

ловский // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Том 17. – № 6. – С. 384–394.

2. Kovalev, M.A. UAV's autonomous navigation principle based on Earth remote sensing data / M.A. Kovalev, V.A. Zelenskiy, D.N. Ovaki-myan, T.V. Starostina // 2022 8th International Conference on Infor-mation Technology and Nanotechnology, ITNT 2022. – 2022. – P. 149–155.

3. Танченко, А.П. Алгоритм автономной коррекции навига-онной системы беспилотного летательного аппарата на основе рас-познавания дорожной и речной сети / А.П. Танченко, А.М. Феду-лин, Р.Р. Бикмаев, Р.Н. Садеков // Гироскопия и навигация. – 2020. – Том 28. – №3. – С. 32–42.

УДК 629.782

Акалу Й.А.

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ

Введение. В работе рассматривается влияние атмосферы и аэродинамической силы на движение двух тел связанной с невесо-мым и нерастяжимым тросом. Проводится анализ развёртывания системы спутниковой связи, состоящей из двух объектов в атмо-сфере.

Математическая модель движения космических тросов, методы управления тросом и влияние возмущающей факторов на космиче-ской тросовой системы (КТС) рассматриваются в работе [1]. В работе [3] производится моделирование движения космического аппарата (КА) с тросовым аэродинамическим стабилизатором и показывается применение аэродинамического стабилизатора в атмосфере.

Математическая модель движения записывается в орбитальной системе координаты; объекты рассматриваются как твёрдые тела m_1 и m_2 . Моделирование движения тросовой системы выполняется с учётом возмущающего воздействия атмосферы, развёртывание и управление КТС обеспечивается аэродинамическими силами. Механическая система показана на рис. 1 и её основные параметры изложены в работе [2].

Уравнение движения тросовой системы представлено в виде уравнения Лагранжа [4]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия, U – потенциальная энергия, q_i и \dot{q}_i – обобщённые координаты и скорости соответственно, Q – вектор обобщённых сил, действующие на тела, угловая скорость вычисляется как $\dot{\theta} = \Omega = \sqrt{\frac{\mu}{R^3}}$.

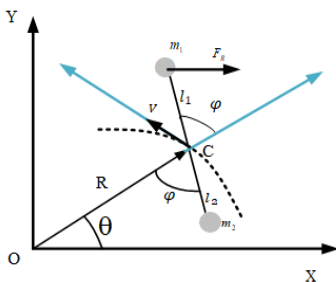


Рис. 1. Рассматриваемая механическая система

Используя в качестве обобщённых координат угол φ и длину троса l , вычисляя скорости их изменения и частные производные по времени, применяя к (1) разложение в ряд Маклорена [5], учитывая

аэродинамическую силу, натяжение троса и принимая допущения работы [2], получим следующие уравнения движения

$$\ddot{l} = l(\dot{\varphi}^2 - 2\Omega\dot{\varphi} + 3\Omega^2) + \frac{Q(m_1 + m_2)}{m_1 m_2},$$

$$\ddot{\varphi} = -2\frac{\dot{l}}{l}(\dot{\varphi} - \Omega) - 3\Omega^2\varphi. \quad (2)$$

Здесь $Q = T + F_R$ – действующая внешняя сила, $F_R = -\frac{\rho V^2}{2} cA$ – аэродинамическая сила, V – абсолютная скорость, c – коэффициент аэродинамического сопротивления, A – площадь поперечного сечения тела, ρ – плотность атмосферы, $T = 3m_e\Omega^2 l$ – натяжение троса.

С использованием замены $l = x_1$, $\dot{l} = x_2$, $\varphi = x_3$, $\dot{\varphi} = x_4$, $\dot{x}_1 = x_2$, $\dot{x}_3 = x_4$, выражение (2) будет иметь вид

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

$$\dot{x}_2 = x_1 \left(x_4^2 - 2\Omega x_4 + 3\Omega^2 \right) + \frac{u(m_1 + m_2)}{m_1 m_2},$$

$$\dot{x}_3 = x_4,$$

$$\dot{x}_4 = -2\frac{x_2}{x_1}(x_4 - \Omega) - 3\Omega^2 x_3. \quad (3)$$

Система уравнений (3) описывает движение тросовой системы в форме Коши. Приравнивая левую часть уравнений в системе (3) к нулю $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \dot{x}_3 = \dot{x}_4 = 0$, получим точки равновесия системы:

$$x_{1e} = -1, \quad x_{2e} = 0, \quad x_{3e} = \pi, \quad x_{4e} = 0,$$

$$x_{1e} = -1, \quad x_{2e} = \frac{3\pi}{2}\Omega^2, \quad x_{3e} = \pi, \quad x_{4e} = -\Omega.$$

Линеаризация системы динамического уравнения: Нелинейная система уравнений движения разложена в ряд Тейлора в окрестности стационарного движения с использованием стандартного описания матрицы Якоби:

$$\dot{X} = AX + BU . \quad (4)$$

Здесь A, B – векторные матрицы входных параметров.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ x_4^2 + 2\Omega x_4 + 3\Omega^2 & 0 & 0 & 2x_4 + 2\Omega \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{2x_2}{x_1^2}(x_4 + \Omega) & -\frac{2}{x_1}(x_4 + \Omega) & -3\Omega^2 & -\frac{2x_2}{x_1} \end{bmatrix} [X] +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [u].$$

Например, для точки равновесия $x_{1e} = -1$, $x_{2e} = 0$, $x_{3e} = \pi$, $x_{4e} = 0$.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 3\Omega^2 & 0 & 0 & 2\Omega \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2\Omega & -3\Omega^2 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Результат моделирования получен с помощью инструмента Matlab при начальном условии $m_1 = m_2 = 8,9$ кг, $\varphi_0 = 0$ рад, $\omega_0 = 0$ рад/с, $l_0 = 0.01$ м, $V_0 = 2.5$ м/с, $\Omega = 11.63 \times 10^{-4}$ рад/с.

**Таблица 1. Параметры управляемости
и наблюдаемости системы**

Параметры управляемости				Показатель управляемости	Параметры наблюдаемости				Показатель наблюдаемости
0	17,8	0	0,0001		4	1	0	0	
17.8	0	0,0001	-0,0001	0		1	0	0	
0	0	0	-0,0427	0		0	0	0,0024	
0	0	-0,0427	0	0		0	0	0	

Заключение. Полученные результаты демонстрируют, что система является наблюдаемой и управляемой. Динамические уравнения, полученные в данной работе, можно использовать для анализа движения тел, моделирования управления развёртыванием тросовой системы с учётом аэродинамических сил. Использование линеаризации позволяет применить линейную систему уравнения движения тросовой системы для исследования и определения устойчивости движения тел.

Библиографический список

1. Белецкий, В.В. Динамика космических тросовых систем / В.В. Белецкий, Е.М. Левин. – Москва: Наука. 1990. – 336 с.
2. Elenev, D. Modeling and analysis of motion of a spacecraft with a tether aerodynamic stabilizer / D. Elenev, Y. Zabolotnov // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1904. – P. 85–88
3. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Ч. 2. Динамика: учебник для студентов машиностроительных, механических, электротехнических, приборостроительных и строительных специальностей высших технических учебных заведений / А.А. Яблонский. – Москва: Высшая школа, 1966. – 411 с.
4. John Bird, Higher engineering mathematics, Elsevier Ltd., Fifth edition, 2006.

5. Акалу, Й.А. Методы моделирования движения тросовых систем / Й.А. Акалу, Д.В. Еленев // Наука и бизнес: Пути развития. – 2023. – № 4 (142).

УДК 629.78

Веиси С., Любимов В.В.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДИСТАНЦИОННОЙ ПОДЗАРЯДКИ АККУМУЛЯТОРА ПАССИВНОГО СПУТНИКА ПОСРЕДСТВОМ СВЕТОВОЙ СИСТЕМЫ МАНЕВРЕННОГО СПУТНИКА

Введение. В контексте космической активности человечества, передача энергии между объектами в космосе становится критической необходимостью [1]. Светодиоды, обеспечивающие интенсивное освещение с высокой эффективностью, становятся предпочтительными в системах передачи энергии [2]. Эффективность передающих свет устройств зависит от дизайна и конфигурации системы [3], требуя дополнительных исследований. Передача энергии с помощью света в космическом пространстве, особенно в области солнечной энергетики, представляет значительный интерес [4].

В этой работе сравниваются две конфигурации светопередающих систем с целью оптимизировать сбор световой энергии на солнечных панелях спутников. Исходный свет идёт от 20000-люменной светодиодной лампы, отражатели покрыты наночастицами серебра для улучшения отражения [5, 6]. Метод трассировки лучей применяется для отслеживания света от лампы до панели, численные методы и генетический алгоритм используются для оптимизации параметров [9–11]. Анализируются две конфигурации: