

АЛГОРИТМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭТАПА ВЫДВИЖЕНИЯ СПИЦ КРУПНОГАБАРИТНОГО ТРАНСФОРМИРУЕМОГО РЕФЛЕКТОРА

Д. С. КАБАНОВ, Е. Н. НИКУЛИН

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

Рассматривается процесс выдвижения спиц крупногабаритного рефлектора космического базирования с учетом колебаний сжатия. Предложена усовершенствованная математическая модель выдвижения спиц с учетом механизмов упора и фиксатора продольных колебаний. Модель позволяет исследовать колебания системы в любой точке спицы в процессе моделирования. Разработан алгоритм последовательной оптимизации управления автоматическим выдвижением элементов антенны, позволяющий минимизировать колебания системы и с высокой точностью выполнять терминальные условия. Приведены результаты численного моделирования, показывающие преимущество предложенного алгоритма по сравнению с классическими методами управления.

***Ключевые слова:** алгоритм последовательной оптимизации, крупногабаритный трансформируемый рефлектор, математическая модель, поступательное движение, моделирование*

Введение. Современный этап развития радиотехнических систем различного назначения связан с разработкой и применением крупногабаритных разворачиваемых антенн-рефлекторов, устанавливаемых на космических аппаратах [1, 2]. Такие системы обладают широкой пропускной способностью, что позволяет вести наблюдение за Землей с высокой точностью. Особенностью крупногабаритных систем является компактная транспортировочная форма в раскрытом состоянии. В последние годы появилось множество концепций и инженерных разработок разворачиваемых антенн [3]. Типичные складные конструкции содержат телескопические, шарнирные элементы, имеется практика использования элементов с памятью формы, раскладных ферм и пр. [4]. Требования к изменению формы определяют необходимость решения новых задач управления, целью которых является приведение предварительно сложенного рефлектора в развернутое рабочее состояние [5, 6]: раскрытие спиц на заданный угол, выдвижение фрагментов спиц и настройка формы радиоотражающего сетеполотна. Важным критерием при разворачивании элементов конструкции является минимизация колебаний системы. В общем случае перевод антенны в рабочее состояние осуществляется поэтапно, поэтому, минимизировав колебания на каждом этапе, можно существенно сократить общее время перехода рефлектора в заданное конечное положение.

Математические модели основных видов движения при раскрытии рефлектора представлены в работах [7, 8]. Для исследования колебаний системы и динамики переходных процессов необходимо совершенствовать данные модели с учетом особенностей разделения параметров, зависящих от длины и времени. Для решения задачи по раскрытию крупногабаритного трансформируемого рефлектора в работе [9] предлагается использовать иерархию из двух критериев и алгоритм последовательной оптимизации. Алгоритм коррекции оптимальной структуры управления [10—13], определяемой согласно принципу максимума, позволяет успешно решать поставленную задачу в реальном времени в детерминированной постановке [14, 15]. Однако в данной задаче принципиально важным является сокращение общего време-

ни процесса и обеспечение близкой к нулю скорости достижения механизмов упора и фиксатора. Наличие двух критериев позволяет в режиме реального времени корректировать управление в зависимости от скорости движения системы при минимизации возникающих колебаний на всем интервале моделирования.

Описание системы и постановка задачи. Развертывание крупногабаритного трансформируемого рефлектора сопровождается поступательным и вращательным движением. Поступательное движение совершается при выдвижении спиц и штанг. Рассмотрим задачу выдвижения звеньев спиц.

Выведем усовершенствованную модель динамики рассматриваемой системы на основе приведенных в работе [7] уравнений с учетом разделения параметров колебаний, зависящих от длины и времени. Схематично модель системы приведена на рис. 1. Спица одним концом жестко закреплена за силовой каркас рефлектора космического базирования. Необходимо выдвинуть звено 2 спицы длиной l_f и массой m , телескопически уложенное в звено 1, из начального транспортировочного положения l_0 в конечное заданное. На спицу действуют сила трения $F_{тр}$ и толкающая полная сила $F_{п}$. При изменении длины выдвижения l возникает продольная деформация звена 2 спицы — сжатие $\Delta l_{сж}$, которое является функцией координаты l и времени t .

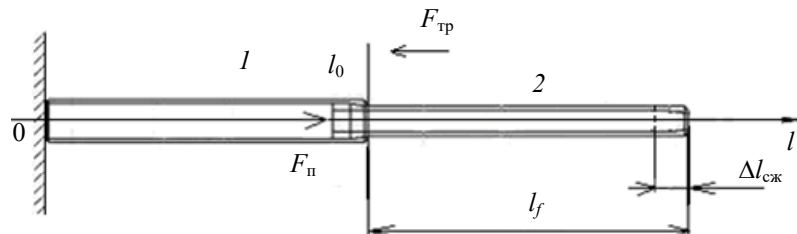


Рис. 1

Примем, что электрический двигатель задает полезную толкающую силу $F_{п} = k_f M_{п}$, где $M_{п}$ — вращающий полезный момент, k_f — коэффициент преобразования вращающего момента в толкающую полезную силу. Создаваемый бесколлекторной машиной момент $M_{п} = AU \sin \vartheta$, где $A = k_1 \varepsilon / (\omega_1 X_c)$, здесь k — число фаз ротора, ι — число пар полюсов магнитного поля, ε — действующее значение ЭДС на обмотке статора, ω_1 — скорость вращения ротора двигателя, X_c — синхронное сопротивление, U — напряжение питания, ϑ — угол рассогласования (между U и ε , для двигателя находится в пределах $[0, \pi/2]$). При достижении конечной длины выдвижения звена на спицу действуют механизмы упора и фиксации. Таким образом, общая сила F с учетом силы трения, наличия упора и фиксатора определяется как $F = F_{п} - F_{тр} - F_{уп} - F_{ф}$, где $F_{уп}$ — сила, создаваемая упором, $F_{ф}$ — сила, создаваемая фиксатором.

Учитывая, что раскрывающийся элемент задействует упор только при достижении длины l_f , общую модель упора можно записать следующим образом:

$$F_{уп} = (k_{ж,уп} \Delta l + c_{д,уп} \dot{l}) H_{уп}(\Delta l),$$

где $k_{ж,уп}$ — коэффициент жесткости упругого компонента упора, $c_{д,уп}$ — коэффициент демпфирования вязкого компонента упора, $\Delta l = l - l_f$ — относительное перемещение, соответствующее моменту установки спицы на упор при достижении конечной длины выдвижения l_f , $H_{уп}(\Delta l)$ — функция, которая принимает значение „1“ (при $\Delta l > 0$) или „0“ (при $\Delta l < 0$).

Аналогично модели упора общая модель фиксатора имеет следующий вид:

$$F_{\phi} = (k_{ж.ф}\Delta l + c_{д.ф}\dot{l})H_{\phi}(\Delta l),$$

где $H_{\phi}(\Delta l)$ — функция, принимающая значение „1“ (при $\Delta l < 0$) или „0“ (при $\Delta l > 0$) при условии достижения величины l_f , т.е. $H_{уп}(\Delta l) = 1$.

Выдвижение звена спицы массой m осуществляется согласно уравнению $m\ddot{l} - F = 0$ или через систему дифференциальных уравнений $\dot{l} = V$, $\dot{V} = F/m$, где V — линейная скорость выдвижения звена спицы.

Уравнение продольных колебаний спицы формируется с помощью уравнения Лагранжа второго рода с учетом диссипативных сил и имеет следующий вид [1]:

$$\Delta \ddot{l}_{сж} + \frac{E}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \Delta l_{сж}}{\partial l^2} + \gamma \frac{\partial^2 V_q}{\partial l^2} \right) + \frac{F}{\rho S} = 0, \quad (1)$$

где E — модуль упругости, ρ — плотность материала спицы, S — площадь спицы в поперечном сечении, γ — коэффициент затухания, V_q — скорость сжатия при продольной деформации звена спицы.

Приведем уравнение (1) к системе дифференциальных уравнений первого порядка по времени. Далее точка над переменной понимается как производная по времени, а символ „штрих“ — как дифференциал по длине. Согласно методу Фурье ищем решение уравнения (1) [16]:

$$\Delta l_{сж}(t, l) = \sum_{i=1}^{\infty} q_i(t) r_i(l), \quad (2)$$

где $q_i(t)$ — функции времени t , $r_i(l)$ — функции координаты l , i — номер формы колебаний; при этом каждый член ряда должен удовлетворять граничным условиям задачи, а вся сумма — начальным условиям.

Подставим выражение (2) в (1) при условии удовлетворения уравнения для любого i :

$$\ddot{q}_i(t) r_i(l) + \frac{E}{\rho} [q_i(t) + \gamma \dot{q}_i(t)] r_i''(l) + \frac{F}{\rho S} = 0,$$

откуда получаем

$$\ddot{q}_i(t) + [q_i(t) + \gamma \dot{q}_i(t)] \frac{E r_i''(l)}{\rho r_i(l)} + \frac{F}{\rho S r_i(l)} = 0.$$

Разделив последнее уравнение на $[q_i(t) + \gamma \dot{q}_i(t)]$, получим

$$\frac{\ddot{q}_i(t) + F/\rho S r_i}{q_i(t) + \gamma \dot{q}_i(t)} = - \frac{E r_i''(l)}{\rho r_i(l)}. \quad (3)$$

Левая часть уравнения (3) зависит от t , а правая — от l . Для задачи выдвижения звена спицы достаточно рассмотреть только первую форму колебаний, так как она имеет наибольшее значение (примерно 97 %). Для выполнения равенства (3) необходимо, чтобы обе части уравнения равнялись одной и той же постоянной, обозначим ее $(-\lambda_1^2)$. Тогда из (3) следует

$$r_1''(l) - \lambda_1^2 \frac{\rho}{E} r_1(l) = 0, \quad (4)$$

$$\ddot{q}_1(t) - \lambda_1^2 [q_1(t) + \gamma \dot{q}_1(t)] + \frac{F}{\rho S r_1} = 0. \quad (5)$$

Уравнение (4) не зависит от коэффициента γ и, в частности, не изменяется в случае идеально упругой системы, когда $\gamma = 0$. Проинтегрируем уравнение (4):

$$r_1(l) = G_1 \sin(\lambda_1 l \sqrt{\rho/E}) + Q_1 \cos(\lambda_1 l \sqrt{\rho/E}).$$

Соотношение между постоянными G_1 и Q_1 и значение λ_1 определяются из граничных условий, согласно которым спица одним концом жестко закреплена за силовой каркас рефлектора, а правый конец в каждый момент времени остается свободным. Тогда граничные условия записываются в виде: $r_1(0) = 0$ и $\frac{\partial r_1}{\partial l}(l_f) = 0$. Получим $Q_1 = 0$, $\cos(\lambda_1 l_f \sqrt{\rho/E}) = 0$. Следовательно, собственная частота колебаний определяется как $\lambda_1 l_f \sqrt{\rho/E} = \pi/2$, $\lambda_1 = \frac{\pi}{2l_f} \sqrt{E/\rho}$.

Тогда

$$r_1(l) = G_1 \sin(\lambda_1 l \sqrt{\rho/E}) = G_1 \sin\left(\frac{l\pi}{2l_f}\right), \quad r_1(l_f) = G_1,$$

где значение коэффициента G_1 определяется при действующей на систему нагрузке.

Решение уравнения (5) можно получить численными методами интегрирования:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_1(t) &= V_q, \\ \dot{V}_q &= -\left(q_1 + \gamma V_q\right) \frac{E r_1''}{\rho r_1} - \frac{F}{\rho S r_1}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Второе уравнение системы (6) с учетом $\frac{r_1''(l)}{r_1(l)} = \lambda_1^2 \frac{\rho}{E} = \frac{\pi^2}{4l_f^2}$ примет вид

$$\dot{V}_q = -\left(q_1 + \gamma V_q\right) \frac{E \pi^2}{\rho 4l_f^2} - \frac{F}{\rho S r_1}.$$

Таким образом, система дифференциальных уравнений для определения положения спицы имеет следующий вид:

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

где $\mathbf{X} = (l, V, q_1, V_q)^T$ — вектор состояния процесса выдвигения спицы, u — вектор управления.

В поэлементном виде система может быть представлена следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{l} &= V; \\ \dot{V} &= \frac{F(U, l, V)}{m}; \\ \dot{q}_1 &= V_q, \\ \dot{V}_q &= -\left(q_1 + \gamma V_q\right) \frac{E \pi^2}{\rho 4l_f^2} - \frac{F(U, l, V)}{\rho S r_1}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Примем, что функцию управления выполняет напряжение питания U , $|U| \leq U_{\max}$ ($U_{\max} = 12,5$ В), и будем изменять его значение для достижения конечной длины выдвигения. Величина U входит в общее уравнение силы F через полезную силу $F_{\Pi} = k_f A U \sin \vartheta$.

Требуется перевести систему (7) из начального состояния $\mathbf{X}(0)$ в конечное $\mathbf{X}(t_f)$ при минимизации сжатия спицы $\Delta l_{\text{сж}}$ и конечных значениях скорости выдвигения V при ограничении на U за конечное время t_f и отсутствии возмущений.

Синтез алгоритма управления. Построение устойчивых алгоритмов поиска оптимальной траектории в реальном масштабе времени затруднено, а зачастую невозможно, так как сложно обеспечить сходимость решения возникающих двухточечных краевых задач при использовании принципа максимума [17]. Поэтому требуется разработать методику и алгоритмы, которые позволят получить надежное решение задачи оптимизации выдвигания звена спицы в реальном времени.

Одним из возможных подходов к решению задачи синтеза оптимального управления является алгоритм оптимизации движения с коррекцией параметров структуры управления [9, 11—15, 17]. Однако для этого алгоритма характерны особенности, определяемые выбранной структурой управления.

В данной статье для обеспечения малых значений производной от l по t в конечный момент времени t_f с учетом минимизации сжатия спицы $\Delta l_{\text{сж}}$ и соблюдения терминальных условий по точности исследуем задачу выдвигания спицы при наличии полных данных и отсутствии возмущений с использованием алгоритма последовательной оптимизации по иерархии из двух критериев [9].

Рассмотрим расширенную систему $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, u, t)$, добавив к (7) уравнение $\dot{U} = u$. Положим $Y = U$, $x = (\mathbf{X}^T \ Y)^T = (l, V, q_1, V_q, U)^T$, $f = (F^T, u)^T$.

Для управления системой выдвигания звена спицы с обеспечением конечных условий для величины l при малых конечных значениях ее производной целесообразно использовать упрощенный вариант алгоритма, обеспечивающий минимизацию критериев

$$\left. \begin{aligned} J_1 &= \mathbf{V}_{f1}(\mathbf{X}, t_f); \\ J_2 &= \mathbf{V}_{f2}(\mathbf{X}, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [f_0(\mathbf{X}, t) + 0,5(u^2 + u_0^2)^2 k^{-2}] dt, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $\mathbf{V}_{f1} = 0,5\beta_2 [V(t_f) - V_f]^2$, $\mathbf{V}_{f2} = 0,5\Delta \mathbf{X}_f^T o_k \Delta \mathbf{X}_f$; $f_0 = 0,5\beta_1 [l(t) - l_f]^2 + 0,5\beta_3 \Delta l_{\text{сж}}^2(t)$; $o_k = \text{diag}(o_1, o_2, o_3, o_4)$, $\beta_1, \beta_2, \beta_3, k_1, k_2$ — заданные коэффициенты; $\Delta \mathbf{X}_f = \mathbf{X}(t_f) - \mathbf{X}_f$, $\mathbf{X}_f = (l_f \ V_f \ q_{1f} \ V_{qf})^T$ — заданные конечные значения соответствующих переменных.

Так как $\Delta l_{\text{сж}}(t, l) = q_1(t)r_1(l)$, $V_{\text{сж}}(t, l) = V_q(t)r_1(l)$, то $q_1(t) = \Delta l_{\text{сж}}(t, l)/r_1(l)$ и $q_1(t_f) = \Delta l_{\text{сж}}(t_f, L)/r_1(L)$. Функция управления вычисляется как $u = u_1 + u_2$, где u_1 и u_2 минимизируют критерии качества J_1 и J_2 соответственно. Здесь при рассмотрении второго уровня управление первого уровня считается реализованным. На первом уровне производится подстройка прогнозирующей модели, например, таким образом, чтобы можно было принять $u_1 = 0$, $U_m(t) = U(t) + \Delta U$.

Поскольку терминальная часть критериев (8) содержит требования не только к конечным значениям функций $l(t_f)$ и $\Delta l_{\text{сж}}(t_f)$, но и к их производным, то механизмы упора и фиксатора при оптимальном управлении выполняют только функции собственно фиксации спицы при достижении упора и не приводят к колебаниям в системе.

С учетом сделанных допущений гамильтониан системы (7) примет вид

$$H = p^T f(X_p) + f_0,$$

где $p = [p_l \ p_V \ p_q \ p_{V_q} \ p_U]^T$ — вектор сопряженных переменных, или

$$H = p_l V + p_V \frac{F}{m} + p_q V_q + p_{V_q} \left[- (q_1 + \gamma V_q) \frac{E \pi^2}{\rho 4l_f^2} - \frac{F}{\rho S r_1} \right] + \\ + p_U u + \frac{1}{2} \beta_1 (l - l_f)^2 + \frac{1}{2} \beta_3 \Delta l_{сж}^2 (t_f) + \frac{1}{2} \frac{u^2 + u_0^2}{k^2}.$$

Уравнения прогнозирующей модели имеют следующий вид:

$$\dot{l} = V; \\ \dot{V} = \frac{F_{\Pi}(U) - F_{\text{тр}}}{m}; \\ \dot{q}_1 = V_q; \\ \dot{V}_q = - (q_1 + \gamma V_q) \frac{E \pi^2}{\rho 4l_f^2} - \frac{F_{\Pi}(U) - F_{\text{тр}}}{\rho S r_1}, \\ \dot{U} = 0.$$

Для сопряженных переменных получаем

$$\dot{p}_l = -\beta_1 (l - l_f), \quad \dot{p}_V = -p_l, \quad \dot{p}_q = p_{V_q} \frac{E \pi^2}{\rho 4l_f^2} - \beta_3 q_1 r_1^2, \quad \dot{p}_{V_q} = -p_q + p_{V_q} \frac{E \pi^2}{\rho 4l_f^2} \gamma, \\ \dot{p}_U = \left(-p_V \frac{1}{m} + p_{V_q} \frac{1}{\rho S r_1} \right) \frac{\partial F_{\Pi}(U)}{\partial U}, \quad p_l(t_f) = o_1 [l(t_f) - l_f], \quad p_V(t_f) = o_2 [V(t_f) - V_f], \\ p_q(t_f) = o_3 [q_1(t_f) - q_f], \quad p_{V_q}(t_f) = o_4 [V_q(t_f) - V_{qf}], \quad p_U(t_f) = 0;$$

здесь $\frac{\partial F_{\Pi}(U)}{\partial U} = k_f A \sin \vartheta$.

Величина ΔU выбирается путем итераций из условия $V_{f1} = 0$ с точностью до малого значения $\sigma > 0$ с помощью интегрирования уравнений модели первого уровня на интервале $[t, t_f]$. В данном случае с учетом выражения $F_{\Pi} = k_f A U \sin \vartheta$, пренебрегая в прогнозирующей модели силой трения, можно определить необходимую для минимизации первого критерия функцию управления в модели из второго уравнения системы (7): $u_{\text{mod}} = [V_f - V(t)] / (t_f - t) / B_d$, где $B_d = k_f A \sin \vartheta / m$.

Для определения u_2 требуется найти функцию p_{2U} согласно [9]. Тогда в двухуровневой задаче управления получаем $u = u_1 + u_2$, $u_1 = (u_a \ 0)^T$, $u_2 = (u_b \ u_t)^T$, $\dot{t}_f = u_t = -k_t^2 p_t$, где u_a , u_b , u_t — соответствующие функции управления, k_t — заданный коэффициент, $p_t = H(x, p, u, t)|_{t_f}$, т.е. управление конечным моментом времени формируется на втором уровне.

Результаты расчетов. Звено спицы выдвигается из начального положения при $l_0 = 0$ и фиксируется при достижении заданной длины l_f . Спица в начальном положении находится в состоянии покоя, соответственно линейная скорость $V_0 = 0$, сжатие $\Delta l_{сж0} = 0$ и скорость сжатия $V_{сж0} = 0$; конечные значения: $V_f = 0$, $\Delta l_{сжf} = 0$ и $V_{сжf} = 0$. Примем первоначальное время выдвижения $t_f = 60$ с, максимально допустимую амплитуду сжатия $\Delta l_{сж\text{max}} = 10$ мм;

также примем $\gamma = 0,04$ с, $\kappa = 2$, $\iota = 2$, $\varepsilon = 2,5$ В, $X_c = 22 \cdot 10^{-3}$ Ом, $\vartheta = \pi/10$ при любой нагрузке, $\lambda_1 = 4157$ Гц.

Конструктивно спица имеет вид цилиндрической трубы. При моделировании были выбраны следующие ее параметры: материал АБС пластик QHF — 0140, $\rho = 1600$ кг/м³, $E = 1,2 \cdot 10^{11}$ Па, $l_f = 9,75$ м, $m = 32$ кг (масса всех вложенных звеньев).

Численное моделирование перевода системы из начального состояния $x(0) = (0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ в конечное $x(t_f) = (l_f \ 0 \ 0 \ 0)^T$ при отсутствии перерегулирования по длине выдвижения l за время $t_f = 60$ с проводилось методом Эйлера с шагом $\Delta t = 0,00001$ с. Расчеты показали, что при значениях параметров критерия J_2 : $\alpha_1 = 15$, $\alpha_2 = 1$, $\alpha_3 = 0$, $\alpha_4 = 0$, $\beta_1 = 0$, $\beta_3 = 0$, $k^2 = 0,1$ — алгоритм успешно решает поставленную задачу. При этом за счет управления конечным моментом времени конечное время выдвижения уменьшается до $t_f = 49,5$ с. Графики зависимостей $l(t)$ и $V(t)$ представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

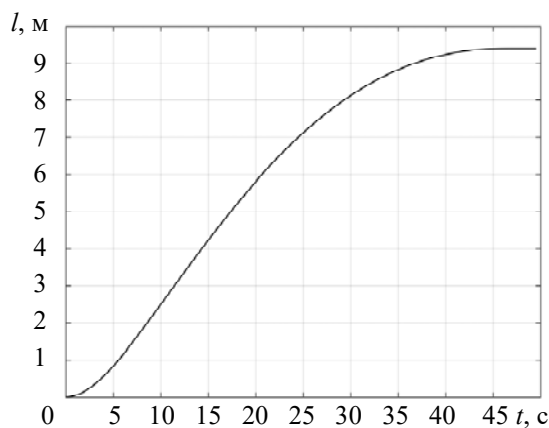


Рис. 2

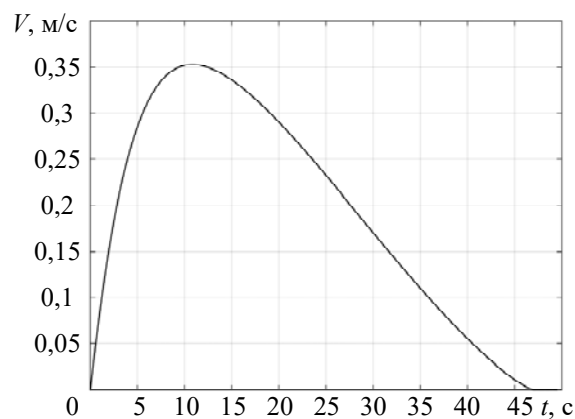


Рис. 3

Конечное значение $l(t_f) = 9,74986$ м отличается от заданного на $0,00014$ м. Линейная скорость выдвижения звена спицы не превышает $0,36$ м/с, а в конечный момент $V(t_f) = 2,836 \cdot 10^{-6}$ м/с (практически равна заданному значению), что характерно для исследуемого алгоритма. На рис. 4 приведен график $\Delta l_{сж}(t)$ на начальном участке, а на рис. 5 — график $U(t)$. Максимальное сжатие $\Delta l_{сж \max} = -2,45 \cdot 10^{-8}$ м возникает в начале процесса, когда существенно возрастает управление, а в конечный момент $\Delta l_{сж}(t_f) = -10^{-14}$ м. При $\beta_1 = 3$ кривая $l(t)$ приближается к заданному значению $l_f = 9,75$ м с минимальной погрешностью.

Особенность траекторий $l(t)$ — достижение заданного конечного значения с малыми по абсолютной величине производными. Максимальное значение $U(t)$ составляет $5,17$ В, в конечный момент — $0,05$ В, что существенно ниже соответствующего значения при использовании алгоритма коррекции параметров структуры управления [14, 15]. При $\beta_3 = 1$ конечное сжатие $\Delta l_{сж}(t_f) = -10^{-14}$ м. Как видно, для выдвижения отдельного звена длиной $9,75$ м алгоритм „стремится“ уменьшить и без того небольшое значение $\Delta l_{сж}(t_f)$. Величина сжатия незначительно зависит от длины спицы при совместном выдвижении трех звеньев составной спицы с общей длиной 29 м. Исследования показали, что применение другого мате-

риала в большей степени влияет на $\Delta l_{\text{сж}}$ [1]. Использование алгоритма позволяет успешно производить выдвижение звена спицы и за более короткое время, однако для этого необходимо увеличить коэффициент α_1 : так, $t_f=40$ с соответствует $\alpha_1=23$, $t_f=35$ с соответствует $\alpha_1=35$. При этом формируется алгоритм управления, приводящий к $U(t) > U_{\text{max}}$, в результате появляется участок, где $U(\tau) = U_{\text{max}}$: при $t_f=35$ с и $\tau \in (0, 0,25]$.

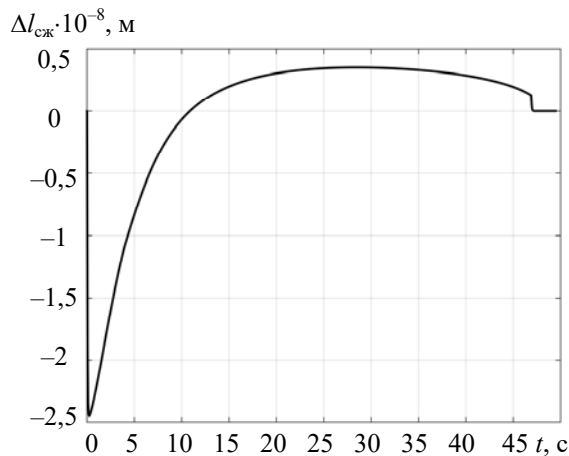


Рис. 4

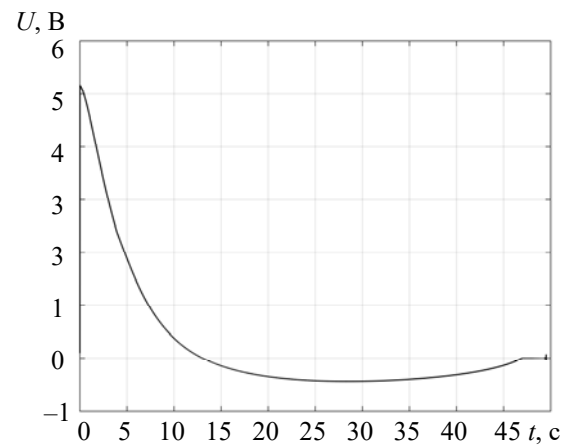


Рис. 5

Преимущество алгоритма последовательной оптимизации заключается в возможности получения позиционного решения, позволяющего реализовать управление в реальном времени динамики процесса вплоть до конечного момента t_f при таких условиях достижения конечного положения, которые позволяют „мягко“ использовать упоры и фиксаторы, исключая длительные колебания антенны, увеличивающие время ее выхода в рабочее состояние.

Если рассматривать оптимизацию только по второму критерию (8), то приходим к алгоритму с прогнозирующей моделью [9, 17]. В этом случае реализация алгоритма при $\alpha_1=10$, $\alpha_2=1$, $\alpha_3=0$, $\alpha_4=0$, $\beta_1=0$, $\beta_3=0$, $k_2=0,1$ приводит к следующим результатам: $l(t_f)=9,7492$, $V(t_f)=1,73 \cdot 10^{-5}$ м/с, $\Delta l_{\text{сж}}(t_f)=1,71 \cdot 10^{-13}$ м.

Заключение. Разработан алгоритм последовательной оптимизации управления автоматическим выдвижением звена спицы крупногабаритного трансформируемого рефлектора. С помощью алгоритма удалось добиться необходимой точности и качества регулирования — обеспечен плавный выход на механизмы упора и фиксатора без колебаний. Алгоритм может быть реализован непосредственно в процессе выдвижения звена. Применение данного алгоритма позволяет сократить общее время перехода рефлектора в заданное положение.

Развитие полученного решения, по мнению авторов, заключается в применении его к системам при действии возмущений, поскольку алгоритм позволяет изменять управление на всем отрезке регулирования, обеспечивая плавное выдвижение звена спицы к заданному положению.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hongjian W., Qiyan H., Min Y. et al. Multi-frequency dual polarisation radiometer common aperture antenna feeding system // IET Microwaves Antennas & Propagation. 2018. Vol. 12, N 11. P. 1765—1770.
2. 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. P. 148—153.

3. Puig L., Barton A., Rando N. A review on large deployable structures for astrophysics missions // Acta Astronautica. 2010. Vol. 67. P. 12—26.
4. Santiago-Prowald J., Baier H. Advances in deployable structures and surfaces for large apertures in space // CEAS Space Journal. 2013. Vol. 5. P. 89—115.
5. 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. P. 271—282.
6. 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, N 15. P. 2390—2394.
7. 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.
8. 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.
9. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб: Изд-во СПбГУ, 1997. 200 с.
10. Кабанов С. А., Никулин Е. Н., Якушев Б. Э., Якушева Д. Б. Оптимальное управление перемещением груза мостовым краном // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 5. С. 56—65.
11. Малышев В. В., Кабанов Д. С. Алгоритм коррекции структуры управления автоматическим подводным аппаратом для построения области достижимости // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 7. С. 21—27.
12. Кабанов Д. С. Синтез алгоритма оптимального программно-позиционного управления многорежимным автоматическим подводным аппаратом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. С. 60—66.
13. Кабанов С. А., Кабанов Д. С. Задачи управления с оптимизацией параметров прогнозирующих моделей. СПб: БГТУ, 2017. 110 с.
14. Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimization of the stages of deploying a large-sized space-based reflector // Acta Astronautica. 2020. Vol. 176. P. 717—724.
15. 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.
16. Пановко Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях. М.: Физматгиз, 1960. 193 с.
17. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.

Сведения об авторах

Дмитрий Сергеевич Кабанов

— канд. техн. наук; БГТУ „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, научно-исследовательская лаборатория радиоэлектронных информационных управляющих систем; научный сотрудник;
E-mail: kabanovds@mail.ru

Евгений Николаевич Никулин

— д-р техн. наук, профессор; БГТУ „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра средств поражения и боеприпасов;
E-mail: nikulin_en@voenmeh.ru

Поступила в редакцию
29.11.2020 г.

Ссылка для цитирования: Кабанов Д. С., Никулин Е. Н. Алгоритм последовательной оптимизации этапа выдвигания спиц крупногабаритного трансформируемого рефлектора // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 3. С. 192—201.

ALGORITHM FOR SEQUENTIAL OPTIMIZATION OF THE STAGE OF EXTENDING THE SPOKES OF A LARGE-SIZED TRANSFORMABLE REFLECTOR**D. S. Kabanov, E. N. Nikulin***D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, 190005, St. Petersburg, Russia
E-mail: nikulin_en@voenmeh.ru*

The process of spokes extension of a large-sized space-based reflector is considered with the account for compression oscillations. An improved mathematical model of the spokes extension is proposed, which includes mechanisms of the stop and the lock of longitudinal vibrations. The model makes it possible to explore the system vibrations at any point of the spoke during the simulation. An algorithm for sequential optimization of the control of automatic extension of antenna elements has been developed, which allows minimizing system oscillations and fulfilling terminal conditions with high accuracy. Results of numerical simulation are presented, showing the advantage of the proposed algorithm in comparison with classical control methods.

Keywords: sequential optimization algorithm, large-size transformable reflector, mathematical model, translational motion, simulation

REFERENCES

1. Hongjian W., Qiyang H., Min Y. et al. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2018, no. 11(12), pp. 1765–1770.
2. Siriguleng B., Zhang W., Liu T., Liu Y.Z. *Engineering Structures*, 2020, vol. 207, pp. 148–153.
3. Puig L., Barton A., Rando N. *Acta Astronautica*, 2010, vol. 67, pp. 12–26.
4. Santiago-Prowald J., Baier H. *CEAS Space Journal*, 2013, vol. 5, pp. 89–115.
5. Dewalque P., Collette J.-P., Bruls O. *Acta Astronautica*, 2016, vol. 123, pp. 271–282.
6. Ramachandran S., Neve M.J., Sowerby K.W. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2018, no. 15(12), pp. 2390–2394.
7. Kabanov S.A., Zimin B.A., Mitin F.V. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, no. 1(20), pp. 51–64. (in Russ.)
8. Kabanov S.A., Zimin B.A., Mitin F.V. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, no. 2(21), pp. 117–128. (in Russ.)
9. Kabanov S.A. *Upravlenie sistemami na prognoziryuyushchih modelyah* (Control Systems Based on Predictive Model), St. Petersburg, 1997, 200 p. (in Russ)
10. Kabanov S.A., Nikulin E.N., Yakushev B.E., Yakusheva D.B. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 5(54), pp. 56–65. (in Russ.)
11. Malushev V.V., Kabanov D.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, no. 7(55), pp. 21–27. (in Russ)
12. Kabanov D.S. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 1, pp. 60–66. (in Russ)
13. Kabanov S.A., Kabanov D.S. *Zadachi upravleniya s optimizaciej parametrov prognoziryuyushchih modelej* (Control Tasks with Optimization of Predictive Model Parameters), St. Petersburg, 2017, 110 p. (In Russ).
14. Kabanov S.A., Mitin F.V. *Acta Astronautica*, 2020, vol. 176, pp. 717–724.
15. Kabanov S.A., Mitin F.V. *Izv.RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2021, no. 2, pp. 106–125. (in Russ).
16. Panovko Y.G. *Vnutrennee trenie pri kolebaniyah* (The internal friction at vibrations), Moscow, 1960, 193 p. (in Russ)
17. Krasovskij A.A., ed., *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* (Handbook on the Theory of Automatic Control), Moscow, 1987, 712 p. (in Russ)

Data on authors

- Dmitry S. Kabanov** — PhD; D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, Research Laboratory of Radio-Electronic Information Control Systems, Researcher; E-mail: kabanovds@mail.ru
- Evgeny N. Nikulin** — Dr. Sci., Professor; D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, Department of Weapons and Ammunition; E-mail: nikulin_en@voenmeh.ru

For citation: Kabanov D. S., Nikulin E. N. Algorithm for sequential optimization of the stage of extending the spokes of a large-sized transformable reflector. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 3. P. 192–201 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-3-192-201