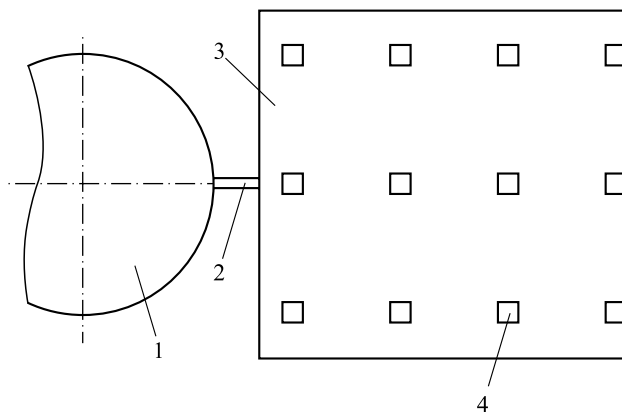


Рис. 2. Управляемая система гашения колебаний (вид сверху):
 1 – корпус КА; 2 – многорежимное приводное устройство; 3 – ВУЭ; 4 – датчики, предназначенные для регистрации информации о параметрах колебаний выносного элемента

В работе [3] приведены обоснование и формулировки следующих параметров:

- диапазоны частот колебаний ВУЭ конструкций КА, соответствующие частотным характеристикам датчиков, которые обеспечивают регистрирование информации о параметрах колебаний ВУЭ;

- частоты считываний информации о параметрах колебаний ВУЭ с датчиков, расположенных на их поверхности;

- диапазоны угловых скоростей роторов многорежимных приводных устройств, которые обеспечивают частоты вынужденных антирезонансных колебаний, стабилизирующих выносные упругие элементы.

Для определения величин проектных параметров управляемых СГК разработана методика, основные положения которой изложены в работах [3–5].

Методика определения проектных параметров управляемых систем гашения колебаний

Разработанная методика включает математический комплекс многопараметрического системотехнического моделирования напряженно-деформированных состояний (НДС) упругих элементов конструкций КА [3–5] и обоснованные [2, 3] требования к управляемым системам гашения колебаний. Математический комплекс многопараметрического системотехнического моделирования НДС упругих элементов конструкций КА обеспечивает прогнозирование спектров частот их колебаний, на основе которых с использованием обоснованных требований к управляемым СГК однозначно определяются величины их проектных параметров. Достоверность разработанного математического комплекса подтверждают результаты сравнительного анализа величин частот колебаний ВУЭ конструкций реальных изделий космической техники, полученных расчетным теоретическим и экспериментальными способами.

Теоретические расчеты выполнены аналитически с использованием разработанного нелинейного трансцендентного уравнения частот колебаний ВУЭ конструкций КА:

$$\begin{aligned}
 & X_1 \omega^8 \sin(\omega t + \varphi) + X_2 \omega^7 \cos(\omega t + \varphi) + \\
 & + X_3 \omega^6 \sin(\omega t + \varphi) + X_4 \omega^5 \cos(\omega t + \varphi) + \\
 & + X_5 \omega^4 \sin(\omega t + \varphi) + X_6 \omega^3 \cos(\omega t + \varphi) + \\
 & + X_7 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) + X_8 \omega \cos(\omega t + \varphi) + \\
 & + X_9 \sin(\omega t + \varphi) = 0,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где ω – частота колебаний ВУЭ;
 t – математическое время;
 φ – начальная фаза колебаний;



$X_1 - X_9$ – коэффициенты уравнения, содержащие данные о геометрической конфигурации ВУЭ, его вязкоупругих и физико-механических свойствах, а также данные о степени анизотропии этих свойств.

Уравнение (1) разработано с использованием операторного метода на основе формул механики деформируемого твердого тела, уравнений теплопроводности и диффузии с учетом комплексных воздействий механических, температурных, радиационных и инерционных нагрузок, возникающих на орбитах функционирования КА, степеней анизотропий физико-механических и вязкоупругих свойств ВУЭ, изготовленных из металлических сплавов или композиционных материалов, условий заделок (соединений) ориентируемых и неуправляемых ВУЭ в упругие корпуса КА, условий неопределенностей законов распределений элементарных частиц корпускулярных космических излучений, температурных полей и элементарных объемов ВУЭ по их массам [3, 4]. Расчеты коэффициентов уравнения (1) выполнены в программе, разработанной с использованием языка программирования C++. Частоты колебаний ВУЭ определены графическим методом, реализованным с использованием прикладной программы *Gnuplot. Ver. 5.0*, и методов математической библиотеки *GNU Scientific Library (GSL). Ver. 1.8* языка программирования C++.

Экспериментальные данные по частотам колебаний ВУЭ конструкций реальных изделий космической техники получены в процессе их динамических испытаний.

Математический комплекс моделирования напряженно-деформированных состояний упругих элементов конструкций космических аппаратов

Разработанный математический комплекс многопараметрического системотехнического моделирования включает восемь групп уравнений.

1. Уравнения колебательных движений ВУЭ конструкций КА [3].

2. Уравнения теплопроводностей ВУЭ и диффузий элементарных частиц корпускулярных космических излучений в их материалах:

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{\lambda_\alpha + \lambda_{\beta\alpha} + \lambda_{\gamma\alpha}}{A_1^2} \right) \left(2h \frac{\partial^2 T_0}{\partial \alpha^2} + \sum_{\eta=2}^{\nu} \frac{\partial^2 T_\eta}{\partial \alpha^2} \int_{-h}^h \Omega_\eta d\gamma \right) + \\
 & + \left(\frac{\lambda_\alpha + \lambda_{\beta\alpha} + \lambda_{\gamma\alpha}}{A_1^2 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha} - \frac{\lambda_\alpha + \lambda_{\beta\alpha} + \lambda_{\gamma\alpha}}{A_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha} \right) \times \\
 & \quad \times \left(2h \frac{\partial T_0}{\partial \alpha} + \sum_{\eta=2}^{\nu} \frac{\partial T_\eta}{\partial \alpha} \int_{-h}^h \Omega_\eta d\gamma \right) + \\
 & + \left(\frac{\lambda_{\alpha\beta} + \lambda_\beta + \lambda_{\gamma\beta}}{A_2^2} \right) \left(2h \frac{\partial^2 T_0}{\partial \beta^2} + \sum_{\eta=2}^{\nu} \frac{\partial^2 T_\eta}{\partial \beta^2} \int_{-h}^h \Omega_\eta d\gamma \right) + \\
 & + \left(\frac{\lambda_{\alpha\beta} + \lambda_\beta + \lambda_{\gamma\beta}}{A_2^2 A_1} \frac{\partial A_1}{\partial \beta} - \frac{\lambda_{\alpha\beta} + \lambda_\beta + \lambda_{\gamma\beta}}{A_2^3} \frac{\partial A_2}{\partial \beta} \right) \times \\
 & \quad \times \left(2h \frac{\partial T_0}{\partial \beta} + \sum_{\eta=2}^{\nu} \frac{\partial T_\eta}{\partial \beta} \int_{-h}^h \Omega_\eta d\gamma \right) + (\lambda_{\alpha\gamma} + \lambda_{\beta\gamma} + \lambda_\gamma) \times \\
 & \quad \times \left(2h T_1 + \sum_{\eta=2}^{\nu} T_\eta [\Omega_\eta(h) - \Omega_\eta(-h)] \right) = \\
 & = \rho c \left(2h \frac{\partial T_0}{\partial t} + \sum_{\eta=2}^{\nu} \frac{\partial T_\eta}{\partial t} \int_{-h}^h \Omega_\eta d\gamma \right); \\
 & \quad \left(\frac{\lambda_\alpha + \lambda_{\beta\alpha} + \lambda_{\gamma\alpha}}{A_1^2} \right) \times \tag{2} \\
 & \quad \times \left(\frac{2h^3}{3} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \alpha^2} + \sum_{\eta=2}^{\nu} \frac{\partial^2 T_\eta}{\partial \alpha^2} \int_{-h}^h \gamma \Omega_\eta d\gamma \right) + \\
 & + \left(\frac{\lambda_\alpha + \lambda_{\beta\alpha} + \lambda_{\gamma\alpha}}{A_1^2 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha} - \frac{\lambda_\alpha + \lambda_{\beta\alpha} + \lambda_{\gamma\alpha}}{A_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha} \right) \times \\
 & \quad \times \left(\frac{2h^3}{3} \frac{\partial T_1}{\partial \alpha} + \sum_{\eta=2}^{\nu} \frac{\partial T_\eta}{\partial \alpha} \int_{-h}^h \gamma \Omega_\eta d\gamma \right) + \\
 & \quad + \left(\frac{\lambda_{\alpha\beta} + \lambda_\beta + \lambda_{\gamma\beta}}{A_2^2} \right) \times \\
 & \quad \times \left(\frac{2h^3}{3} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \beta^2} + \sum_{\eta=2}^{\nu} \frac{\partial^2 T_\eta}{\partial \beta^2} \int_{-h}^h \gamma \Omega_\eta d\gamma \right) + \\
 & + \left(\frac{\lambda_{\alpha\beta} + \lambda_\beta + \lambda_{\gamma\beta}}{A_2^2 A_1} \frac{\partial A_1}{\partial \beta} - \frac{\lambda_{\alpha\beta} + \lambda_\beta + \lambda_{\gamma\beta}}{A_2^3} \frac{\partial A_2}{\partial \beta} \right) \times \\
 & \quad \times \left(\frac{2h^3}{3} \frac{\partial T_1}{\partial \beta} + \sum_{\eta=2}^{\nu} \frac{\partial T_\eta}{\partial \beta} \int_{-h}^h \gamma \Omega_\eta d\gamma \right) +
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 & +(\lambda_{\alpha\gamma} + \lambda_{\beta\gamma} + \lambda_{\gamma}) \times \\
 & \times \sum_{\eta=2}^{\nu} T_{\eta} \left(h[\Omega_{\eta}(h) + \Omega_{\eta}(-h)] - \int_{-h}^h \Omega_{\eta} d\gamma \right) = \\
 & = \rho c \left(\frac{2h^3}{3} \frac{\partial T_1}{\partial t} + \sum_{\eta=2}^{\nu} \frac{\partial T_{\eta}}{\partial t} \int_{-h}^h \gamma \Omega_{\eta} d\gamma \right); \\
 & \left(\frac{D_{\alpha} + D_{\beta\alpha} + D_{\gamma\alpha}}{A_1^2} \right) \left(2h \frac{\partial^2 I_0}{\partial \alpha^2} + \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} \frac{\partial^2 I_{\zeta}}{\partial \alpha^2} \int_{-h}^h \Lambda_{\zeta} d\gamma \right) + \\
 & + \left(\frac{D_{\alpha} + D_{\beta\alpha} + D_{\gamma\alpha}}{A_1^2 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha} - \frac{D_{\alpha} + D_{\beta\alpha} + D_{\gamma\alpha}}{A_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha} \right) \times \\
 & \times \left(2h \frac{\partial I_0}{\partial \alpha} + \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} \frac{\partial I_{\zeta}}{\partial \alpha} \int_{-h}^h \Lambda_{\zeta} d\gamma \right) + \\
 & + \left(\frac{D_{\alpha\beta} + D_{\beta} + D_{\gamma\beta}}{A_2^2} \right) \left(2h \frac{\partial^2 I_0}{\partial \beta^2} + \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} \frac{\partial^2 I_{\zeta}}{\partial \beta^2} \int_{-h}^h \Lambda_{\zeta} d\gamma \right) + \\
 & + \left(\frac{D_{\alpha\beta} + D_{\beta} + D_{\gamma\beta}}{A_2^2 A_1} \frac{\partial A_1}{\partial \beta} - \frac{D_{\alpha\beta} + D_{\beta} + D_{\gamma\beta}}{A_2^3} \frac{\partial A_2}{\partial \beta} \right) \times \\
 & \times \left(2h \frac{\partial I_0}{\partial \beta} + \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} \frac{\partial I_{\zeta}}{\partial \beta} \int_{-h}^h \Lambda_{\zeta} d\gamma \right) + (D_{\alpha\gamma} + D_{\beta\gamma} + D_{\gamma}) \times \\
 & \times \left(2h I_1 + \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} I_{\zeta} [\Lambda_{\zeta}(h) - \Lambda_{\zeta}(-h)] \right) = \\
 & = 2h \frac{\partial I_0}{\partial t} + \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} \frac{\partial I_{\zeta}}{\partial t} \int_{-h}^h \Lambda_{\zeta} d\gamma; \\
 & \left(\frac{D_{\alpha} + D_{\beta\alpha} + D_{\gamma\alpha}}{A_1^2} \right) \times \\
 & \times \left(\frac{2h^3}{3} \frac{\partial^2 I_1}{\partial \alpha^2} + \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} \frac{\partial^2 I_{\zeta}}{\partial \alpha^2} \int_{-h}^h \gamma \Lambda_{\zeta} d\gamma \right) + \\
 & + \left(\frac{D_{\alpha} + D_{\beta\alpha} + D_{\gamma\alpha}}{A_1^2 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha} - \frac{D_{\alpha} + D_{\beta\alpha} + D_{\gamma\alpha}}{A_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha} \right) \times \\
 & \times \left(\frac{2h^3}{3} \frac{\partial I_1}{\partial \alpha} + \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} \frac{\partial I_{\zeta}}{\partial \alpha} \int_{-h}^h \gamma \Lambda_{\zeta} d\gamma \right) + \\
 & + \left(\frac{D_{\alpha\beta} + D_{\beta} + D_{\gamma\beta}}{A_2^2} \right) \times
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \left(\frac{2h^3}{3} \frac{\partial^2 I_1}{\partial \beta^2} + \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} \frac{\partial^2 I_{\zeta}}{\partial \beta^2} \int_{-h}^h \gamma \Lambda_{\zeta} d\gamma \right) + \\
 & + \left(\frac{D_{\alpha\beta} + D_{\beta} + D_{\gamma\beta}}{A_2^2 A_1} \frac{\partial A_1}{\partial \beta} - \frac{D_{\alpha\beta} + D_{\beta} + D_{\gamma\beta}}{A_2^3} \frac{\partial A_2}{\partial \beta} \right) \times \\
 & \times \left(\frac{2h^3}{3} \frac{\partial I_1}{\partial \beta} + \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} \frac{\partial I_{\zeta}}{\partial \beta} \int_{-h}^h \gamma \Lambda_{\zeta} d\gamma \right) + \\
 & + (D_{\alpha\gamma} + D_{\beta\gamma} + D_{\gamma}) \times \\
 & \times \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} I_{\zeta} \left(h[\Lambda_{\zeta}(h) + \Lambda_{\zeta}(-h)] - \int_{-h}^h \Lambda_{\zeta} d\gamma \right) = \\
 & = \frac{2h^3}{3} \frac{\partial I_1}{\partial t} + \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} \frac{\partial I_{\zeta}}{\partial t} \int_{-h}^h \gamma \Lambda_{\zeta} d\gamma.
 \end{aligned}$$

Здесь ρ – плотность ВУЭ;

c – удельная теплоемкость ВУЭ при постоянном тензоре деформаций;

A_1, A_2 – коэффициенты первой квадратичной формы срединной поверхности ВУЭ;

$2h$ – толщина ВУЭ;

$\lambda_{\alpha}, \lambda_{\beta}, \lambda_{\gamma}, \lambda_{\alpha\beta}, \lambda_{\beta\alpha}, \lambda_{\alpha\gamma}, \lambda_{\gamma\alpha}, \lambda_{\beta\gamma}, \lambda_{\gamma\beta}$ – коэффициенты теплопроводности ВУЭ;

$D_{\alpha}, D_{\beta}, D_{\gamma}, D_{\alpha\beta}, D_{\alpha\gamma}, D_{\beta\alpha}, D_{\beta\gamma}, D_{\gamma\alpha}, D_{\gamma\beta}$ – коэффициенты диффузии элементарных частиц корпускулярных космических излучений в материале ВУЭ;

T_0, T_1, T_{η} – функции закона распределения температурного поля ВУЭ по его объему $T(\alpha, \beta, \gamma, t) = T_0(\alpha, \beta, t) + \gamma T_1(\alpha, \beta, t) +$

$+ \sum_{\eta=2}^{\nu} \Omega_{\eta}(\gamma) T_{\eta}(\alpha, \beta, t);$

I_0, I_1, I_{ζ} – функции закона распределения элементарных частиц корпускулярных космических излучений по объему ВУЭ $I(\alpha, \beta, \gamma, t) = I_0(\alpha, \beta, t) + \gamma I_1(\alpha, \beta, t) +$

$+ \sum_{\zeta=2}^{\vartheta} \Lambda_{\zeta}(\gamma) I_{\zeta}(\alpha, \beta, t);$

Ω_{η} – η -я функция произвольного вида, которой задана нелинейность изменения температуры T выносного упругого элемента по его толщине;

Λ_{ζ} – ζ -я функция произвольного вида, которой задана нелинейность изменения концентрации I элементарных частиц корпуску-



лярных космических излучений по толщине ВУЭ;

α, β, γ – ортогональные криволинейные координаты.

3. Уравнения, вывод которых выполнен с использованием граничных условий, разработанных для лицевых поверхностей ВУЭ конструкций КА [3].

4. Уравнения, вывод которых выполнен с использованием начальных условий, разработанных для определения НДС упругих элементов в начальный (отсчетный) момент времени

$$\begin{aligned} & u_0(\alpha, \beta, t=0) + \gamma \psi_0(\alpha, \beta, t=0) + \\ & + \sum_{i=1}^n f_i(\gamma) \psi_i(\alpha, \beta, t=0) = 0; \\ & v_0(\alpha, \beta, t=0) + \gamma \Phi_0(\alpha, \beta, t=0) + \\ & + \sum_{j=1}^m F_j(\gamma) \Phi_j(\alpha, \beta, t=0) = 0; \quad (3) \\ & w_0(\alpha, \beta, t=0) + \gamma \delta_0(\alpha, \beta, t=0) + \\ & + \sum_{k=1}^p R_k(\gamma) \delta_k(\alpha, \beta, t=0) = 0, \end{aligned}$$

где $u_0(\alpha, \beta, t=0), v_0(\alpha, \beta, t=0)$ – компоненты вектора перемещения произвольно выбранного элементарного объема срединной поверхности ВУЭ в плоскости этой поверхности в отсчетный момент времени;

$\psi_0(\alpha, \beta, t=0), \Phi_0(\alpha, \beta, t=0)$ – компоненты вектора поворота произвольно выбранного поперечного сечения упругого элемента относительно его срединной поверхности в отсчетный момент времени;

$w_0(\alpha, \beta, t=0)$ – вектор трансверсального (перпендикулярного к срединной поверхности ВУЭ) перемещения произвольно выбранного элементарного объема срединной поверхности ВУЭ в начальный момент времени;

$\delta_0(\alpha, \beta, t=0)$ – вектор поворота произвольно выбранной элементарной площади срединной поверхности ВУЭ относительно этой поверхности в начальный момент времени;

$f_i(\gamma), F_j(\gamma), R_k(\gamma)$ – i -я, j -я и k -я функции произвольного вида, которыми задана нелинейность перемещения произвольно выбран-

ного элементарного объема выносного упругого элемента в перпендикулярном к его срединной поверхности направлении;

$\psi_i(\alpha, \beta, t=0), \Phi_j(\alpha, \beta, t=0), \delta_k(\alpha, \beta, t=0)$ – i -я, j -я и k -я искомые функции в отсчетный момент времени.

5. Уравнения, разработанные для обеспечения статической определенности математического комплекса многопараметрического системотехнического моделирования НДС упругих элементов конструкций космических аппаратов:

$$\begin{aligned} & \int_{-h}^h \left(\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \sum_{g=1}^r F_g^\alpha - \frac{1}{A_1} \frac{\partial \sigma_\alpha}{\partial \alpha} - \frac{1}{A_2} \frac{\partial \tau_{\beta\alpha}}{\partial \beta} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial A_2}{\partial \alpha} (\sigma_\alpha - \sigma_\beta) + 2 \frac{\partial A_1}{\partial \beta} \tau_{\beta\alpha} \right] \right) d\gamma = \\ & = \left[B_{33} \left(\frac{1}{A_1} \left[\frac{\partial u_0}{\partial \alpha} + \gamma \frac{\partial \psi_0}{\partial \alpha} + \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial \psi_i}{\partial \alpha} \right] + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \beta} \left[v_0 + \gamma \Phi_0 + \sum_{j=1}^m F_j \Phi_j \right] \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\ & + \left[B_{34} \left(\frac{1}{A_2} \left[\frac{\partial v_0}{\partial \beta} + \gamma \frac{\partial \Phi_0}{\partial \beta} + \sum_{j=1}^m F_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial \beta} \right] + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha} \left[u_0 + \gamma \psi_0 + \sum_{i=1}^n f_i \psi_i \right] \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\ & + \left[B_{35} \left(\delta_0 + \sum_{k=1}^p R'_k \delta_k \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\ & + \left[B_{36} \left(\frac{1}{A_2} \left[\frac{\partial u_0}{\partial \beta} + \gamma \frac{\partial \psi_0}{\partial \beta} + \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial \psi_i}{\partial \beta} \right] + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{A_1} \left[\frac{\partial v_0}{\partial \alpha} + \gamma \frac{\partial \Phi_0}{\partial \alpha} + \sum_{j=1}^m F_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial \alpha} \right] - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial A_1}{\partial \beta} \left(u_0 + \gamma \psi_0 + \sum_{i=1}^n f_i \psi_i \right) + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + \frac{\partial A_2}{\partial \alpha} \left(v_0 + \gamma \Phi_0 + \sum_{j=1}^m F_j \Phi_j \right) \right] \right) \right]_{-h}^{h_i} + \quad (4) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 & + \left[B_{37} \left(\Psi_0 + \sum_{i=1}^n f_i' \Psi_i + \frac{1}{A_1} \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times \left[\frac{\partial \mathbf{w}_0}{\partial \alpha} + \gamma \frac{\partial \delta_0}{\partial \alpha} + \sum_{k=1}^p R_k \frac{\partial \delta_k}{\partial \alpha} \right] \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\
 & + \left[B_{38} \left(\Phi_0 + \sum_{j=1}^m F_j' \Phi_j + \frac{1}{A_2} \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times \left[\frac{\partial \mathbf{w}_0}{\partial \beta} + \gamma \frac{\partial \delta_0}{\partial \beta} + \sum_{k=1}^p R_k \frac{\partial \delta_k}{\partial \beta} \right] \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\
 & + \left[B_{39} \left(T_0 + \gamma T_1 + \sum_{\eta=2}^v \Omega_{\eta} T_{\eta} \right) + \right. \\
 & \left. + B_{40} \left(I_0 + \gamma I_1 + \sum_{\zeta=2}^9 \Lambda_{\zeta} I_{\zeta} \right) \right]_{-h}^{h_i} ; \\
 & \int_{-h}^{h_i} \left(\rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - \sum_{g=1}^r F_g^{\beta} - \frac{1}{A_1} \frac{\partial \tau_{\alpha\beta}}{\partial \alpha} - \frac{1}{A_2} \frac{\partial \sigma_{\beta}}{\partial \beta} - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial A_1}{\partial \beta} (\sigma_{\beta} - \sigma_{\alpha}) + 2 \frac{\partial A_2}{\partial \alpha} \tau_{\alpha\beta} \right] \right) d\gamma = \\
 & = \left[B_{41} \left(\frac{1}{A_1} \left[\frac{\partial u_0}{\partial \alpha} + \gamma \frac{\partial \Psi_0}{\partial \alpha} + \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial \Psi_i}{\partial \alpha} \right] + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \beta} \left[v_0 + \gamma \Phi_0 + \sum_{j=1}^m F_j \Phi_j \right] \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\
 & + \left[B_{42} \left(\frac{1}{A_2} \left[\frac{\partial v_0}{\partial \beta} + \gamma \frac{\partial \Phi_0}{\partial \beta} + \sum_{j=1}^m F_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial \beta} \right] + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha} \left[u_0 + \gamma \Psi_0 + \sum_{i=1}^n f_i \Psi_i \right] \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\
 & + \left[B_{43} \left(\delta_0 + \sum_{k=1}^p R_k' \delta_k \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\
 & + \left[B_{44} \left(\frac{1}{A_2} \left[\frac{\partial u_0}{\partial \beta} + \gamma \frac{\partial \Psi_0}{\partial \beta} + \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial \Psi_i}{\partial \beta} \right] + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{A_1} \left[\frac{\partial v_0}{\partial \alpha} + \gamma \frac{\partial \Phi_0}{\partial \alpha} + \sum_{j=1}^m F_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial \alpha} \right] - \right. \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial A_1}{\partial \beta} \left(u_0 + \gamma \Psi_0 + \sum_{i=1}^n f_i \Psi_i \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial A_2}{\partial \alpha} \left(v_0 + \gamma \Phi_0 + \sum_{j=1}^m F_j \Phi_j \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\
 & + \left[B_{45} \left(\Psi_0 + \sum_{i=1}^n f_i' \Psi_i + \frac{1}{A_1} \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times \left[\frac{\partial \mathbf{w}_0}{\partial \alpha} + \gamma \frac{\partial \delta_0}{\partial \alpha} + \sum_{k=1}^p R_k \frac{\partial \delta_k}{\partial \alpha} \right] \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\
 & + \left[B_{46} \left(\Phi_0 + \sum_{j=1}^m F_j' \Phi_j + \frac{1}{A_2} \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times \left[\frac{\partial \mathbf{w}_0}{\partial \beta} + \gamma \frac{\partial \delta_0}{\partial \beta} + \sum_{k=1}^p R_k \frac{\partial \delta_k}{\partial \beta} \right] \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\
 & + \left[B_{47} \left(T_0 + \gamma T_1 + \sum_{\eta=2}^v \Omega_{\eta} T_{\eta} \right) + \right. \\
 & \left. + B_{48} \left(I_0 + \gamma I_1 + \sum_{\zeta=2}^9 \Lambda_{\zeta} I_{\zeta} \right) \right]_{-h}^{h_i} ; \\
 & \int_{-h}^{h_i} \left(\rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} - \sum_{g=1}^r F_g^{\gamma} - \frac{1}{A_1} \frac{\partial \tau_{\alpha\gamma}}{\partial \alpha} - \frac{1}{A_2} \frac{\partial \tau_{\beta\gamma}}{\partial \beta} - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial A_2}{\partial \alpha} \tau_{\alpha\gamma} + \frac{\partial A_1}{\partial \beta} \tau_{\beta\gamma} \right] \right) d\gamma = \\
 & = \left[B_{17} \left(\frac{1}{A_1} \left[\frac{\partial u_0}{\partial \alpha} + \gamma \frac{\partial \Psi_0}{\partial \alpha} + \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial \Psi_i}{\partial \alpha} \right] + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \beta} \left[v_0 + \gamma \Phi_0 + \sum_{j=1}^m F_j \Phi_j \right] \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\
 & + \left[B_{18} \left(\frac{1}{A_2} \left[\frac{\partial v_0}{\partial \beta} + \gamma \frac{\partial \Phi_0}{\partial \beta} + \sum_{j=1}^m F_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial \beta} \right] + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha} \left[u_0 + \gamma \Psi_0 + \sum_{i=1}^n f_i \Psi_i \right] \right) \right]_{-h}^{h_i} + \\
 & + \left[B_{19} \left(\delta_0 + \sum_{k=1}^p R_k' \delta_k \right) \right]_{-h}^{h_i} +
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& + \left[B_{20} \left(\frac{1}{A_2} \left[\frac{\partial u_0}{\partial \beta} + \gamma \frac{\partial \psi_0}{\partial \beta} + \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial \psi_i}{\partial \beta} \right] + \right. \right. \\
& + \frac{1}{A_1} \left[\frac{\partial v_0}{\partial \alpha} + \gamma \frac{\partial \Phi_0}{\partial \alpha} + \sum_{j=1}^m F_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial \alpha} \right] - \\
& - \frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial A_1}{\partial \beta} \left(u_0 + \gamma \psi_0 + \sum_{i=1}^n f_i \psi_i \right) + \right. \\
& \left. \left. + \frac{\partial A_2}{\partial \alpha} \left(v_0 + \gamma \Phi_0 + \sum_{j=1}^m F_j \Phi_j \right) \right] \right] \Bigg|_{-h}^{h_i} + \\
& + \left[B_{21} \left(\psi_0 + \sum_{i=1}^n f_i' \psi_i + \frac{1}{A_1} \times \right. \right. \\
& \left. \left. \times \left[\frac{\partial \mathbf{w}_0}{\partial \alpha} + \gamma \frac{\partial \delta_0}{\partial \alpha} + \sum_{k=1}^p R_k \frac{\partial \delta_k}{\partial \alpha} \right] \right) \right] \Bigg|_{-h}^{h_i} + \\
& + \left[B_{22} \left(\Phi_0 + \sum_{j=1}^m F_j' \Phi_j + \frac{1}{A_2} \times \right. \right. \\
& \left. \left. \times \left[\frac{\partial \mathbf{w}_0}{\partial \beta} + \gamma \frac{\partial \delta_0}{\partial \beta} + \sum_{k=1}^p R_k \frac{\partial \delta_k}{\partial \beta} \right] \right) \right] \Bigg|_{-h}^{h_i} + \\
& + \left[B_{23} \left(T_0 + \gamma T_1 + \sum_{\eta=2}^v \Omega_\eta T_\eta \right) + \right. \\
& \left. + B_{24} \left(I_0 + \gamma I_1 + \sum_{\zeta=2}^g \Lambda_\zeta I_\zeta \right) \right] \Bigg|_{-h}^{h_i}.
\end{aligned}$$

Здесь h_i – координата срединной поверхности ВУЭ или эквидистантной ей поверхности (срединной поверхности ВУЭ соответствует координата $h_i = 0$);

U, V, W – компоненты вектора перемещения произвольно выбранного элементарного объема ВУЭ;

$B_i (i = 1, 2, \dots, 48)$ – коэффициенты упругости ВУЭ конструкции КА;

$\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma$ – нормальные напряжения;

$\tau_{\beta\alpha} = \tau_{\alpha\beta}, \tau_{\gamma\alpha} = \tau_{\alpha\gamma}, \tau_{\gamma\beta} = \tau_{\beta\gamma}$ – касательные напряжения;

$F_g^\alpha, F_g^\beta, F_g^\gamma$ – компоненты вектора g -го внешнего массового (объемного) воздействия.

6. Уравнения, являющиеся граничными условиями, заданными для торцевых поверх-

ностей ВУЭ конструкций КА [3]. Их разработка осуществляется с использованием информации об условиях заделок ориентируемых и неуправляемых ВУЭ в упругий корпус КА и условиях соединений торцевых поверхностей ВУЭ с аппаратурой или приборами специальных или служебных систем.

7. Уравнения, являющиеся граничными условиями, разработанными для боковых поверхностей корпусов КА с учетом элементов поперечных силовых наборов (торцевых и промежуточных шпангоутов) в их конструкциях:

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned} \mathbf{w}_0(\alpha = \alpha_w, \beta = \beta_w, t) = 0; \\ \delta_0(\alpha = \alpha_w, \beta = \beta_w, t) = 0; \\ \delta_k(\alpha = \alpha_w, \beta = \beta_w, t) = 0; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\
& \Rightarrow W(\alpha = \alpha_w, \beta = \beta_w, \gamma, t) = 0, \quad (5) \\
& w = 1, \dots, r,
\end{aligned}$$

где α_w, β_w – координаты w -й зоны боковой поверхности корпуса КА, конструктивно усиленной элементом поперечного силового набора;

r – количество элементов поперечного силового набора в конструкции аппарата.

8. Уравнения заделок (соединений) ориентируемых и неуправляемых ВУЭ в упругие корпуса КА, разработанных с учетом взаимных воздействий колебаний упругих оболочек корпусов (УОК) и ВУЭ, влияющих на величины параметров их колебательных движений:

$$\begin{aligned}
& \mathbf{w}_{\text{ВУЭ}}(\alpha = 0, \beta = \beta_m, t) = \\
& = \sin \Omega_1 \cos \Omega_2 u_{\text{УОК}}(\alpha = \alpha_n, \beta = \beta_n, t); \\
& \mathbf{w}_{\text{ВУЭ}}(\alpha = 0, \beta = \beta_m, t) = \\
& = \cos \Omega_2 \psi_{\text{УОК}}(\alpha = \alpha_n, \beta = \beta_n, t); \\
& \mathbf{w}_{\text{ВУЭ}}(\alpha = 0, \beta = \beta_m, t) = \\
& = \sin \Omega_2 v_{\text{УОК}}(\alpha = \alpha_n, \beta = \beta_n, t); \\
& \mathbf{w}_{\text{ВУЭ}}(\alpha = 0, \beta = \beta_m, t) = \\
& = \sin \Omega_1 \sin \Omega_2 \Phi_{\text{УОК}}(\alpha = \alpha_n, \beta = \beta_n, t); \\
& \mathbf{w}_{\text{ВУЭ}}(\alpha = 0, \beta = \beta_m, t) = \\
& = \cos \Omega_1 \cos \Omega_2 \mathbf{w}_{\text{УОК}}(\alpha = \alpha_n, \beta = \beta_n, t);
\end{aligned} \quad (6)$$



$$\begin{aligned} w_{\text{ВУЭ}}(\alpha = 0, \beta = \beta_m, t) = \\ = \delta_{\text{УОК}}(\alpha = \alpha_n, \beta = \beta_n, t); \\ k = n = m = 1, \dots, p, \end{aligned}$$

где $w_{\text{ВУЭ}}$ – вектор трансверсального перемещения произвольно выбранного элементарного объема срединной поверхности k -го ВУЭ;

$u_{\text{УОК}}, v_{\text{УОК}}$ – компоненты вектора перемещения произвольно выбранного элементарного объема срединной поверхности УОК в плоскости этой поверхности;

$\psi_{\text{УОК}}, \phi_{\text{УОК}}$ – компоненты вектора поворота произвольно выбранного поперечного сечения упругой оболочки корпуса КА относительно ее срединной поверхности;

$w_{\text{УОК}}$ – вектор перпендикулярного к срединной поверхности УОК перемещения произвольно выбранного элементарного объема этой поверхности;

$\delta_{\text{УОК}}$ – вектор поворота произвольно выбранной элементарной площади срединной поверхности упругой оболочки корпуса КА относительно указанной поверхности;

α_n, β_n – координаты боковой поверхности корпуса аппарата, которым соответствует n -я зона заделки k -го выносного упругого элемента;

β_m – координата нулевой торцевой поверхности k -го ВУЭ (поверхности, с которой совмещено начало отсчета O системы ортогональных криволинейных координат $O\alpha\beta\gamma$), отсчитываемая по ширине ВУЭ, которой соответствует m -я зона, заделанная в упругий корпус аппарата;

Ω_1 – угол поворота k -го ВУЭ относительно корпуса КА (угол между продольной осью k -го ВУЭ и линией, образующей боковую поверхность корпуса аппарата);

Ω_2 – угол поворота k -го ВУЭ относительно его продольной оси;

p – количество выносных упругих элементов в конструкции КА.

Отметим, что разработанный математический комплекс многопараметрического системотехнического моделирования НДС упругих элементов конструкций КА обеспечивает прогнозирование спектров частот их колебаний.

Достоверность математического комплекса моделирования и требования к управляемым системам гашения колебаний

Достоверность выполненных разработок была подтверждена в ходе сравнительного анализа величин частот колебаний ВУЭ конструкций реальных изделий космической техники, полученных расчетным теоретическим и экспериментальными способами. Разница между теоретическими и экспериментальными величинами частот колебаний не превышает 5 %. Результаты теоретических и экспериментальных исследований частот колебаний пластинчатых нешироких, широких и стержневых ВУЭ приведены в таблице.

В работах [2, 3] обоснованы требования к управляемым СГК упругих элементов конструкций КА. Ниже приведем их формулировки.

1. Управляющие контуры СГК и систем управления движением КА должны функционировать согласованно.

2. Датчики, расположенные на поверхностях ВУЭ, должны регистрировать информацию о параметрах их колебательных движений в диапазонах частот колебаний, возникающих при выполнении полетных операций.

3. Частоты считываний информации с датчиков должны превышать частоты колебаний выносных элементов.

4. Технические характеристики приводных устройств должны обеспечивать угловые скорости выходных валов роторов, соответствующие частотам вынужденных антирезонансных колебаний, стабилизирующих ВУЭ конструкций КА.

5. Приводные устройства должны быть многорежимными устройствами, генерирующими вынужденные антирезонансные колебания выносных элементов с параметрами, изменяемыми в соответствии с управляющими сигналами бортовых вычислительных машин.

С использованием требований к управляемому СГК и спектров частот колебаний ВУЭ можно однозначно определить величины проектных параметров систем гашения колебательных движений ВУЭ конструкций КА.



Результаты теоретических и экспериментальных исследований частот колебаний выносных упругих элементов (ВУЭ)

Характеристика	Порядковый номер частоты колебаний в спектре	Частота колебаний, полученная расчетным теоретическим способом, Гц	Частота колебаний, полученная в процессе экспериментальных исследований, Гц
Неширокий ВУЭ	1	0,820	0,84
	2	0,950	0,99
	3	1,910	2,00
	4	4,780	5,00
	5	7,320	7,00
	20	69,41	72,0
Широкий ВУЭ	1	0,315	0,32
	2	0,352	0,34
	3	0,367	0,38
	17	0,655	0,65
	24	0,796	0,76
	97	5,817	5,76
Стержневой ВУЭ	1	0,830	0,86
	2	0,850	0,87
	20	49,78	52,0
	52	149,73	146

Заключение

Разработанная методика определения проектных параметров управляемых систем гашения колебаний ВУЭ конструкций КА обеспечивает начальные этапы раннего проектирования этих систем.

Успокоения колебаний ВУЭ с помощью управляемых СГК осуществляются в миллисекундных диапазонах времени.

Выполненные расчеты показали, что при использовании управляемых систем гашения колебаний в составах СУД КА удалось сократить длительности полетных операций по маневрированию КА и изменению их угловых положений на 20–27 %.

Список литературы

1. Романов А. В. Теория комплексной оптимизации проектирования космических аппаратов с ядерными термоэмиссионными энергетическими установками / под ред. Б. И. Полетаева, А. П. Ковалёва. СПб.: Профессионал, 2010. 472 с.

2. Атамасов В. Д., Дементьев И. И., Устинов А. Н. Теория комплексного управления движением космических аппаратов // Труды VI науч.-техн. конф. «Инновационный арсенал молодежи – 2015». СПб., 2015. С. 34–49.
3. Дементьев И. И. Теория оптимального управления движением космических аппаратов: анализ, основные положения и математические модели. Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 143 с.
4. Романов А. В., Тестоедов Н. А. Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов. СПб.: Профессионал, 2015. 240 с.
5. Дементьев И. И., Атамасов В. Д., Сотник С. А., Шевкунов А. И. Прогнозирование форм и параметров колебательных процессов конструктивных элементов космических аппаратов // Естественные и технические науки. 2013. № 3 (65). С. 196–199.

Поступила 06.02.17



Атамасов Владимир Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, советник генерального директора Акционерного общества «Конструкторское бюро «Арсенал» имени М. В. Фрунзе», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: упругие конструкции космических аппаратов и их напряженно-деформированные состояния, технические средства демпфирования колебаний упругих конструкций в космическом пространстве, конструкции термоэмиссионных ядерных энергетических установок космического базирования и физические процессы, протекающие в этих установках.

Дементьев Илья Игоревич – инженер первой категории Акционерного общества «Конструкторское бюро «Арсенал» имени М. В. Фрунзе», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: напряженно-деформированные состояния упругих элементов конструкций космических аппаратов, колебания упругих конструкций космических аппаратов на орбитах функционирования и средства гашения колебательных движений, механика композитных конструкций и конструкций, изготовленных из «интеллектуальных» материалов (материалов с «памятью» формы), динамика космических аппаратов.

Погорелов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: прочность, устойчивость и колебания упругих конструкций, механика композитных конструкций, программные средства моделирования напряженно-деформированных состояний упругих конструкций.

Устинов Александр Николаевич – генеральный директор Открытого акционерного общества «Машиностроительный завод «Арсенал», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: напряженно-деформированные состояния упругих элементов конструкций космических аппаратов, реализующиеся на орбитах функционирования, технические средства стабилизации упругих конструкций космических аппаратов на рабочих орбитах путем гашения их колебаний, способы обеспечения релаксации остаточных напряжений, действующих в конструкциях, изготовленных из металлических сплавов или композиционных материалов, на завершающей стадии их изготовления.

Methodology of determining design parameters for vibration damping in spacecraft structures

Modern spacecraft designs use elastic outrigger-type structural elements to accommodate equipment and devices. When the angular position of spacecraft changes and they stabilise in their orbits, these elements start to vibrate. In order to decrease the effect these vibrations have on the spacecraft dynamics, vibration damping delay time is introduced, amounting to several minutes. We present a methodology of determining design parameters for vibration damping systems that make it possible to damp vibrations in milliseconds.

Keywords: spacecraft, vibration damping system, design parameters, stress-strain state, elastic outrigger-type structural elements, vibrations, antiresonance.

Atamasov Vladimir Dmitrievich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Councillor to Director General, M. V. Frunze Arsenal Design Bureau Joint Stock Company, Saint Petersburg.

Science research interests: elastic spacecraft structures and stress-strain states in those, equipment for dampening vibrations in elastic structures to be used in space, design of space-based nuclear power plants featuring thermionic converters and physical processes taking place inside them.

Dementev Ilya Igorevich – Engineer of the first rank, M. V. Frunze Arsenal Design Bureau Joint Stock Company, Saint Petersburg.

Science research interests: stress-strain states in elastic spacecraft structures, vibrations of elastic spacecraft structures in operational orbits and equipment for dampening vibrations, mechanics of composite structures and structures made out of “smart” materials (shape-memory materials), spacecraft dynamics.



Pogorelov Viktor Ivanovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D. F. Ustinov, Saint Petersburg.

Science research interests: strength, stability and vibrations of elastic structures, mechanics of composite structures, software for simulating stress-strain states in elastic structures.

Ustinov Aleksandr Nikolaevich – Director General, Open Joint Stock Company “Machine building plant “Arsenal”, Saint Petersburg.

Science research interests: stress-strain states occurring in operational orbits in elastic spacecraft structures, equipment for stabilising elastic structures of spacecraft in operational orbits by means of dampening vibrations, means of ensuring residual stress relaxation in structures made out of metallic alloys or composite materials during the final manufacturing stage.