

## ОПТИМАЛЬНОЕ РАСКРЫТИЕ СПИЦ КРУПНОГАБАРИТНОГО ТРАНСФОРМИРУЕМОГО РЕФЛЕКТОРА ПО ИЕРАРХИИ КРИТЕРИЕВ

С. А. Кабанов✉, Д. С. Кабанов

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассматривается процесс управления угловым движением спицы крупногабаритного рефлектора космического базирования с учетом изгибных колебаний. В настоящее время антенны больших размеров активно используются для приема и передачи данных. При выводе больших конструкций в космос возникает задача надежного разведения спиц, так как они уложены в малый объем для возможности установки их в ракете-носителе. Ввиду возможности возникновения различных нештатных ситуаций, таких как заклинивание элементов, зацепление сетеполотна, необходимо выполнять повторное раскрытие антенны. Поэтому важно разработать алгоритмы управления, позволяющие надежно решать задачи прямого и реверсивного движения. В процессе раскрытия и сведения элементов рефлектора появляются различные деформации в конструкции. При сведении спиц антенны поперечные колебания вносят наибольший вклад в колебательный характер переходного процесса. В настоящее время для раскрытия крупногабаритных рефлекторов применяются упруго-деформированные элементы, также используется программа управления. Это не позволяет корректировать управление при изменении условий раскрытия. В работе исследована возможность минимизации колебаний конструкции при ее раскрытии за счет применения алгоритмов оптимального управления в режиме реального времени. Прямое и реверсивное движение элементов антенны производится посредством оптимизации по иерархии из двух критериев. Приведены результаты численного моделирования оптимального поворота спицы рефлектора. Предложенный алгоритм позволяет выбирать оптимальное управление в нештатных ситуациях для различных типов крупногабаритных рефлекторов.

**Ключевые слова:** математическая модель, вращательное движение, моделирование процесса раскрытия спицы, крупногабаритный трансформируемый рефлектор, алгоритм последовательной оптимизации.

### Введение

Антенны большого диаметра являются важными компонентами оборудования, используемого в спутниковой связи при наблюдении Земли и исследовании дальнего космоса [1–5]. Принимая во внимание ограничения по весу конструкции и объему транспортных средств, большие космические антенны должны быть спроектированы так, чтобы их можно было удобно развернуть и свернуть. Одним из видов развертываемых антенн являются сетчатые отражатели с вантовой системой задания

формы радиоотражающей поверхности. Они используются для космических миссий из-за своей малой массы, высокой эффективности упаковки и крупных размеров после раскрытия [6–10]. За последние десятилетия были разработаны многие концепции и инженерные модели развертываемых антенн для удовлетворения растущих требований современных спутников связи.

На рис. 1 представлена конструкция крупногабаритного трансформируемого рефлектора (КТР), где 1 обозначает космический аппарат (КА). К нему подсоединены разворачиваемые элементы, такие как солнечные батареи 2 и облучающая система 3. Для обеспечения заданной диаграммы направленности штанга 4 выдвигает рефлектор 5 на необходимое фокусное расстояние. Отражающей поверхностью является сетеполотно 6.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-08-00646 а)

✉ fedor28@list.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2021

NASA в открытом доступе на своем официальном сайте выкладывает отчет по эксплуатации механического оборудования [11]. Это позволяет определить проблемы, возникающие при эксплуатации систем в космическом пространстве. Отмечено, что проводка, протянутая по корпусу крупногабаритных систем, может вызывать собственные колебания. Поэтому ведутся исследования в области использования беспроводной передачи энергии. В механических системах, эксплуатируемых в космосе, важным является учет теплового расширения. Тепловые проблемы могут приводить к заклиниванию, увеличению крутящего момента, вызывать дополнительную вибрацию.

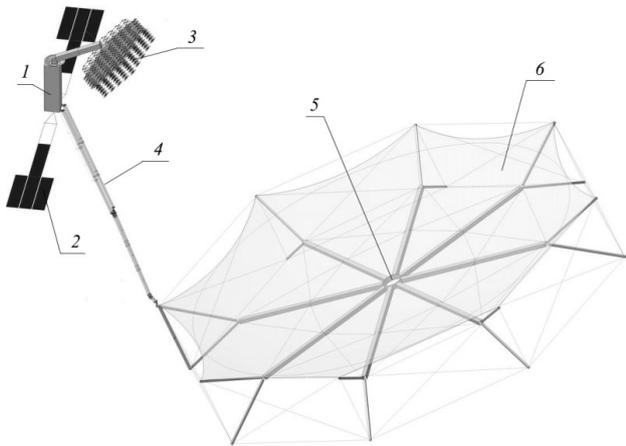


Рис. 1. Конструкция КТР

При раскрытии КТР возможно возникновение зацеплений сетеполотна за штанги и спицы конструкции, что приводит к импульсным воздействиям на систему. В некоторых случаях зацепления необходимо прибегать к реверсивному движению раскрытия.

Поэтому встает задача поиска алгоритмов управления, позволяющих надежно раскрывать системы, а в случае появления нештатных ситуаций осуществлять свертывание конструкции до необходимых терминальных (конечных) условий. Анализ алгоритмов раскрытия спицы был приведен в работах [12; 13]. Для свертывания спицы предлагается рассмотреть иерархию из двух критериев и применение алгоритма последовательной оптимизации [14].

## 1. Математическая модель и постановка задачи

Для разработки алгоритмов управления рассмотрим задачу поворота спицы на заданный угол. Математическая модель данного вида движения для спицы, как однозвенной конструкции, подробно описана в [15].

Примем, что в процессе прямого движения спицы произошло заклинивание. Для приведения

спицы в заданное развернутое состояние необходимо осуществить ее реверсивное движение с последующим повторным раскрытием. Таким образом, нужно изменить положение спицы на заданный угол  $\varphi$  под действием силы  $M$  (рис. 2). Спица жестко закреплена одним концом к КА, вращение осуществляется под действием электрического двигателя.

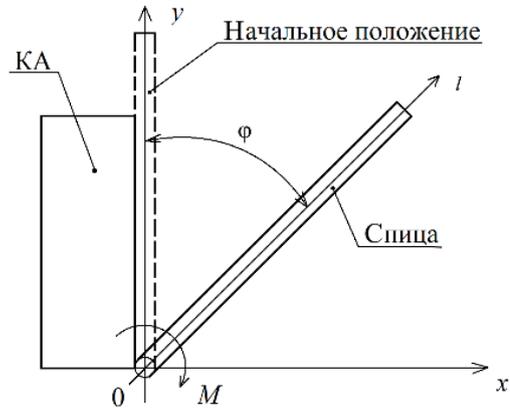


Рис. 2. Сведение спицы рефлектора

Система дифференциальных уравнений, описывающая динамику спицы, имеет вид  $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, u, t)$ , где  $\mathbf{X} = (\varphi \omega a_1 V_{1a})$  – вектор состояния процесса сведения,  $u$  – вектор управления,  $t$  – время,  $\varphi$  – угол поворота спицы,  $\omega$  – угловая скорость поворота спицы,  $a_1$  и  $V_{1a}$  – зависящие от времени изгиб и скорость изгиба спицы соответственно. В поэлементном виде система представляется следующим образом [15]:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{M(U, \varphi, \omega)}{I}, \\ \dot{a}_1(t) &= V_{1a}(t), \\ \dot{V}_{1a}(t) &= -\frac{EI_{\text{изг}}}{\rho S} q_1^4 [a_1(t) + \gamma V_{1a}(t)] + \\ &+ \frac{2}{\rho S b_1(L)} \frac{M(U, \varphi, \omega)}{R_d}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $I$  – момент инерции спицы;  $E$  – модуль упругости;  $I_{\text{изг}}$  – изгибной момент инерции;  $\rho$  – плотность материала спицы;  $S$  – площадь спицы в поперечном сечении;  $l$  – координата длины спицы;  $M$  – общий момент, действующий на спицу,  $M(U, \varphi, \omega) = M_{\text{п}}(U) - M_{\text{тр}} - M_{\text{упор}}(\varphi, \omega) - M_{\text{ф}}(\varphi, \omega)$ ;  $M_{\text{п}}$  – полезный момент, создаваемый бесколлекторной машиной;  $U$  – напряжение питания бесколлекторной машины;  $M_{\text{тр}}$  – момент трения;  $M_{\text{упор}}$  – момент, создаваемый упором;  $M_{\text{ф}}$  – момент, создаваемый фиксатором;  $\gamma$  – коэффициент затухания;  $h(t, l) = a_1(t)b_1(l)$  – изгиб спицы [15];  $a_1(t)$  – функции только времени  $t$ ;  $b_1(l)$  – функции только координаты  $l$ ;  $q_1 = Z_1/L$ , где  $Z_1 = 1,875$  и  $L$  – полная длина спицы;  $R_d$  – радиус вала двигателя.

Управление осуществляется за счет изменения напряжения питания бесколлекторной машины  $U, |U| \leq U_{\max}$  ( $U_{\max} = 12,5$  В). Полезный момент зависит от управления  $U$  [7]:

$$M_n = m_\phi p E_0 U \sin \vartheta / (\omega_1 X_c),$$

где  $m_\phi$  – число фаз ротора;  $p$  – число пар полюсов магнитного поля;  $E_0$  – действующее значение электродвижущей силы (ЭДС) на обмотке статора;  $\vartheta$  – угол рассогласования (между  $U$  и  $E_0$ , для двигателя находится в пределах  $[0, \pi/2]$ );  $\omega_p$  – угловая скорость вращения ротора двигателя;  $X_c$  – синхронное сопротивление.

Рассмотрим спицу как цилиндрическую трубу. Примем ее за однозвенную конструкцию.

Требуется перевести систему (1) из начального состояния  $X(0)$  в заданное конечное  $X(t_f)$  при минимизации прогиба спицы  $h$  и при ограничении на напряжение питания  $U$  за конечное время  $t_f$  при отсутствии действия возмущений.

## 2. Алгоритм управления

Ввиду того, что терминальным (конечным) условием является перевод системы в заданное конечное состояние при минимизации колебаний конструкции при подходе спицы к упору, то в рассмотрение принимается иерархия из двух целевых функционалов. Причем в терминальную часть первого критерия входит угловая скорость для обеспечения плавного подведения спицы к заданному углу  $\varphi_f$ . Это приводит к удвоению числа уравнений по сравнению с оптимизацией по одному целевому функционалу [14; 16]. Использование на двух уровнях функционалов обобщенной работы А. А. Красовского [14; 16] позволяет уменьшить объем вычислений. В работе [14] показана целесообразность применения в этом случае упрощенного варианта решения алгоритма последовательной оптимизации, когда при рассмотрении второго уровня управление первого уровня считается реализованным. Применим этот алгоритм к решению данной задачи.

Расширим систему (1), добавив к ней уравнение  $\dot{U} = u$ . Положим  $Y = U$ ,

$$x = (\mathbf{X}^T Y)^T = (\varphi \omega a_1 V_{1a} U)^T,$$

$f = (F^T u)^T$ . Рассмотрим иерархию целевых функционалов вида:

$$J_1 = \mathbf{V}_{f_1}(\mathbf{X}, t_f), \tag{2}$$

$$J_2 = \mathbf{V}_{f_2}(\mathbf{X}, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [f_0(\mathbf{X}, t) + 0,5(u^2 + u_0^2)^2 k^{-2}] dt, \tag{3}$$

где

$$\mathbf{V}_{f_1} = 0,5\beta_2 [\omega(t_f) - \omega_f]^2,$$

$$\mathbf{V}_{f_2} = 0,5\Delta \mathbf{X}_f^T \boldsymbol{\alpha} \Delta \mathbf{X}_f,$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4),$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, k$  – заданные коэффициенты;  $\Delta \mathbf{X}_f = \mathbf{X}(t_f) - \mathbf{X}_f, \mathbf{X}_f = (\varphi_f \omega_f a_f V_{1a})^T$  – заданные конечные значения соответствующих переменных. Так как  $h(t, L) = a_1(t)b_1(L), V_{1a}(t, L) = V_{1a}(t)b_1(L)$ , то  $a_1(t) = h(t, L)/b_1(L)$  и  $a_1(t_f) = h(t_f, L)/b_1(L)$ .

Вычислим управление в виде  $u = u_1 + u_2$ , где  $u_1$  и  $u_2$  минимизируют критерии качества  $J_1$  и  $J_2$  соответственно. Примем, что на первом уровне производится подстройка прогнозирующей модели из условия минимума первого критерия так, чтобы на втором уровне можно было принять  $u_1 = 0, U_m(t) = U(t) + \Delta U$ .

С учетом сделанных допущений гамильтониан системы (1) примет вид  $H = \mathbf{p}^T f(\mathbf{X}) + f_0$ , где  $\mathbf{p} = [p_\varphi p_\omega p_a p_{V_{1a}} p_U]^T$  – вектор сопряженных переменных, или

$$H = p_\omega \dot{\omega} + p_a \frac{M}{I} + p_a V_{1a} + p_{V_{1a}} \left[ -\frac{EI_{\text{изг}}}{\rho S} q_1^4 [a_1(t) + \gamma V_{1a}(t)] + \frac{2}{\rho S b_1(L)} \frac{\partial M}{\partial l} \right] + p_U u + \frac{1}{2} \beta_1 (\varphi - \varphi_f)^2 + \frac{1}{2} \beta_2 h^2 + \frac{1}{2} \frac{u^2 + u_0^2}{k^2}.$$

Уравнения прогнозирующей модели при нулевом управлении [14; 16] имеют вид:

$$\dot{\varphi} = \omega, \quad \dot{\omega} = \frac{M_n(U) - M_{\text{тр}}}{I}, \quad \dot{a}_1 = V_{1a},$$

$$\dot{V}_{1a} = -\frac{EI_{\text{изг}}}{\rho S} q_1^4 [a_1(t) + \gamma V_{1a}(t)] + \frac{2}{\rho S b_1(L)} \frac{M_n(U) - M_{\text{тр}}}{R_d}, \quad \dot{U} = 0,$$

Для сопряженных переменных получаем:

$$\dot{p}_\varphi = -\beta_1 (\varphi - \varphi_f), \quad \dot{p}_\omega = -p_\varphi,$$

$$\dot{p}_a = p_{V_{1a}} \frac{EI_{\text{изг}}}{\rho S} q_1^4 - \beta_3 a_1 b_1^2,$$

$$\dot{p}_{V_{1a}} = -p_a + p_{V_{1a}} \frac{EI_{\text{изг}}}{\rho S} q_1^4 \gamma,$$

$$\dot{p}_U = -\left( p_\omega \frac{1}{I} + p_{V_{1a}} \frac{2}{\rho S b_1(L) R_d} \right) \frac{\partial M_n(U)}{\partial U},$$

$$p_\varphi(t_f) = \alpha_1 [\varphi(t_f) - \varphi_f],$$

$$p_\omega(t_f) = \alpha_2 [\omega(t_f) - \omega_f],$$

$$p_a(t_f) = \alpha_3 [a_1(t_f) - a_f],$$

$$p_{V_{1a}}(t_f) = \alpha_4 [V_{1a}(t_f) - V_{1af}], \quad p_U(t_f) = 0.$$

Здесь  $\frac{\partial M_n(U)}{\partial U} = A \sin \vartheta$ , где  $A = \frac{m_3 p E_0}{\omega_1 X_c}$ .

Величина  $\Delta U$  выбирается путем итераций из условия  $V_{\Gamma} = 0$  с точностью до малой  $\sigma > 0$  интегрированием уравнений модели первого уровня на интервале  $[t, t_f]$ .

Для определения управления  $u_2$  требуется найти  $p_{2U}$  лишь из системы уравнений подстроенной модели и системы уравнений для  $p_2$  при  $V_{\Gamma} = 0$ . То есть величину  $u_1 = -k_1^2 p_{1U}$  задать в виде  $-k_1^2 p_{1U} = \delta(t) \Delta U$ , где  $\Delta U = U_{md} - U(t)$ ,  $k_1$  – коэффициент,  $\delta(t)$  – дельта-функция (приближенно можно принять  $\delta(t) = 1/\Delta t$ , где  $\Delta t$  – шаг численного интегрирования системы (1)).

### 3. Результаты расчетов

Для сравнения разработанного алгоритма с ранее примененными к решению данной задачи [12; 13] определим начальное положение спицы при угле поворота  $\varphi_0 = \pi/4$ , угловой скорости  $\omega_0 = 0$ , прогибе  $h_0 = 0$  и скорости изгиба  $V_{1a_0}$ . Конечные значения угла раскрытия  $\varphi_f = 0$ , угловой скорости  $\omega_f = 0$ , прогиба  $h_f = 0$  и скорости изгиба  $V_{1a_f}$ . Примем время сведения  $t_f = 90$  с, максимально допустимую амплитуду прогиба  $h_{max} = 10$  мм. Значение коэффициента затухания примем  $\gamma = 0,04$  с. Первая собственная частота колебаний для случая заделанного левого и свободного правого концов  $\omega_{сизг1}$ . Число фаз ротора  $m_3 = 2$ , число пар полюсов магнитного поля  $p = 2$ , действующее значение ЭДС на обмотке статора  $E_0 = 2,5$  В, синхронное сопротивление  $X_c = 22 \cdot 10^{-3}$  Ом, угол рассогласования между полем ротора и статора  $\vartheta = \pi/10$  при любой нагрузке,  $\omega_1 = 247$  рад/с.

Были приняты следующие параметры спицы при моделировании [15]: материал АБС пластик QHF-0140, плотность материала  $\rho = 1600$  кг/м<sup>3</sup>, модуль Юнга  $E = 1,2 \cdot 10^{11}$  Па, длина спицы  $a = 9,75$  м, масса спицы (всех вложенных звеньев)  $m = 32$  кг. Рассматривается спица с сечением в виде кольца с внешним радиусом  $R = 0,26$  м и внутренним радиусом  $r = 0,25$  м. Момент инерции  $I$  будет равняться:

$$I = mR^2 / 2 + ma^2 / 3 = 1015,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Изгибной момент инерции:

$$I_{изг} = \pi R^3 \delta = 5,52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4,$$

где  $\delta$  – толщина стенки трубы (спицы).

Моделирование проводилось методом Эйлера с шагом интегрирования  $\Delta t = 0,01$  с. Расчеты показали, что при значениях параметров критерия  $J_2$ :  $\beta_1 = 0$ ,  $\beta_2 = 3$ ,  $\alpha_1 = 3000$ ,  $\alpha_2 = 0$ ,  $\alpha_3 = 0$ ,

$\alpha_4 = 0$ ,  $k_1^2 = 0,1$  алгоритм успешно решает поставленную задачу. На рис. 3 представлены графики зависимостей  $-\varphi(t)$  и  $-\omega(t)$ .

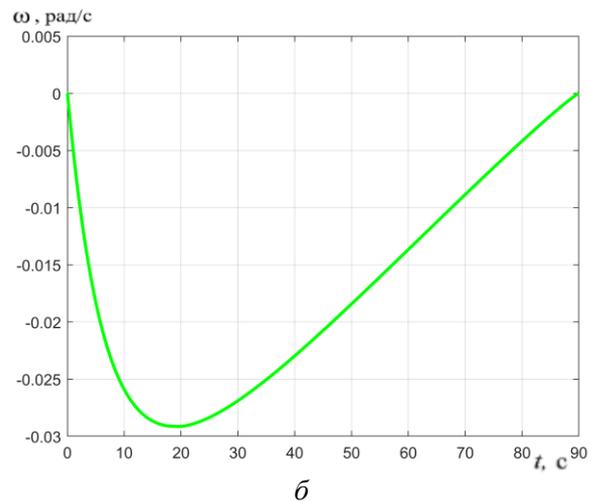
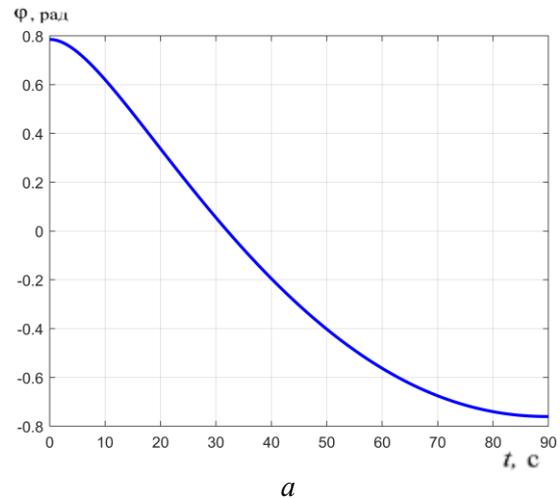


Рис. 3. Характер динамики сведения спицы:  
а)  $-\varphi(t)$ ; б)  $-\omega(t)$

Конечное значение  $\varphi(t_f) = -1 \cdot 10^{-4}$  рад. Угловые скорости при раскрытии спицы не превышают  $16 \cdot 10^{-3}$  рад/с, а в конечный момент  $\omega(t_f) = 1,3 \cdot 10^{-7}$  рад/с, что является характерным для исследуемого алгоритма. На рис. 4а помещен график  $h(t)$  на начальном участке, а на рис. 4б – график  $U(t)$ . Максимальное значение величины прогиба  $h$  возникало в начале процесса, когда существенно возросло управление, и составило  $h_{max} = -7,1 \cdot 10^{-3}$  м, а в конечный момент  $h(t_f) = 1,5 \cdot 10^{-6}$  м.

Достижение заданного конечного значения  $\varphi(t)$  происходит с малыми по абсолютной величине производными. Величина  $U(t)$  имела максимальное значение 4,63 В, в конечный момент – 0,01 В, что существенно ниже соответствующей величины при использовании алгоритма с коррекцией параметров структуры управления (12 В) [12; 13]. Актуальность уменьшения  $h(t_f)$  появится при рассмотрении сведения полностью выдвинутых 3-х

звеньев составной спицы с общей длиной 29 м. Представленный в данной статье алгоритм успешно производит сведение спицы и за более короткое время. При этом формируется управление, приводящее к  $U(t) > U_{\max}$ , в результате чего появляется участок со значением  $U(\tau) = U_{\max}$ .

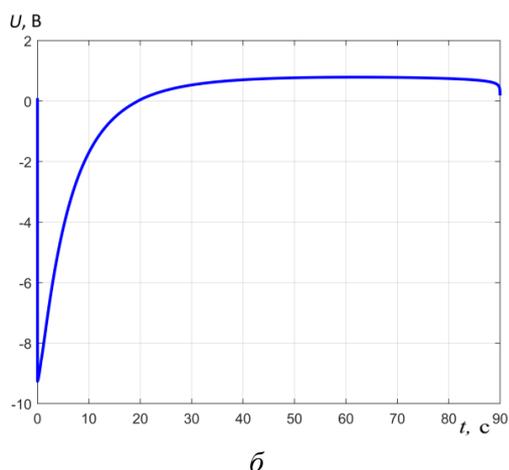
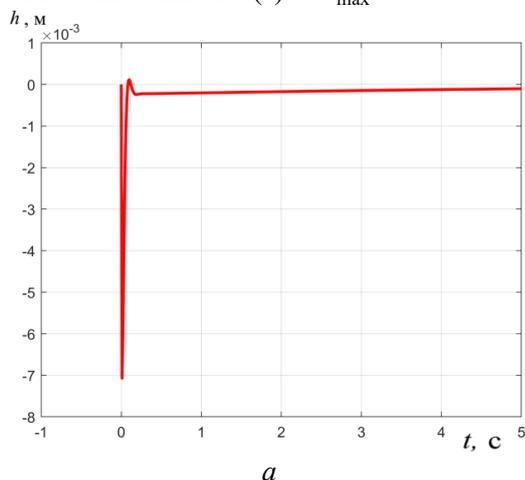


Рис. 4. Характер динамики раскрытия спицы:  
а)  $-h(t)$ ; б)  $-U(t)$

Расчеты показали, что предложенный алгоритм позволяет успешно решать задачи поворота спицы при любых начальных и конечных значениях угла  $\varphi$  с конечными значениями  $\omega(t_f)$  и  $h(t_f)$ , не превышающими указанных в данной статье, без изменения выбранных весовых коэффициентов  $\alpha$ . Изменение  $\alpha$  требуется при задании другого конечного времени  $t_f$ .

Используя предложенный алгоритм последовательной оптимизации, можно получать решение в режиме реального времени. Удастся плавно подойти к механизмам упора и фиксатора и не вызвать колебаний конструкции.

## Заключение

В данной статье был выполнен поиск и разработка оптимального управления поворотом спицы. Предложенный алгоритм позволяет в реальном времени обеспечить разведение спицы с плавным выходом к упорам с колебаниями амплитуды, не превышающей  $7,1 \cdot 10^{-3}$  м. Главным преимуществом алгоритма с иерархией целевых критериев является отсутствие длительных затухающих колебаний после достижения спицей заданного угла разворота.

Таким образом, задача улучшения динамических характеристик поворота спиц может быть решена путем включения в контур управления бортового компьютера с программным обеспечением, допускающим реализацию алгоритмов оптимального управления в процессе движения разведения спицы.

Исследованный в статье алгоритм последовательной оптимизации целесообразно применять в более сложных решениях с использованием обработки измерений и оптимизации интервалов наблюдений [17].

## Список литературы

- [1] Li B., Qi X., Huang H., Xu W. Modeling and analysis of deployment dynamics for a novel ring mechanism // Acta Astronautica. 2016. vol. 120. pp. 59–74.
- [2] Hongjian W., Qiyan H., Min Y., Dehai Zh., Xingchao D., Yang L., Xue Ch. Multi-frequency dual polarisation radiometer common aperture antenna feeding system // IET Microwaves Antennas & Propagation. 2018. vol. 12. no. 11. pp. 1765–1770.
- [3] Siriguleng B., Zhang W., Liu T., Liu Y. Z. Vibration modal experiments and modal interactions of a large space deployable antenna with carbon fiber material and ring-truss structure // Engineering Structures. 2020. vol. 207. pp. 148–153.
- [4] Wang H. J. Multifrequency Spaceborne Deployable Radiometer Antenna Designs // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2020. vol. 35. no 5. pp. 28–35.
- [5] Полянский И. С., Архипов Н. С., Мисюрин С. Ю. О решении проблемы оптимального управления адаптивной многолучевой зеркальной антенной // Автомат. и телемех. 2019. № 1. С. 83–100.
- [6] Yangmin X., Hang S., Alleyne A. G., Yang B. Feedback Shape Control for Deployable Mesh Reflectors Using Gain Scheduling Method // Acta Astronautica. 2016. vol. 121. pp. 241–255.
- [7] Dewalque P., Collette J.-P., Bruls O. Mechanical behaviour of tape springs used in the deployment of reflectors around a solar panel // Acta Astronautica. 2016. vol. 123. pp. 271–282.

- [8] Ramachandran S., Neve M. J., Sowerby K. W. Millimetre wave antenna deployment in a single room environment // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2018. vol. 12. no 15. pp. 2390–2394.
- [9] Rahmat-Samii Ya., Manohar V., Kovitz J. M., Hodges R., Freebury G., Peral E. Development of Highly Constrained 1 m Ka-Band Mesh Deployable Offset Reflector Antenna for Next Generation CubeSat Radars // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2019. vol. 67. no 10. pp. 6254–6266.
- [10] Tserodze S., Prowald J. S., Chkhikvadze K., Nikoladze M., Muchaidze M. Latest modification of the deployable space reflector structure with V-folding bars // CEAS Space Journal: An Official Journal of the Council of European Aerospace Societies. 2020. vol. 12. no. 2. pp. 163–169.
- [11] Space Mechanisms Lessons Learned Study [Электронный ресурс]. URL: <https://www1.grc.nasa.gov/research-and-engineering/space-mechanisms-project/> (дата обращения: 11.04.2021).
- [12] Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimization of the stages of deploying a large-sized space-based reflector // Acta Astronautica. 2020. vol. 176. pp. 717–724.
- [13] Кабанов С. А., Митин Ф. В. Оптимизация процессов раскрытия и создания формы трансформируемого рефлектора космического базирования // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2021. № 2. С. 106–125.
- [14] Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб : СПбГУ, 1997. 200 с.
- [15] Кабанов С. А., Зимин Б. А., Митин Ф. В. Разработка и анализ математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Часть I // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 20. № 1. С. 51–64.
- [16] Красовский А. А. Справочник по теории автоматического управления. М. : Наука, 1987. 712 с.
- [17] Малышев В. В., Красильщиков М. Н., Карлов В. И. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1989. 312 с.

## OPTIMAL DEPLOYMENT OF THE SPOKE OF A LARGE-SIZED TRANSFORMABLE REFLECTOR ACCORDING TO THE HIERARCHY OF CRITERIA

**S. A. Kabanov, D. S. Kabanov**

*Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov,  
Saint Petersburg, Russian Federation*

*The article discusses the process of controlling the angular motion of the spoke of a large-sized space-based reflector, taking into account bending vibrations. Currently, large antennas are actively used for receiving and transmitting data. When launching large structures into space, the problem arises of reliably deployment the spokes, since they are packed in a small volume to be able to be installed in a launch vehicle. Due to the possibility of various abnormal situations, such as jamming of elements, engagement of the net, it is necessary to re-deployment the antenna. Therefore, it is important to develop control algorithms that can reliably solve the problems of direct and reverse motion. In the process of deployment and bringing together the elements of the reflector, various deformations appear in the structure. When the antenna spokes are brought together, lateral oscillations make the largest contribution to the oscillatory of the transient process. Currently, elastically deformed elements are used to deployment large-sized reflectors, and a control program is also used. This prevents the control from being adjusted when the deployment conditions change. The paper investigates the possibility of minimizing the vibrations of a structure during its deployment by using optimal control algorithms in real time. The forward and reverse motion of the antenna elements is performed by means of a two-criteria hierarchy optimization. The results of numerical simulation of the optimal rotation of the reflector spoke are presented. The proposed algorithm allows you to choose the optimal control in emergency situations for various types of large reflectors.*

*Keywords: mathematical model, rotational motion, modeling of the process of deployment the spoke, large-sized transformable reflector, sequential optimization algorithm.*

## References

- [1] Li B., Qi X., Huang H., Xu W. Modeling and analysis of deployment dynamics for a novel ring mechanism // *Acta Astronautica*, 2016, vol. 120, pp. 59–74.
- [2] Hongjian W., Qiyang H., Min Y., Dehai Zh., Xingchao D., Yang L., Xue Ch. Multi-frequency dual polarisation radiometer common aperture antenna feeding system // *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2018, vol. 12, no. 11, pp. 1765–1770.
- [3] Siriguleng B., Zhang W., Liu T., Liu Y. Z. Vibration modal experiments and modal interactions of a large space deployable antenna with carbon fiber material and ring-truss structure // *Engineering Structures*, 2020, vol. 207, pp. 148–153.
- [4] Wang H. J. Multifrequency Spaceborne Deployable Radiometer Antenna Designs // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2020, vol. 35, no. 5, pp. 28–35.
- [5] Polyanskii I. S., Arkhipov N. S., Misyurin S. Yu. *O reshenii problemy optimal'nogo upravleniya adaptivnoj mnogoluchевой zerkal'noj antennoj* [On solving the optimal control problem] // *Automation and Remote Control*, 2019, no. 1, pp. 83–100. (In Russian)
- [6] Yangmin X., Hang S., Alleyne A. G., Yang B. Feedback Shape Control for Deployable Mesh Reflectors Using Gain Scheduling Method // *Acta Astronautica*, 2016, vol. 121, pp. 241–255.
- [7] Dewalque P., Collette J.-P., Bruls O. Mechanical behaviour of tape springs used in the deployment of reflectors around a solar panel // *Acta Astronautica*, 2016, vol. 123, pp. 271–282.
- [8] Ramachandran S., Neve M. J., Sowerby K. W. Millimetre wave antenna deployment in a single room environment // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2018, vol. 12, no. 15, pp. 2390–2394.
- [9] Rahmat-Samii Ya., Manohar V., Kovitz J. M., Hodges R., Freebury G., Peral E. Development of Highly Constrained 1 m Ka-Band Mesh Deployable Offset Reflector Antenna for Next Generation CubeSat Radars // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2019, vol. 67, no. 10, pp. 6254–6266.
- [10] Tserodze S., Prowald J. S., Chkhikvadze K., Nikoladze M., Muchaidze M. Latest modification of the deployable space reflector structure with V-folding bars // *CEAS Space Journal: An Official Journal of the Council of European Aerospace Societies*, 2020, vol. 12, no. 2, pp. 163–169.
- [11] Space Mechanisms Lessons Learned Study. Available at: <https://www1.grc.nasa.gov/research-and-engineering/space-mechanisms-project/> (accessed 11.04.2021).
- [12] Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimization of the stages of deploying a large-sized space-based reflector // *Acta Astronautica*, 2020, vol. 176, pp. 717–724.
- [13] Kabanov S. A., Mitin F. V. *Optimizaciya processov raskrytiya i sozdaniya formy transformiruемого рефлектора kosmicheskogo bazirovaniya* [Optimization of the Processes of Deployment and Shape Generation for a Transformable Space-Based Reflector] // *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2021, vol. 60, no. 2, pp. 283–302. (In Russian)
- [14] Kabanov S. A. *Upravlenie na prognoziruushih modelyah* [Controlling systems based on predictive models]. St. Petersburg, St. Petersburg State University Publishing House, 1997, 200 p. (In Russian)
- [15] Kabanov S. A., Zimin B. A., Mitin F. V. *Razrabotka i analiz matematicheskikh modelej raskrytiya podvizhnyh chastej transformiruemyh kosmicheskikh konstrukcij. CHast' I* [Development and Research of Mathematical Models of Deployment of Mobile Parts of Transformable Space Construction. Part I] // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 1, pp. 51–64. (In Russian)
- [16] Krasovskij A. A. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook on the theory of automatic control]. Moscow, Nauka, 1987, 712 p. (In Russian)
- [17] Malushev V. V., Krasilshikov M. N., Karlov V. I. *Optimizaciya nablyudeniya i upravleniya letatel'nyh apparatov* [Optimization of surveillance and control of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie, 1989, 312 p. (In Russian)

## Сведения об авторах

*Кабанов Сергей Александрович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем управления и компьютерных технологий Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Окончил Ленинградский ордена Красного Знамени механический институт в 1974 году. Область научных интересов: процессы управления.

*Кабанов Дмитрий Сергеевич* – кандидат технических наук, научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории Радиоэлектронных информационных управляющих систем Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Окончил Московский авиационный институт в 2009 году. Область научных интересов: оптимальное управление.