

ФОРМИРОВАНИЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА УПРАВЛЕНИЯ

Х. Лу^{1,2}

Ч. Ван²

Ю.М. Заболотнов¹

luhspeter@yandex.ru

wangcq@nwpu.edu.cn

yumz@yandex.ru

¹ Самарский университет, г. Самара, Российская Федерация

² Северо-Западный политехнический университет,
г. Сиань, Шэньси, КНР

Аннотация

Рассмотрен процесс перевода во вращение с заданной угловой скоростью электродинамической космической тросовой системы, находящейся на околоземной орбите. Тросовая система представляет собой линейную группировку трех микроспутников, связанных изолированными тросами, проводящими ток. В исходном состоянии система находится вблизи вертикали в режиме гравитационной стабилизации. Система переводится во вращение с помощью электромагнитных сил, возникающих при взаимодействии проводящих ток тросов с магнитным полем Земли. Уравнения движения системы записаны в геоцентрической неподвижной системе координат с учетом распределенной нагрузки от гравитационных и электромагнитных сил. Система движется на достаточно высокой почти круговой орбите, поэтому аэродинамические силы не учитываются. Деформация тросов, которые в рассматриваемой модели представляют собой совокупность материальных точек, связанных упругими односторонними связями, уменьшается регулированием тока. Предложен регулятор тока с обратной связью на основе метода скользящего режима управления. Переменные системы принадлежат поверхности, перемещение по которой обеспечивает асимптотическую устойчивость процесса регулирования. При синтезе параметров регулятора использована упрощенная модель движения системы. Проанализировано угловое движение микроспутников относительно направления тросов в процессе

Ключевые слова

Тросовая группировка микроспутников, проводящие ток тросы, перевод системы во вращение, регулятор тока, скользящий режим управления

перевода системы во вращение. Эффективность
рассматриваемого подхода к формированию вра- Поступила 30.04.2021
щающейся космической тросовой системы под- Принята 19.10.2021
тверждена численными примерами © Автор(ы), 2022

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
и Государственного фонда естественных наук КНР в рамках
научных проектов № 21-51-53002 и № 61803307*

Введение. В последние годы электродинамические тросовые системы (ЭДТС) рассматриваются как перспективные для решения многих задач в космосе. Использование ЭДТС на околоземной орбите и вблизи других небесных тел, имеющих магнитное поле, открывает новые возможности при управлении космическими аппаратами (КА) и системами. Электродинамические тросовые системы могут функционировать в двух режимах: генерации электроэнергии и создания тяги. На основе ЭДТС существует возможность разработки экономичных методов управления космическими системами, в частности тросовыми группировками КА. Теоретические исследования динамики ЭДТС начаты еще в 1980-е гг. [1, 2]. В 1995 г. эксперимент OEDIPUS-C на орбите подтвердил возможность применения вращающихся ЭДТС [3]. В настоящее время активные теоретические исследования и космические миссии с ЭДТС дают плодотворные результаты. Основное внимание в исследованиях уделяется использованию ЭДТС для удаления космического мусора [4], изменения параметров орбиты [5], транспортировки полезной нагрузки [6] и других целей [7]. Многие страны разработали и осуществили космические миссии с ЭДТС, в том числе серий TSS, SED в США и Италии, миссий KITE, T-REX и STAR в Японии, эксперимент OEDIPUS в Канаде, космические эксперименты MAST, PMG, ATEch, TPECE в США [3, 8]. В этих экспериментах изучались и проверялись предположения, описанные в теоретических исследованиях. Применению ЭДТС также уделяется внимание и в РФ [9, 10]. Электродинамические космические тросовые группировки считаются хорошей платформой для таких приложений, как наблюдение, искусственная гравитация, использование космических станций [3, 11–13].

До настоящего времени основное внимание уделялось ЭДТС, движущимся вблизи вертикали в режиме, близком к режиму гравитационной стабилизации. Движение ЭДТС вблизи вертикали при постоянном токе неустойчиво [2], что приводит к провисанию тросов и требует применения специальных алгоритмов стабилизации [14]. Этот недостаток отсутствует у вращающихся ЭДТС, в которых натяжение тросов обеспечивается центробежными силами [15, 16]. В этом случае необходимо рассмотреть про-

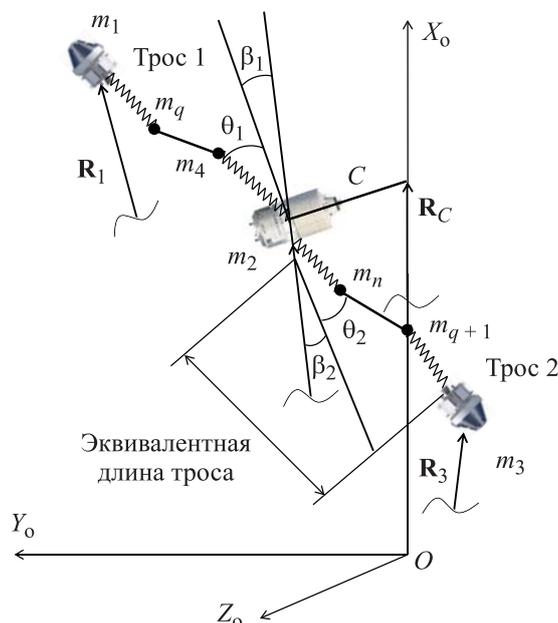
цесс перевода ЭДТС во вращение. Процесс перевода ЭДТС во вращение с помощью электромагнитных сил мало изучен, в частности при больших отклонениях линейной группировки микроспутников от вертикали в положении системы, близком к горизонтальному, и действии распределенных электромагнитных сил, при которых возможны ослабления и провисания тросов. Все это приводит к потере управляемости. Поэтому основная задача настоящей работы — управление током в процессе перехода системы во вращение с целью уменьшить изгиб тросов, т. е. сделать процесс формирования вращающейся ЭДТС более безопасным.

Для описания движения линейной тросовой группировки микроспутников используются уравнения, записанные в неподвижной геоцентрической системе координат. В этом случае тросы представляют как множество материальных точек, связанных между собой односторонними упругими связями. Такое описание движения тросов позволяет изучить их динамику как динамику распределенной системы и оценить их форму и натяжение в процессе перевода системы во вращение. Для определения движения микроспутников относительно своих центров масс и, следовательно, их углового движения относительно направления тросов используются уравнения Эйлера. Для уменьшения изгибных колебаний тросов предлагается использовать регулятор, построенный в соответствии со скользящим режимом управления. Скользящий режим управления предполагает перемещение переменных системы по заданной поверхности, при этом асимптотическая устойчивость процесса регулирования доказывается с помощью второго метода Ляпунова, анализируются угловые колебания микроспутников относительно направления тросов, амплитуды которых должны быть ограничены. Эффективность предлагаемого способа управления подтверждается численными примерами с использованием наиболее полной модели движения системы.

Уравнения движения тросовой системы. Для построения математической модели движения тросовой системы используются уравнения Ньютона. Учитываются электродинамические, гравитационные силы, силы натяжения и трения между волокнами троса. Принципиальная схема тросовой системы приведена на рис. 1. В этом случае пространственное движение ЭДТС описывается уравнением вида [15, 16]:

$$m_k \frac{d^2 \mathbf{R}_k}{dt^2} = \mathbf{G}_k + \mathbf{T}'_k + \mathbf{D}'_k + \mathbf{F}_k, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где \mathbf{R}_k , m_k — радиус-вектор и масса k -й материальной точки; \mathbf{G}_k — гравитационные силы; \mathbf{T}'_k , \mathbf{D}'_k — векторная сумма сил натяжения и трения,


Рис. 1. Схема тросовой системы:

m_1, m_2, m_3 — массы микроспутников; m_4, \dots, q и m_{q+1}, \dots, n — массы точек тросов 1 и 2;
 C — центр масс системы

действующих на k -ю материальную точку; \mathbf{F}_k — электродинамические силы (силы Ампера). Уравнение (1) записывается в абсолютной прямоугольной системе координат, связанной с центром масс притягивающего центра, причем микроспутники рассматриваются как материальные точки. Положения тросов определяются относительно орбитальной подвижной правой системы координат $OX_0Y_0Z_0$ (см. рис. 1), у которой ось OX_0 направлена по радиус-вектору \mathbf{R}_C центра масс системы, ось OY_0 — в орбитальной плоскости по направлению движения центра масс. Расстояния $r_{1,2}$ между спутниками называются эквивалентными длинами (размерами спутников пренебрегают по сравнению с длиной тросов), которые можно рассматривать как меру деформации тросов, имея в виду, что под действием распределенных электромагнитных сил подразумеваются изгибные колебания тросов [1, 14]. В монографии [2] и численных расчетах по модели, аналогичной (1) [14], показано, что если масса тросов много меньше массы спутников, то форма тросов близка к дуге окружности некоторого радиуса. При этом положения векторов, соединяющих центры масс спутников (эквивалентных длин), относительно системы координат $OX_0Y_0Z_0$ определяются углами $\theta_{1,2}$ и $\beta_{1,2}$ (см. рис. 1), где $\theta_{1,2}$ отсчитываются от вертикали в плоскости орбиты, $\beta_{1,2}$ определяют колебания тросов ортогонально

плоскости орбиты. Гравитационные силы вычисляются по закону Ньютона, а силы натяжения — по закону Гука, причем реализуется односторонняя механическая связь, т. е. сила натяжения между точками равна нулю, если расстояние между ними меньше недеформированной длины прямолинейного участка троса [14]. Силы трения вычисляются в соответствии с методикой, предложенной в [2], и представляют собой модель диссипации энергии при циклическом нагружении троса.

Электромагнитную силу $\Delta \mathbf{F}_k$, действующую на k -й участок троса, можно записать так:

$$\Delta \mathbf{F}_k = I \left| \mathbf{R}_{k+1} - \mathbf{R}_k \right| \left(\boldsymbol{\tau}_k \times \mathbf{B}_k \right), \quad (2)$$

где I — ток; $\boldsymbol{\tau}_k = \left(\mathbf{R}_{k+1} - \mathbf{R}_k \right) / \left| \mathbf{R}_{k+1} - \mathbf{R}_k \right|$ — единичный вектор участка троса; \mathbf{B}_k — вектор магнитной индукции в средней точке участка; Силы (2) распределяются по точкам системы следующим образом [15, 16]:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1 &= \frac{\Delta \mathbf{F}_1}{2}; \quad \mathbf{F}_2 = \frac{\Delta \mathbf{F}_4 + \Delta \mathbf{F}_{n-1}}{2}; \quad \mathbf{F}_3 = \frac{\Delta \mathbf{F}_3}{2}; \\ \mathbf{F}_k &= \frac{1}{2} \left(\Delta \mathbf{F}_{k-1} + \Delta \mathbf{F}_k \right), \quad k = 4, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (3)$$

При определении вектора магнитной индукции предполагается, что магнитное поле Земли — это магнитный диполь, который имеет наклон $i_d = 11^\circ 34'$ относительно оси вращения Земли [2].

Движение микроспутников относительно своих центров масс. Анализ углового движения микроспутников будем рассматривать только с учетом моментов от сил натяжения тросов, т. е. гравитационные моменты и другие малые возмущения рассматриваться не будут. Движение микроспутников относительно своих центров масс описывается с помощью классических динамических и кинематических уравнений Эйлера [17]:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\omega}}_k &= \mathbf{J}_k^{-1} \left(\mathbf{M}_k - \boldsymbol{\omega}_k \times \mathbf{J}_k \right); \\ \dot{\alpha}_k &= \omega_{zk} \cos \varphi_k + \omega_{yk} \sin \varphi_k + \Delta \dot{\alpha}_k; \\ \dot{\psi}_k &= \left(\omega_{zk} \sin \varphi_k - \omega_{yk} \cos \varphi_k \right) / \sin \alpha_k + \Delta \dot{\psi}_k; \\ \dot{\varphi}_k &= \omega_{xk} - \dot{\psi}_k \cos \alpha_k + \Delta \dot{\varphi}_k, \end{aligned} \quad (4)$$

где \mathbf{J}_k — диагональные тензоры инерции микроспутников (динамические уравнения Эйлера записаны в главных центральных связанных системах координат $c_k x_k y_k z_k$), $k = 1, 2, 3$ — номер спутника; \mathbf{M}_k — векторная сумма моментов сил относительно центра масс, действующих на спутники; $\boldsymbol{\omega}_k$ — векторы угловых скоростей; $\alpha_k, \dot{\psi}_k, \varphi_k$ — углы Эйлера (нутации,

прецессии и собственного вращения), определенные относительно направления тросов; $\Delta\dot{\alpha}_k, \Delta\dot{\psi}_k$ — поправки к производным углов за счет вращения тросов, относительно которых рассчитываются углы Эйлера [17]. Здесь угловое положение центрального спутника определяется относительно троса длиной l_2 .

Моменты от сил натяжения тросов можно записать в виде

$$\mathbf{M}_1 = \Delta \mathbf{r}_{12} \times \mathbf{T}_{12}; \quad \mathbf{M}_2 = \Delta \mathbf{r}_{21} \times \mathbf{T}_{21} + \Delta \mathbf{r}_{23} \times \mathbf{T}_{23}; \quad \mathbf{M}_3 = \Delta \mathbf{r}_{32} \times \mathbf{T}_{32}, \quad (5)$$

где $\Delta \mathbf{r}_{12}, \Delta \mathbf{r}_{21}, \Delta \mathbf{r}_{23}, \Delta \mathbf{r}_{32}$ — радиус-векторы точек крепления тросов относительно центра масс каждого спутника; $\mathbf{T}_{12}, \mathbf{T}_{21}, \mathbf{T}_{23}, \mathbf{T}_{32}$ — силы натяжения на участках троса, прилегающих к микроспутникам.

Номинальная программа управления при переводе системы во вращение. Для перевода ЭДТС во вращение используется релейная программа управления током:

$$I = \begin{cases} I_{\max}, & \dot{\theta} < \dot{\theta}_f; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (6)$$

где I_{\max} — максимально допустимый ток; $\dot{\theta}_f$ — желаемая угловая скорость вращения тросов.

Движение ЭДТС при использовании номинальной программы управления можно определить, применяя модель движения, полученную в работе [17] методом Лагранжа, в которой рассматривалось формирование тросовой группировки из трех спутников (без использования проводящих ток тросов), расположенных вблизи местной вертикали (режим гравитационной стабилизации). Такая модель дополняется моментами от электромагнитных сил, действующих на тросы, проводящие ток. В модели, полученной методом Лагранжа, тросы считаются прямолинейными и невесомыми.

Алгоритм регулирования. Система регулирования предназначена для уменьшения амплитуд изгибных колебаний троса при переводе ЭДТС во вращение. Предлагаемый регулятор (структура которого одинакова для обоих тросов) для определения поправок к номинальному току имеет следующий вид:

$$u = J_s (-c_1 e_{\dot{r}} - c_2 e_{\dot{\theta}} + \ddot{\theta}_d - \eta \operatorname{sgn} s). \quad (7)$$

Здесь $c_1 e_{\dot{r}} + c_2 e_{\dot{\theta}} + e_{\theta} = s$ — поверхность скольжения, c_i ($i = 1, 2$) и η — коэффициенты управления; $e_r = r_d - r$; $e_{\dot{r}} = \dot{r}_d - \dot{r}$; $e_{\theta} = \theta - \theta_d$, $e_{\dot{\theta}} = \dot{\theta} - \dot{\theta}_d$ (r — эквивалентная длина троса, r_d и θ_d — длина троса и угол θ , соответ-

ствующие номинальной программе управления). Коэффициент J_S определяется из уравнений Лагранжа [17] в частном плоском случае, когда $m_1 = m_2 = m_3 = m$ и ток в тросах изменяется в соответствии с программой (6). В этом частном случае уравнения для углов $\theta_{1,2}$ одинаковы и имеют вид:

$$\ddot{\theta} = (I + u) / J_S, \tag{8}$$

где $J_S = 2m / B_0$, $B_0 = \mu_m / R_C^3$ — модуль вектора магнитной индукции, определенный на магнитном экваторе, μ_m — магнитный момент земного диполя, при этом $\ddot{\theta}_d = I / J_S$.

Доказательство устойчивости процесса регулирования в силу возмущенной системы (8) проводится с помощью функции Ляпунова вида

$$V = s^2 / 2. \tag{9}$$

Производная функции (9) определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s(c_1 e_{\dot{\theta}} + c_2 e_{\ddot{\theta}} + \ddot{\theta} - \ddot{\theta}_d) = \\ &= s(c_1 e_{\dot{\theta}} + c_2 e_{\ddot{\theta}} - \ddot{\theta}_d + (-e_{\dot{\theta}} - c_2 e_{\ddot{\theta}} + \ddot{\theta}_d - \eta \operatorname{sgn} s)) = -\eta |s| \leq 0, \end{aligned} \tag{10}$$

откуда следует асимптотическая устойчивость процесса регулирования при использовании уравнения (8). Проведенный упрощенный анализ устойчивости процесса регулирования далее подтверждается с помощью математического моделирования по уравнениям движения (1) с учетом действия распределенных электромагнитных сил.

Исходные данные для моделирования. Предполагается, что в начальном состоянии тросовая система расположена вдоль местной вертикали и плоскость круговой орбиты центра масс системы совпадает с экваториальной плоскостью. Массы m_1, m_3 концевых спутников одинаковы. Микроспутники представляют собой однородные сферы радиусом 0,2 м, центральный спутник — прямоугольный параллелепипед $0,5 \times 0,5 \times 1$ м.

Исходные данные для моделирования движения ЭДТС

Эксцентриситет и высота орбиты, км	0 и 500
Массы $m_1, m_2, m_3, m_{t1}, m_{t2}$ спутников	
и тросов, кг	10; 60; 10; 1,62; 1,62
Коэффициенты трения	0,005
Модуль упругости Юнга, Па	$1,3 \cdot 10^{12}$
Длина тросов, км	1,0
Диаметр тросов, мм	0,87
Число отрезков троса	4

Длина каждого отрезка, м	4,25
Ток, А:	
для номинальной программы управления	2
максимально доступный в процессе	
регулирования троса I_{\max}	3
Одинаковые для всех спутников	
начальные углы Эйлера $\alpha_0, \psi_0, \varphi_0$, рад	0,3; -0,1; 0,1
начальные угловые скорости $\omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0}$, рад /с	0,01; -0,03; 0,05

Движения тросовой системы при использовании номинальной программы управления. Параметры, характеризующие процесс перевода ЭДТС во вращение, определенные по упрощенной модели, приведены на рис. 2, характеристики углового движения микроспутников — на рис. 3. Упрощенная модель при использовании номинальной программы управления имеет вид (1), но как материальные точки учитываются только микроспутники массами m_1, m_3 , а точки массами $m_4, 5, \dots, q, m_{q+1}, q+2, \dots, n$ на тросах не учитываются. В этой модели тросы рассматриваются как безмассовые жесткие стержни. Кривые, характеризующие движения тросов при равных начальных условиях, совпадают (см. рис. 2), совпадают также зависимости, характеризующие угловое движение микроспутников массы m_1, m_3 (рис. 3).

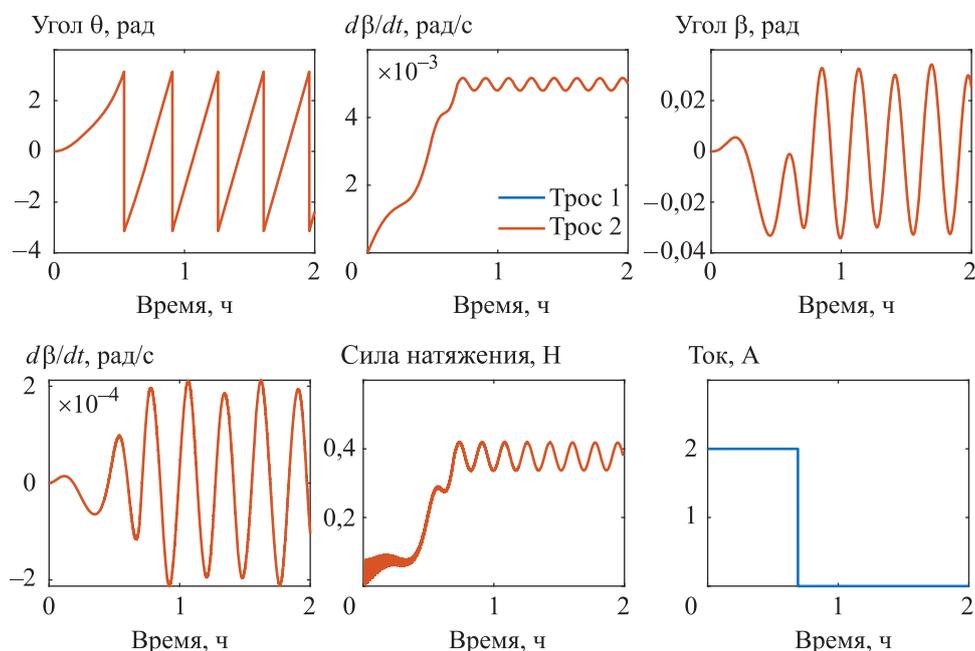


Рис. 2. Параметры, характеризующие процесс перевода ЭДТС во вращение при использовании номинальной программы управления

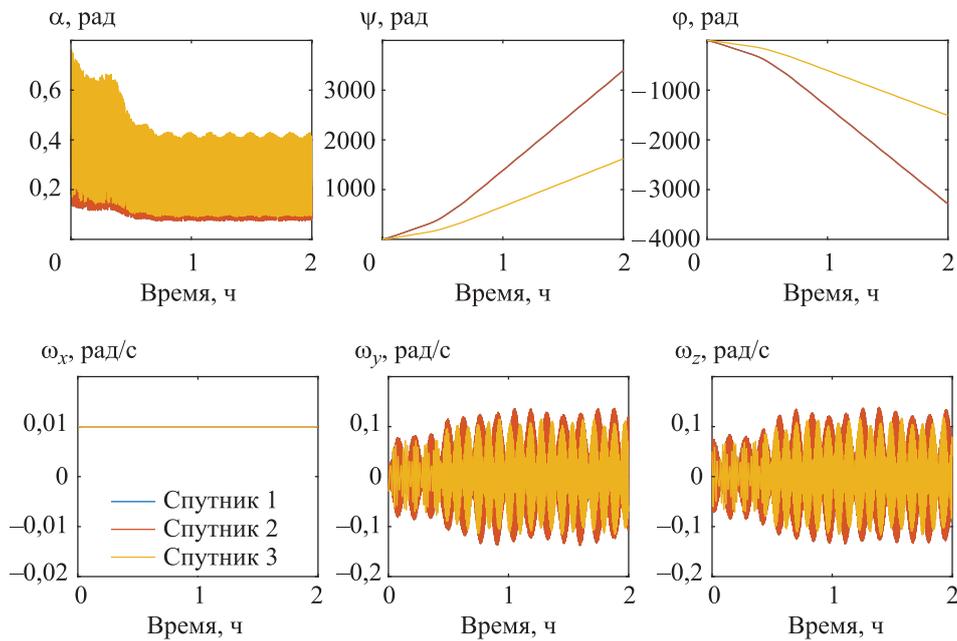


Рис. 3. Характеристики углового движения микроспутников

Согласно полученным результатам, угловая скорость вращения системы, равная 0,005 рад/с, достигается примерно за 2500 с. Угол β очень мал (не более 0,05 рад). Углы нутации и угловые скорости микроспутников ограничены (см. рис. 3), причем микроспутники совершают прецессию относительно направлений тросов и вращаются вокруг собственных продольных связанных осей. Отметим, что для исключения (уменьшения) кручения тросов можно применить специальные шарниры и активное демпфирование угловых колебаний микроспутников с помощью реактивных двигателей системы стабилизации. Эти задачи выходят за рамки настоящей работы.

Аналогичные характеристики движения ЭДТС, определенные по многоточечной модели при использовании номинальной программы управления, приведены на рис. 4. С учетом всех материальных точек многоточечная модель примет вид (1). Эта модель описывает изгибные колебания тросов, поэтому она больше соответствует реальному движению ЭДТС.

Эквивалентные длины тросов существенно отличаются от длин (1000 м) прямолинейных нерастянутых тросов особенно на начальном участке, когда пропускается ток и возникает соответствующее возмущение (см. рис. 4). Кроме того, форма троса постоянно меняется, возникают сложные колебания, при которых происходят периодические изгибы и выпрямления тросов. Заданная угловая скорость вращения системы

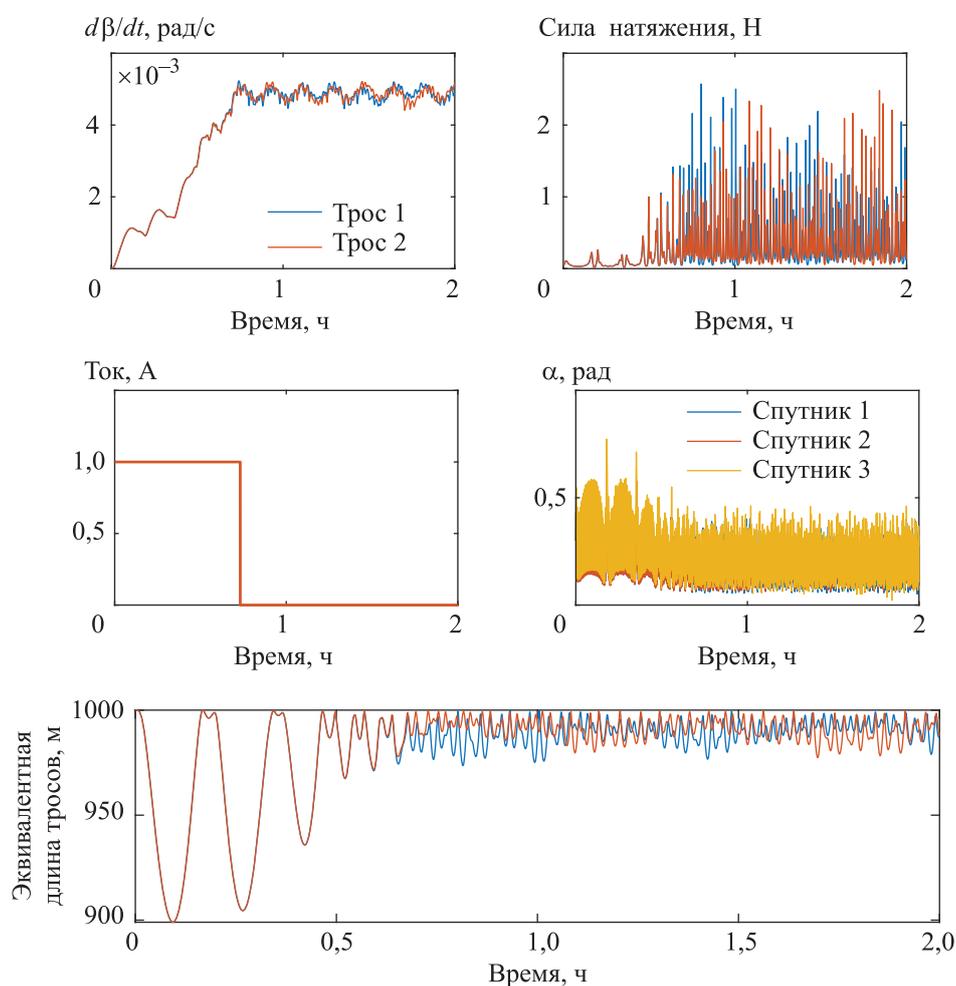


Рис. 4. Параметры, характеризующие процесс перевода ЭДТС во вращение при использовании номинальной программы управления и определенные по многоточечной модели

достигается приблизительно за то же время (2530 с), что и в более простой модели (см. рис. 4). Движения тросов становятся несимметричными, что приводит к малым значениям эквивалентных длин (до 975 м) тросов даже после выключения тока. При этом размах колебаний сил натяжения сравнительно большой. Все это мало влияет на угловые характеристики движения микроспутников относительно своих центров масс, наблюдается лишь небольшое увеличение амплитуд колебаний углов нутации. Из рис. 4 следует, что при отсутствии регулирования имеют место достаточно большие изгибные колебания тросов, что требует дополнительного управления, чтобы обеспечить более стабильный перевод ЭДТС во вращение.

Движение тросовой системы при использовании регулятора. Для стабилизации движения ЭДТС применялся регулятор (7) (поправки к номинальному току) с использованием следующих коэффициентов, одинаковых для двух тросов: $c_1 = 10^{-5}$, $c_2 = 10^{-4}$, $\eta = 10^{-5}$.

Задание малых значений коэффициентов объясняется достаточно большим значением $J_S \approx 8 \cdot 10^5$. Результаты моделирования приведены на рис. 5.

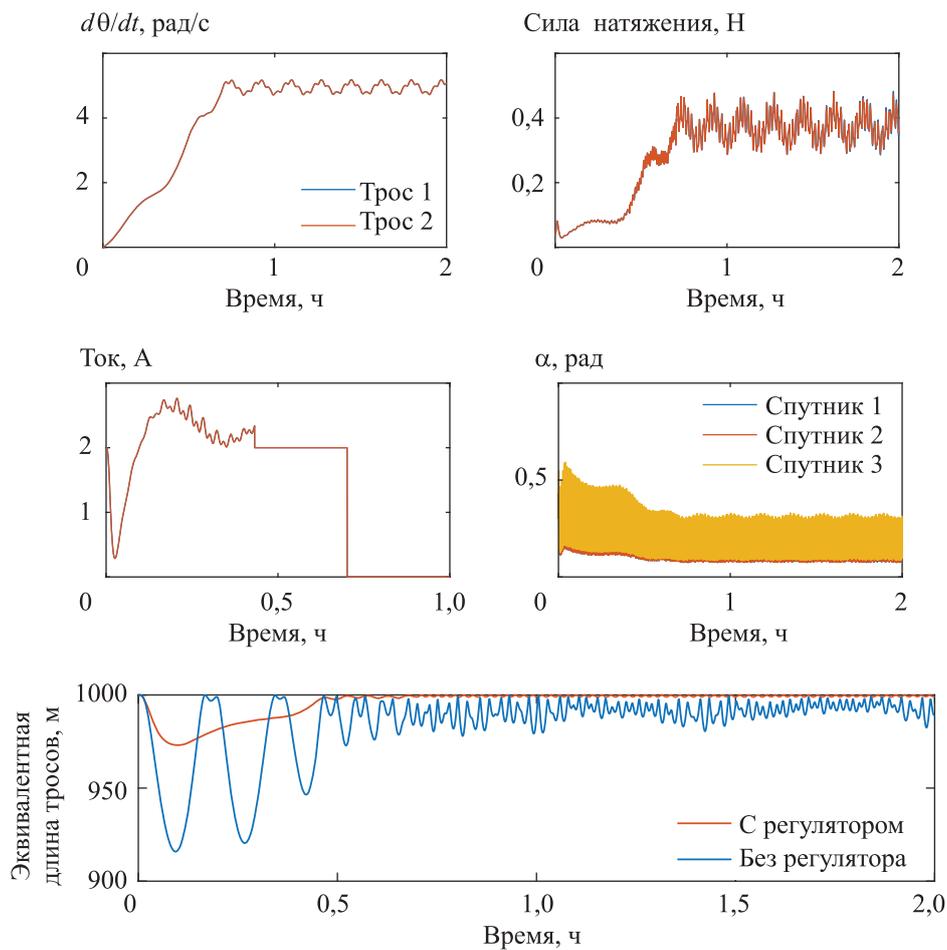


Рис. 5. Параметры, характеризующие процесс перевода ЭДТС во вращение при использовании регулятора

Результаты, приведенные на рис. 5, получены с использованием наиболее полной модели движения ЭДТС (1). Применение регулятора (7) существенно улучшает характеристики процесса перевода ЭДТС во вращение. Общее время (2530 с) обеспечения заданной угловой скорости вращения системы не изменяется. Ток сначала уменьшается, чтобы избежать большо-

го изгиба троса, а затем увеличивается, чтобы обеспечить заданную угловую скорость. Минимальные эквивалентные длины тросов увеличиваются до 968 м, а силы натяжения колеблются с существенно меньшими амплитудами. Движение тросов практически синхронно, поэтому соответствующие зависимости почти идентичны, а эквивалентные длины тросов после достижения заданной угловой скорости практически совпадают с длинами прямолинейных нерастянутых тросов. Характеристики углового движения микроспутников близки к зависимостям, соответствующим случаю, когда используется номинальная программа управления.

Заключение и выводы. Исследован процесс перевода во вращение линейной группировки микроспутников с тросами, проводящими ток. Предложено управление для уменьшения влияния распределенных электромагнитных сил на изгибные колебания тросов. По результатам проведенного исследования сделаны следующие выводы.

Перевод линейной группировки микроспутников во вращение с помощью распределенных электромагнитных сил неизбежно приводит к отклонению формы тросов от линейной. В результате возникают большие амплитуды колебаний сил натяжения и ослабляются (провисают) тросы. Такие движения рассматриваемой ЭДТС не могут быть описаны в рамках моделей с нерастяжимыми и прямолинейными тросами (упрощенными моделями тросов в виде абсолютно жестких гантелей).

Применение предлагаемого регулятора, в котором реализуется режим скольжения по заданной поверхности, позволяет существенно уменьшить размах поперечных (изгибных) колебаний тросов и, соответственно, амплитуд колебаний сил натяжения тросов, что ведет к повышению безопасности процесса перевода ЭДТС во вращение.

Движения микроспутников относительно своих центров масс в основном зависят от изменения сил натяжения тросов. Важно, чтобы в процессе перевода системы во вращение их значения были положительными (тросы должны быть натянуты и не должны провисать). Поэтому использование предлагаемого регулятора является положительным фактором, влияющим на изменения углов нутации микроспутников, колебания которых стабилизируются на некотором постоянном уровне по окончании процесса перевода системы во вращение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bekey I., Penzo P.A. Tether propulsion. *Aerosp. Am.*, 1986, vol. 24, pp. 40–43.
- [2] Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. М., Наука, 1990.

- [3] Van Pelt M. Space tethers and space elevators. New York, Springer, 2009.
- [4] Zhong R., Zhu Z.H. Optimal control of nanosatellite fast deorbit using electrodynamic tether. *J. Guid. Control Dyn.*, 2014, vol. 37, no. 4, pp. 1182–1194. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.62154>
- [5] Williams P. Optimal control of electrodynamic tether orbit transfers using timescale separation. *J. Guid. Control Dyn.*, 2010, vol. 33, no. 1, pp. 88–98. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.45250>
- [6] Li A., Lu H., Zabolotnov Y. Impact analysis and orbit reboost of payload tossing using spinning electrodynamic tether system. *Int. J. Eng. Syst. Model. Simul.*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 176–185.
- [7] Sanmartín J.R., Peláez J. Tether capture of spacecraft at Neptune. *Acta Astronaut.*, 2020, vol. 177, pp. 906–911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.03.024>
- [8] Ohkawa Y., Kawamoto S., Okumura T., et al. Review of KITE — electrodynamic tether experiment on the H-II Transfer Vehicle. *Acta Astronaut.*, 2020, vol. 177, pp. 750–758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.03.014>
- [9] Осипов В.Г., Шошунов Н.Л. Космические тросовые системы: история и перспективы. *Земля и Вселенная*, 1998, № 4, с. 19–29.
- [10] Кульков В.М., Егоров Ю.Г., Тузиков С.А. Исследование интегральных энергетических характеристик космической электродинамической тросовой системы для орбитальных экспериментов. *Изв. РАН. Энергетика*, 2017, № 3, с. 114–127.
- [11] Sedwick R.J., Schweighart S.A. Propellantless spin-up of tethered or electromagnetically coupled sparse apertures. *Proc. SPIE*, 2002, vol. 4849. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.460559>
- [12] Cai Z., Li X., Wu Z. Deployment and retrieval of a rotating triangular tethered satellite formation near libration points. *Acta Astronaut.*, 2014, vol. 98, pp. 37–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.01.015>
- [13] Levin E.M. Dynamic analysis of space tether missions. San Diego, California, AAS, 2007.
- [14] Voevodin P.S., Zabolotnov Yu.M. Stabilizing the motion of a low-orbit electrodynamic tether system. *J. Comput. Syst. Sc. Int.*, 2019, vol. 58, no. 2, pp. 270–285. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064230719020175>
- [15] Lu H., Li A., Wang C., et al. Stability analysis and motion control of spinning electrodynamic tether system during transition into spin. *Acta Astronaut.*, 2020, vol. 177, pp. 871–881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.11.032>
- [16] Lu H., Li A., Wang C., et al. Tether deformation of spinning electrodynamic tether system and its suppression with an optimal controller. *J. Aerosp. Eng.*, 2021, vol. 34, no. 2, art. 04021003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001233](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001233)
- [17] Ван Ч., Заболотнов Ю.М. Анализ динамики формирования тросовой группировки из трех наноспутников с учетом их движения вокруг центров масс. *ПММ*, 2021, т. 85, № 1, с. 21–43. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032823521010082>

Лу Хонши — аспирант кафедры «Программные системы» Самарского университета (Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское ш., д. 34); канд. наук Института автоматики Северо-Западного политехнического университета (КНР, 710072, Шэньси, г. Сиань, Вест Юуджи Роуд 127).

Ван Чанцин — д-р наук, профессор Института автоматики Северо-Западного политехнического университета (КНР, 710072, Шэньси, г. Сиань, Вест Юуджи Роуд 127).

Заболотнов Юрий Михайлович — д-р техн. наук, профессор, и. о. заведующего кафедрой «Программные системы» Самарского университета (Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское ш., д. 34).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Лу Х., Ван Ч., Заболотнов Ю.М. Формирование вращающейся электродинамической космической тросовой системы с использованием скользящего режима управления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 2 (141), с. 4–19. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-4-19>

USING SLIDING MODE CONTROL TO SET UP A ROTATING ELECTRODYNAMIC SPACE TETHER SYSTEM

H. Lu^{1,2}

C. Wang²

Yu.M. Zabolotnov¹

luhspeter@yandex.ru

wangcq@nwpu.edu.cn

yumz@yandex.ru

¹ Samara University, Samara, Russian Federation

² Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi, China

Abstract

The paper considers the process of imparting rotation at a given angular velocity to an electrodynamic space tether system in a near-Earth orbit. The tether system is a linear cluster of three microsattellites connected by insulated conductive cables. Initially the system is gravitationally stabilised in the approximate vertical direction. Electromagnetic forces generated in the conductive cables by the geomagnetic field impart rotation to the system. We stated the equations of motion for the system in the Earth-fixed coordinate system, taking into account distributed load produced by gravitational and electromagnetic forces. The system is moving in a fairly high, almost circular orbit, so aerodynamic forces are not taken into account. Adjusting the current will reduce the strain in the tethers. The model under consid-

Keywords

Tethered microsatellite cluster, conductive cables, imparting rotation to a system, current controller, sliding mode control

eration represents those as a set of material points connected by unilateral elastic links. We propose a feedback current controller based on sliding mode control. The system variables lie on a single surface, moving across which ensures asymptotic stability of the control process. We used a simplified system motion model to synthesise the controller parameters. We analysed the angular motion of microsatellites with respect to the tether direction while rotation is imparted to the system. Numerical examples confirm the efficiency of our approach to setting up a rotating space tether system

Received 30.04.2021

Accepted 19.10.2021

© Author(s), 2022

The study was supported by RFBR and National Natural Science Foundation of China as part of the research projects no. 21-51-53002 and no. 61803307

REFERENCES

- [1] Bekey I., Penzo P.A. Tether propulsion. *Aerosp. Am.*, 1986, vol. 24, pp. 40–43.
- [2] Beletskiy V.V., Levin E.M. *Dinamika kosmicheskikh trosovykh system* [Dynamics of space tether systems]. Moscow, Nauka Publ., 1990.
- [3] Van Pelt M. *Space tethers and space elevators*. New York, Springer, 2009.
- [4] Zhong R., Zhu Z.H. Optimal control of nanosatellite fast deorbit using electrodynamic tether. *J. Guid. Control Dyn.*, 2014, vol. 37, no. 4, pp. 1182–1194. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.62154>
- [5] Williams P. Optimal control of electrodynamic tether orbit transfers using timescale separation. *J. Guid. Control Dyn.*, 2010, vol. 33, no. 1, pp. 88–98. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.45250>
- [6] Li A., Lu H., Zabolotnov Y. Impact analysis and orbit reboost of payload tossing using spinning electrodynamic tether system. *Int. J. Eng. Syst. Model. Simul.*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 176–185.
- [7] Sanmartín J.R., Peláez J. Tether capture of spacecraft at Neptune. *Acta Astronaut.*, 2020, vol. 177, pp. 906–911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.03.024>
- [8] Ohkawa Y., Kawamoto S., Okumura T., et al. Review of KITE — electrodynamic tether experiment on the H-II Transfer Vehicle. *Acta Astronaut.*, 2020, vol. 177, pp. 750–758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.03.014>
- [9] Osipov V.G., Shoshunov N.L. Space tether systems: history and prospects. *Zemlya i Vseennaya*, 1998, no. 4, pp. 19–29 (in Russ.).
- [10] Kul'kov V.M., Egorov Yu.G., Tuzikov S.A. Investigation of integral energy characteristics of the space electrodynamic tether system designed for orbital experiments. *Izv. RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2017, no. 3, pp. 114–127 (in Russ.).

- [11] Sedwick R.J., Schweighart S.A. Propellantless spin-up of tethered or electromagnetically coupled sparse apertures. *Proc. SPIE*, 2002, vol. 4849.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.460559>
- [12] Cai Z., Li X., Wu Z. Deployment and retrieval of a rotating triangular tethered satellite formation near libration points. *Acta Astronaut.*, 2014, vol. 98, pp. 37–49.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.01.015>
- [13] Levin E.M. Dynamic analysis of space tether missions. San Diego, California, AAS, 2007.
- [14] Voevodin P.S., Zabolotnov Yu.M. Stabilizing the motion of a low-orbit electrodynamic tether system. *J. Comput. Syst. Sc. Int.*, 2019, vol. 58, no. 2, pp. 270–285.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064230719020175>
- [15] Lu H., Li A., Wang C., et al. Stability analysis and motion control of spinning electrodynamic tether system during transition into spin. *Acta Astronaut.*, 2020, vol. 177, pp. 871–881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.11.032>
- [16] Lu H., Li A., Wang C., et al. Tether deformation of spinning electrodynamic tether system and its suppression with an optimal controller. *J. Aerosp. Eng.*, 2021, vol. 34, no. 2, art. 04021003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001233](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001233)
- [17] Van Ch., Zabolotnov Yu.M. Analysis of the dynamics of the formation of a tether group of three nanosatellites taking into account their motion around the centers of mass. *Mech. Solids*, 2021, vol. 56, no. 7, pp. 1181–1198.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S0025654421070244>

Lu H. — Post-Graduate Student, Department of Software Systems, Samara University (Moskovskoe shosse 34, Samara, 443086 Russian Federation); Ph.D., School of Automation, Northwestern Polytechnical University (127 West Youyi Road, Beilin District, Xi'an Shaanxi, 710072 China).

Wang C. — Ph.D., Professor, School of Automation, Northwestern Polytechnical University (127 West Youyi Road, Beilin District, Xi'an Shaanxi, 710072 China).

Zabolotnov Yu.M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Acting Head of the Department of Software Systems, Samara University (Moskovskoe shosse 34, Samara, 443086 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Lu H., Wang C., Zabolotnov Yu.M. Using sliding mode control to set up a rotating electrodynamic space tether system. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 2 (141), pp. 4–19 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-4-19>