
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 517.977.5-629.783
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-3-183-191

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОМ ДЛЯ НАСТРОЙКИ РАДИООТРАЖАЮЩЕГО СЕТЕПОЛОТНА КОСМИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА

С. А. КАБАНОВ, Ф. В. МИТИН

*Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова,
190005, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: fedor28@list.ru*

Рассматривается процесс управления пьезоактюатором для настройки формы радиотражающего сетеполотна крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического базирования. Выбрана схема поточечной настройки. Вследствие ограниченного запаса электрической энергии на борту космического аппарата задача управления решается с учетом минимизации энергетических затрат в режиме реального времени. Разработан алгоритм последовательной оптимизации управления для автоматической настройки длины ванты за счет пьезоактюатора. Алгоритм позволяет минимизировать энергетические затраты и с высокой точностью выполнять терминальные условия. Посредством выбора весовых коэффициентов определяется наилучший вариант программы управления при разном конечном времени моделирования. Показана гибкость разработанного алгоритма при выборе критериев оптимизации.

Ключевые слова: алгоритм последовательной оптимизации, крупногабаритный трансформируемый рефлектор, радиотражающее сетеполотно, пьезоактюатор, математическая модель, моделирование

Введение. Быстрое развитие аэрокосмической промышленности выдвигает новые требования к космическим антеннам, такие как большая апертура, высокая точность, малый вес и др. [1, 2]. Из-за ограниченного пространства на ракетносителях крупногабаритные космические рефлекторы выполняются в виде развертываемых конструкций [3—5]. Такие системы имеют три состояния: сложенное, фаза раскрытия, рабочее положение. Для развертываемых антенн характерно множество типов конфигураций, которые различаются способом поддержки радиотражающего сетеполотна. Самой распространенной конструкцией является зонтичная с подвешенным сетеполотном между спицами. Тем не менее возникают новые концепции, позволяющие обеспечить более высокую точность формы отражающей поверхности и большую апертуру.

Описание системы и постановка задачи. В настоящей статье рассматривается процесс настройки радиотражающего сетеполотна крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического базирования с использованием тросовой (вантовой) системы поддержания формы рефлектора [6, 7]. Структурная схема рефлектора представлена на рис. 1. Конструкция состоит из силового каркаса и фронтальной сети, которая с помощью вант оттянута к тыльной сети для задания необходимой формы отражающей поверхности.

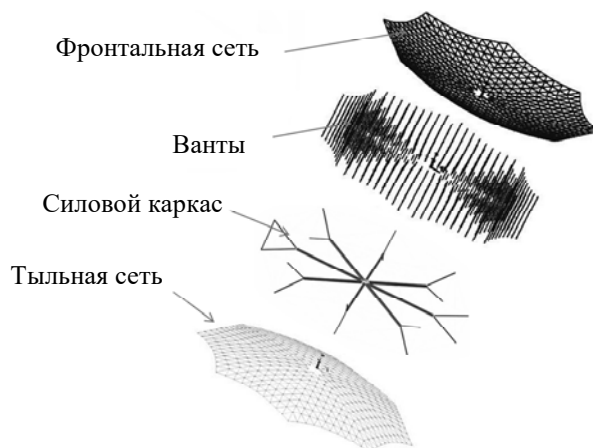


Рис. 1

Для образования и поддержания формы рефлектора фронтальная и тыльная сети соединены вантовыми подкреплениями (оттяжками). Ванты соединяют противоположные узлы сетей. Рассмотрим плоскую модель управления формой сетеполотна: см. рис. 2, где 1 — шнур, соединяющий концы звеньев 2 и 3 спицы (позволяющие задать параболическую форму сетеполотна), 4 — главный радиальный шнур фронтальной сети, 5 — главный радиальный шнур тыльной сети, 6 — корневое звено спицы, 7 — ванты, соединяющие главные радиальные шнуры с узлами фронтальной и тыльной сетей. В каждой ванте содержится по одному актюатору. Настройка формы происходит путем изменения длины ванты в каждой точке крепления.

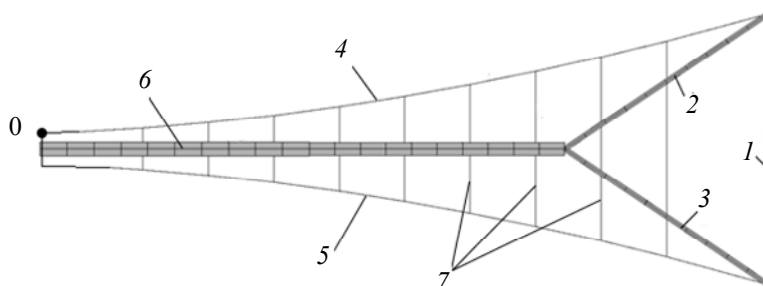


Рис. 2

В качестве актюаторов применяются пьезоактюаторы. Пьезоэлектрические материалы и элементы на их основе высоконадежны, устойчивы к воздействию различных агрессивных сред, имеют малые массогабаритные показатели, высокую радиационную стойкость и термостойкость, диэлектрическую природу [8]. Указанные свойства особенно важны при проектировании аппаратуры, предназначенной для работы в космосе, что обуславливает целесообразность использования данного типа актюаторов в космической отрасли [9—11].

Так как запас необходимой энергии для осуществления миссии космического рефлектора ограничен [12—14], важной задачей является минимизация энергетических затрат. Выполнение этого условия позволит уменьшить массу накопителей энергии и увеличить срок эксплуатации оборудования.

Система дифференциальных уравнений, описывающих пьезоэлемент с исполнительным органом, имеет следующий вид [11]:

$$\dot{\mathbf{X}}_{\Pi} = \mathbf{f}(\mathbf{X}_{\Pi}, u, t),$$

где $\mathbf{X}_{\Pi} = (lV U_{эл})^T$ — вектор состояния, или

$$\left. \begin{aligned} \dot{l} &= V; \\ \dot{V} &= \frac{NK_0U_{\text{эл}} + F_c - K_y l - K_d V}{m_{\Sigma}}; \\ \dot{U}_{\text{эл}} &= \frac{e_{\text{эл}}}{C_0 R_{\text{вн}} K_d} - \frac{U_{\text{эл}}}{C_0 R_{\text{вн}} K_d} - \frac{K_{\text{п}} V}{C_0 K_d}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где l — изменение длины (ход) актюатора, V — скорость выдвигания актюатора, N — количество элементов, K_0 — коэффициент обратного пьезоэффекта, $U_{\text{эл}}$ — электрическое напряжение, приложенное к электродам актюатора, F_c — статическое усилие, K_y — коэффициент упругости, K_d — коэффициент внутреннего демпфирования, $e_{\text{эл}}$ — напряжение от источника электродвижущей силы, C_0 — емкость, $R_{\text{вн}}$ — внутреннее сопротивление, $K_{\text{п}}$ — коэффициент прямого пьезоэффекта, m_{Σ} — суммарная масса, состоящая из массы самого пьезоактюатора и перемещаемой массы.

Задача управления пьезоактюатором состоит в приведении его из начального положения $\mathbf{X}_{\text{п}}(0)$ в заданное конечное состояние $\mathbf{X}_{\text{п}}(t_f)$ при минимизации энергетических затрат и ограничении на управление, за которое принято напряжение от источника электродвижущей силы $e_{\text{эл}}$, $|e_{\text{эл}}| \leq e_{\text{эл max}}$.

Синтез алгоритма управления. Поскольку в поставленной задаче необходимо выполнить терминальные условия как для перемещений, так и для их производных, а также минимизировать энергетические затраты, то для ее решения предлагается использовать алгоритм последовательной оптимизации.

Используя алгоритм последовательной оптимизации по иерархии из двух критериев различных уровней значимости и соответствующие им функции управления, можно добиться удовлетворительных результатов как по одному, так и по другому критерию [15]. Для обеспечения малых значений производной от l по t в конечный момент времени t_f с учетом минимизации энергетических затрат в ходе работы пьезоактюатора исследуем задачу управления пьезоактюатором при наличии наблюдений за всеми компонентами вектора состояния $\mathbf{X}_{\text{п}}$ и отсутствии возмущений.

Если для системы из n уравнений оптимизация по одному критерию приводит к двухточечной краевой задаче для системы порядка $2n$, то для иерархии из двух критериев число уравнений составляет $4n$. Объем вычислений возможно уменьшить путем использования критериев обобщенной работы А. А. Красовского. В работе [15] показана целесообразность применения упрощенного варианта алгоритма, когда при рассмотрении второго уровня управление первого уровня считается реализованным. Исследования различных систем показали, что характер траекторий управляемого движения по упрощенному алгоритму не изменяется по сравнению с полным решением.

Рассмотрим расширенную систему $\dot{\mathbf{X}}'_{\text{п}} = f(x, u, t)$, добавив к системе (1) уравнение $\dot{U} = u$. Положим

$$Y = U, \quad x = \left(\mathbf{X}_{\text{п}}^T \ Y \right)^T = (l \ V \ U_{\text{эл}})^T, \quad f = \left(\mathbf{X}_{\text{п}}^T \ u \right)^T.$$

В системе управления пьезоактюатором с обеспечением конечных условий для величины l при малых конечных значениях ее производной целесообразно использовать упрощенный вариант алгоритма, обеспечивающий минимизацию критериев

$$J_1 = \mathbf{V}_{f1}(\mathbf{X}_\Pi, t_f) \quad J_2 = \mathbf{V}_{f2}(\mathbf{X}_\Pi, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [f_0(\mathbf{X}_\Pi, t) + 0,5(u^2 + u_0^2)^2 k_2^{-2}] dt, \quad (2)$$

где $\mathbf{V}_{f1} = 0,5\beta_1 [V(t_f) - V_f]^2$, $\mathbf{V}_{f2} = 0,5\Delta\mathbf{X}_{\Pi f}^T \mathbf{p}_k \Delta\mathbf{X}_{\Pi f}$; $f_0 = 0,5\beta_2 [l(t) - l_f]^2 + 0,5\beta_3 P_{\text{эл}}(t)$; $\mathbf{p}_k = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4)$, $\beta_1, \beta_2, \beta_3, k_2$ — заданные коэффициенты; $\Delta\mathbf{X}_{\Pi f} = \mathbf{X}_\Pi(t_f) - \mathbf{X}_{\Pi f}$, $\mathbf{X}_{\Pi f} = (l_f V_f U_{\text{эл}f})^T$ — заданные конечные значения соответствующих переменных; $P_{\text{эл}} = U_\Pi I = (e_{\text{эл}} - U_{\text{эл}})^2 / R_{\text{вн}}$ — электрическая мощность, U_Π — полное приложенное напряжение, I — сила тока.

Функция управления вычисляется как $u = u_1 + u_2$, где u_1 и u_2 минимизируют критерии качества J_1 и J_2 соответственно. На первом уровне производится подстройка прогнозирующей модели, например, таким образом, чтобы можно было принять $u_1 = 0$, $U_m(t) = U(t) + \Delta U$.

С учетом сделанных допущений гамильтониан системы (1) примет вид

$$H = \mathbf{p}^T \mathbf{f}(\mathbf{X}'_\Pi) + f_0,$$

где $\mathbf{p} = [p_l \ p_V \ p_{U_{\text{эл}}} \ p_U]^T$ — вектор сопряженных переменных, или

$$H = p_l V + p_V \frac{K_0 U_{\text{эл}} + F_c - K_y l - K_d V}{m_\Sigma} + p_{U_{\text{эл}}} \left(\frac{e_\Sigma}{C_0 R_{\text{вн}} K_d} - \frac{U_{\text{эл}}}{C_0 R_{\text{вн}} K_d} - \frac{K_\Pi V}{C_0 K_d} \right) + p_U u + \frac{1}{2} \beta_2 (l - l_f)^2 + \frac{1}{2} \beta_3 P_{\text{эл}} + \frac{1}{2} \frac{u^2 + u_0^2}{k_2^2}.$$

Уравнения прогнозирующей модели имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{l} &= V; \\ \dot{V} &= \frac{NK_0 U_{\text{эл}} + F_c - K_y l - K_d V}{m_\Sigma}; \\ \dot{U}_{\text{эл}} &= \frac{e_{\text{эл}}}{C_0 R_{\text{вн}} K_d} - \frac{U_{\text{эл}}}{C_0 R_{\text{вн}} K_d} - \frac{K_\Pi V}{C_0 K_d}; \\ \dot{U} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для сопряженных переменных получаем

$$\begin{aligned} \dot{p}_l &= p_V \frac{K_y}{m_\Sigma} - \beta_2 (l - l_f), \quad \dot{p}_V = -p_l + p_V \frac{K_d}{m_\Sigma} + p_{U_{\text{эл}}} \frac{K_\Pi}{C_0}, \\ \dot{p}_{U_{\text{эл}}} &= -p_V \frac{NK_0}{m_\Sigma} + \dot{p}_{U_{\text{эл}}} \frac{1}{C_0 R_{\text{вн}}} + \beta_3 \frac{e_{\text{эл}}}{R_{\text{вн}}} - \beta_3 \frac{U_{\text{эл}}}{R_{\text{вн}}}, \quad \dot{p}_U = -p_{U_{\text{эл}}} \frac{1}{C_0 R_{\text{вн}}} - \beta_3 \frac{e_{\text{эл}}}{R_{\text{вн}}} + \beta_3 \frac{U_{\text{эл}}}{R_{\text{вн}}}, \\ p_l(t_f) &= \rho_1 [l(t_f) - l_f], \quad p_V(t_f) = \rho_2 [V(t_f) - V_f], \quad p_{U_{\text{эл}}}(t_f) = \rho_3 [U_{\text{эл}}(t_f) - U_{\text{эл}f}], \\ p_U(t_f) &= 0. \end{aligned}$$

Величина ΔU выбирается путем итераций из условия $\mathbf{V}_{f1} = 0$ с точностью до малого значения $\sigma > 0$ с помощью интегрирования уравнений модели первого уровня на интервале $[t, t_f]$. В данном случае из третьего уравнения системы (1) можно определить необходимую для минимизации первого критерия функцию управления

$$u_{\text{mod}} = \left[(U_{\text{эл}f} - U_{\text{эл}}(t)) / (t_f - t) \right] C_0 R_{\text{вн}} + U_{\text{эл}} + K_{\text{п}} V R_{\text{вн}}. \quad (4)$$

Для определения u_2 требуется найти функцию p_{2U} из систем уравнений (3) и (4) при $V_{f1} = 0$. Иными словами, величину $u_1 = -k_1^2 p_{1U}$ (здесь k_1 — коэффициент) следует задать в виде $-k_1^2 p_{1U} = \delta(t) \Delta U$, где $\Delta U = u_{\text{mod}} - U(t)$, $\delta(t)$ — дельта-функция (приближенно можно принять $\delta(t) = 1/\Delta t$, где Δt — шаг численного интегрирования системы (1)).

Если оптимизировать конечное время, то исходную систему (1) можно представить в виде

$$\dot{X} = F(X_{\text{п}}, Y, t), \dot{Y} = u,$$

где $Y = (U \ t_f)^T$.

Тогда в двухуровневой задаче управления получаем $u = u_1 + u_2$, $u_1 = (u_a \ 0)^T$, $u_2 = (u_b \ u_t)^T$, $\dot{t}_f = u_t = -k_t^2 p_t$, $p_t = H(X'_{\text{п}}, \mathbf{p}, u, t)|_f$, где k_t — заданный коэффициент; u_a , u_b , u_t — соответствующие функции управления, т.е. управление конечным моментом формируется на втором уровне.

Результаты расчетов. Пьезоактюатор выдвигается из начального положения при $l_0 = 0$ и фиксируется при достижении заданной длины $l_f = 5$ мм. Актюатор в начальном положении находится в состоянии покоя, соответственно линейная скорость $V_0 = 0$, напряжение $U_{\text{эл}0} = 0$. Конечное значение линейной скорости $V_f = 0$. Пьезоактюатор преобразует электрическое напряжение в механическое перемещение [8]. Когда к нему приложено электрическое напряжение он деформируется, при снятии напряжения приходит в исходное состояние. Примем конечное значение напряжения, исходя из ограничений, принятых на орбите: $U_{\text{эл}f} = 12$ В. Время выдвигания $t_f = 2$ с.

Для моделирования был выбран тонкопленочный пьезоэлектрический микроактюатор типа АПМ со следующими техническими характеристиками [16]: $K_0 = 3,425 \cdot 10^{-8}$ Кл/м, $m_{\Sigma} = 0,125$ кг, $F_c = 0$, $K_y = 7,611$ Н/м, $K_d = 1,9$, $C_0 = 11,7 \cdot 10^{-5}$ Ф, $R_{\text{вн}} = 1,025 \cdot 10^2$ Ом. Для осуществления выдвигания на заданную длину $l_f = 5$ мм при ограничении на управление $e_{\text{элmax}} = 12$ В необходимо $N = 305$.

Численное моделирование перевода системы из начального состояния $x(0) = (0 \ 0 \ 0)^T$ в конечное $x(t_f) = (l_f \ 0 \ U_{\text{эл}f})^T$ при минимизации энергии $P_{\text{эл}}$ и отсутствии перерегулирования по длине l при начальном значении $t_f(t_0) = 2$ с проводилось методом Эйлера с шагом $\Delta t = 0,00001$ с. Расчеты показали, что при значениях параметров критериев J_1 и J_2 : $\rho_1 = 10^4$, $\rho_2 = 10^8$, $\rho_3 = 0$, $\rho_4 = 0$, $\beta_1 = 0$, $\beta_3 = 0$, $k_2^2 = 1$, $k_t^2 = 1$ — алгоритм успешно решает поставленную задачу. При этом за счет управления конечным моментом времени $t_f = 4,0675$ с. Затраченная мощность на перевод системы из начального состояния в конечное равна $P_{\text{эл}} = 0,0075$ Вт при максимальной силе тока $I_{\text{max}} = 0,0069$ А. На рис. 3 и 4 представлены графики зависимостей $l(t)$ и $V(t)$ соответственно.

Конечное значение $l(t_f)=0,00502$ м отличается от заданного на $0,00002$ м. Линейная скорость при выдвигании актюатора не превышает $0,0025$ м/с, а в конечный момент $V(t_f)=2,361 \cdot 10^{-5}$ м/с, что является характерным для исследуемого алгоритма.

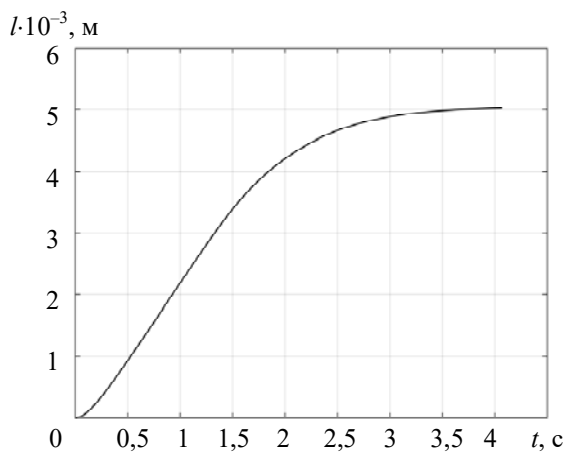


Рис. 3

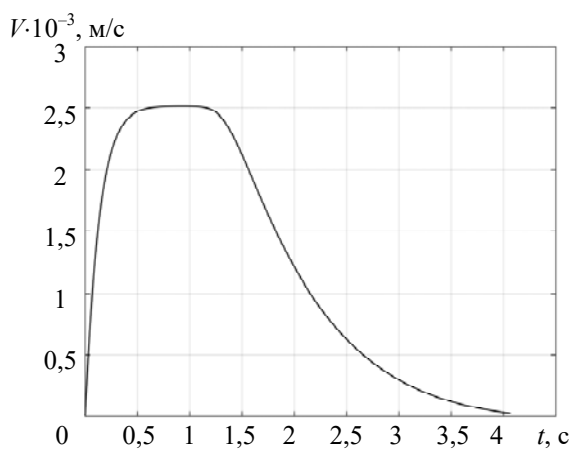


Рис. 4

Для сравнения энергетических затрат было проведено моделирование системы (1) при использовании ПИД-регулятора с ограничениями на управление. Для перевода системы из начального состояния $\mathbf{X}_n(0)$ в конечное $\mathbf{X}_n(t_f)$ за время $t_f = 2$ с при значениях коэффициентов усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих регулятора — $k_p = 10^3$, $k_i = 4,2 \cdot 10^3$, $k_d = 10^5$ — была затрачена мощность $P_{эл} = 0,032$ Вт при $I_{\max} = 0,049$ А. При таком управлении затраченная мощность на порядок больше, чем при использовании алгоритма оптимального управления, а максимальное значение силы тока выросло более чем в 7 раз.

При $\beta_3 = 10^6$ удастся снизить затраченную мощность до $0,0014$ Вт при $I_{\max} = 0,0031$ А и $t_f = 4,0485$ с. С увеличением коэффициента β_2 удастся уменьшить время t_f , но при этом возрастает затраченная мощность; при $\beta_2 = 30 \cdot 10^3$ результаты аналогичны ПИД-регулированию. Значение I_{\max} возникает в начале процесса, когда существенно возрастает u , в конечный момент $I(t_f) = 10^{-8}$ А.

Особенность траекторий $l(t)$ — достижение заданного конечного значения с малыми по абсолютной величине производными. Затраченная мощность $P_{эл}$ существенно ниже соответствующего значения при использовании алгоритма коррекции параметров структуры управления [11, 12].

Преимущество алгоритма последовательной оптимизации заключается в возможности реализовать управление в режиме реального времени и управлять конечным моментом времени t_f до тех пор, пока не будут выполнены терминальные условия с определенной точностью.

Если рассматривать оптимизацию только по второму критерию (2), то приходим к алгоритму с прогнозирующей моделью [15, 17]. В этом случае реализация алгоритма при $\rho_1 = 10^3$, $\rho_2 = 10^8$, $\rho_3 = 0$, $\rho_4 = 0$, $\beta_3 = 0$, $k_2^2 = 1$, $k_i^2 = 1$ приводит к следующим результатам: $l(t_f) = 0,0057$ м, $V(t_f) = 8,245 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Закключение. Разработан алгоритм последовательной оптимизации для изменения длины пьезоактюатора при настройке формы радиоотражающего сетеполотна крупногабаритного трансформируемого рефлектора. С помощью данного алгоритма удалось добиться необходимой точности и качества регулирования. Алгоритм может быть реализован в режиме реального времени, его использование позволяет минимизировать энергетические затраты при выполнении терминальных условий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00646 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Terada M., Bludworth N., Moore J. et al.* Deployable reflector system for satellite applications // IEEE MTT-S Intern. Conf. on Microwave and Optoelectronics, Brazil. 2005. P. 647—656.
2. *Li T.* Deployment analysis and control of deployable space antenna // Aerospace Science and Technology. 2012. Vol. 18, N. 1. P. 42—47.
3. *Kazantsev Z. A.* Deployment concept mechanical system of a radar antenna for space purposes // Сибир. журн. науки и технологий. 2017. № 4. С. 858—867.
4. *Xuelin D., Jingli D., Hong B., Guohui S.,* Deployment analysis of deployable antennas considering cable net and truss flexibility // Aerospace Science and Technology. 2018. Vol. 82—83. P. 557—565.
5. *Wang H.* Multifrequency spaceborne deployable radiometer antenna designs // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2020. Vol. 35, N 5. P. 28—35.
6. *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.
7. *Кабанов С. А., Зимин Б. А., Митин Ф. В.* Разработка и анализ математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Часть II // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 2. С. 117—128.
8. *Бобцов А. А.* и др. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 131 с.
9. *Tanaka H., Shimozone N., Natori M. C.* A design method for cable network structures considering the flexibility of supporting structures // Trans. of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. 2008. Vol. 50, N 170. P. 267—273.
10. *Gajbhiye S. C., Upadhyay S. H., Harsha S. P.* Nonlinear vibration analysis of piezo-actuated flat thin membrane // J. of Vibration and Control. 2015. Vol. 21, N 6. P. 1162—1170.
11. *Кабанов С. А., Митин Ф. В., Кривушов А. И., Улыбушев Е. А.* Управление пьезоактюатором для настройки отражающей поверхности рефлектора космического базирования // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 111—116.
12. *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.
13. *Zhenxing S., Huijian L., Xiaoning L., Gengkai H.* Thermal-structural dynamic analysis of a satellite antenna with the cable-network and hoop-truss supports // J. of Thermal Stresses. 2019. Vol. 42, N 11 P. 1339—1356.
14. *Петровичев М. А. Гуртов А. С.* Система энергоснабжения бортового комплекса космических аппаратов: Учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 88 с.
15. *Кабанов С. А.* Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб: Изд-во СПбГУ, 1997. 200 с.
16. *Панич А. Е.* Пьезокерамические актюаторы. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. 159 с.
17. *Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского.* М.: Наука, 1987. 712 с.

- Сведения об авторах**
- Сергей Александрович Кабанов** — д-р техн. наук, профессор; БГТУ „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра систем управления и компьютерных технологий; E-mail: kaba-sa@mail.ru
- Федор Васильевич Митин** — канд. техн. наук; БГТУ „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра систем управления и компьютерных технологий; ст. преподаватель; E-mail: fedor28@list.ru

Поступила в редакцию
22.12.2020 г.

Ссылка для цитирования: Кабанов С. А., Митин Ф. В. Оптимальное управление пьезоактуатором для настройки радиоотражающего сеполотна космического рефлектора // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 3. С. 183—191.

OPTIMAL CONTROL OF THE PIEZO ACTUATOR FOR TUNING THE RADIO-REFLECTING MESH OF SPACE REFLECTOR

S. A. Kabanov, F. V. Mitin

D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, 190005, St. Petersburg, Russia
E-mail: fedor28@list.ru

The process of controlling a piezo actuator for adjusting the shape of radio-reflecting mesh of a large-sized transformable space-based reflector is considered. A point-by-point adjustment scheme is selected. Due to the limited supply of electrical energy on board the spacecraft, the control problem is solved with the account for energy costs in real time. An algorithm has been developed for sequential control optimization for automatic cable length adjustment using a piezo actuator. The algorithm allows minimizing energy costs and fulfilling terminal conditions with high accuracy. By choosing the weighting factors, the best version of the control program is determined for different finite simulation times. The flexibility of the developed algorithm is shown when choosing the optimization criteria.

Keywords: sequential optimization algorithm, large-size transformable reflector, radio-reflective mesh, piezo actuator, mathematical model, modeling

REFERENCES

1. Terada M., Bludworth N., Moore J. et al. *IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics*, Brazil, 2005, pp. 647–656.
2. Li T. *Aerospace Science and Technology*, 2012, no. 1(18), pp. 42–47.
3. Kazantsev Z.A. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2017, no. 4, pp. 858–867. (in Russ.)
4. Xuelin D., Jingli D., Hong B., Guohui S. *Aerospace Science and Technology*, 2018, vol. 82–83, pp. 557–565.
5. Wang H. *IEEE Aerospace and electronic systems magazine*, 2020, no. 5(35), pp. 28–35.
6. Kabanov S.A., Zimin B.A., Mitin F.V. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, no. 1(20), pp. 51–64. (in Russ.)
7. Kabanov S.A., Zimin B.A., Mitin F.V. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, no. 2(21), pp. 117–128. (in Russ.)
8. Bobtsov A.A. et al. *Ispolnitel'nye ustrojstva i sistemy dlya mikroperemeshchenij* (Actuators and systems for micro-displacement), St. Petersburg, 2011, 131 p. (in Russ.)
9. Tanaka H., Shimozone N., Natori M.C. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2008, no. 170(50), pp. 267–273.
10. Gajbhiye S.C., Upadhyay S.H., Harsha S.P. *Journal of Vibration and Control*, 2015, no. 6(21), pp. 1162–1170. (in Russ.)
11. Kabanov S.A., Mitin F.V., Krivushov A.I., Ulybushev E.A. *Russian Aeronautics*, 2018, no. 4, pp. 111–116 (in Russ.)
12. Kabanov S.A., Mitin F.V. *Izv.RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2021, no. 2, pp. 106–125. (in Russ.)
13. Zhenxing S., Huijian L., Xiaoning L., Gengkai H. *Journal of Thermal Stresses*, 2019, no. 11(42), pp. 1339–1356.
14. Petrovichev M.A., Gurtov A.S. *Sistema energosnabzheniya bortovogo kompleksa kosmicheskikh apparatov: ucheb. posobie* (The Power Supply System of the Onboard Complex of Spacecrafts: the Textbook), Samara, 2007, 88 p. (in Russ.)
15. Kabanov S.A. *Upravlenie sistemami na prognoziruuyushchih modelyah* (Control Systems Based on Predictive Model), St. Petersburg, 1997, 200 p. (in Russ.)
16. Panich A.E. *P'ezokeramicheskie aktyuatory* (Piezoceramic Actuators), Rostov-na-Donu, 2008, 159 p. (in Russ.)

17. Krasovskij A.A., ed., *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija* (Handbook on the Theory of Automatic Control), Moscow, 1987, 712 p. (in Russ)

Data on authors

Sergey A. Kabanov — Dr. Sci., Professor; D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, Department of Control Systems and Computer Technologies;
E-mail: kaba-sa@mail.ru

Fedor V. Mitin — PhD; D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, Department of Control Systems and Computer Technologies; Senior Lecturer;
E-mail: fedor28@list.ru

For citation: Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimal control of the piezo actuator for tuning the radio-reflecting mesh of space reflector. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 3. P. 183—191 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-3-183-191