

СБЛИЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО БУКСИРА С КОСМИЧЕСКИМ МУСОРОМ ПРИ ПОМОЩИ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается проблема увода крупногабаритного космического мусора [1-6], в частности задача осуществления маневра близкого сближения и стыковки космического буксира с космическим мусором при помощи тросовой системы [7-10]. В работах [8-10] разработан закон управления тросом, позволяющий осуществить сближение. Результаты численных экспериментов показали, что по мере сокращения длины троса происходит закрутка связки относительно собственного центра масс и после завершения маневра вращение продолжается с постоянной угловой скоростью. Данное явление может помешать дальнейшему уводу мусора с орбиты и привести к срыву всей миссии и потере буксира.

В представленной работе рассматривается задача управления угловым движением связки во время сближения с целью предотвращения закрутки системы.

1. Уравнения движения

Для изучения возможности управления угловым движением тросовой связки «буксир – космический мусор», рассмотрим механическую систему, представленную на рис. 1. Она состоит из буксира и космического мусора, рассматриваемых как материальные точки с массами m_1 и m_2 соответственно, связанных между собой вязкоупругим тросом длиной l_0 . Движение рассматривается в без силовом поле.

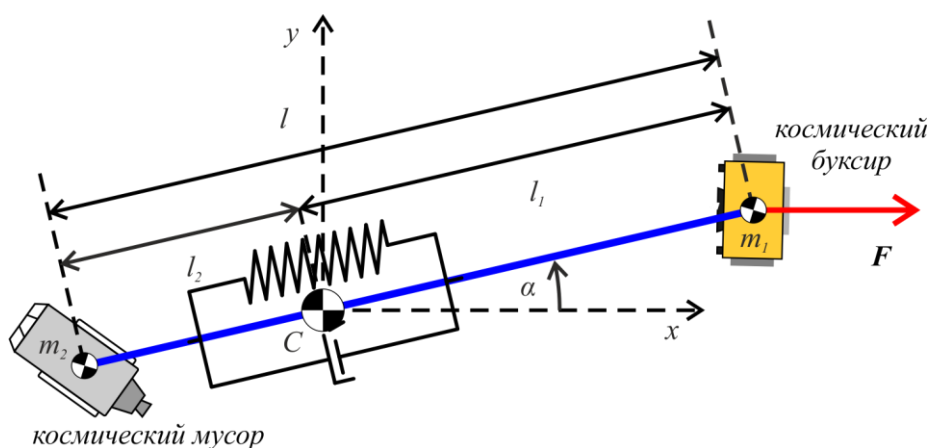


Рис. 1. Схема системы

Для записи уравнений движения используем формализм Лагранжа. В качестве обобщенных координат выберем текущее расстояние между буксиром и космическим мусором l и угол, определяющий вращение связки относительно собственного

центра масс, α . Движение будем рассматривать относительно системы координат $Sxyz$, где точка C совпадает с центром масс системы. Положение точек m_1 и m_2 относительно центра масс связки определяется векторами

$$\mathbf{r}_1 = l_1 \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}_2 = -l_2 \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $l_1 = lm_2/m$, $l_2 = lm_1/m$, $m = m_1 + m_2$. Кинетическая и потенциальная энергия системы будет определяться соответственно формулами

$$T = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (\dot{l}^2 + l^2 \dot{\alpha}^2),$$

$$\Pi = H[l] \frac{c}{2} (l - l_0)^2, \quad (7)$$

где $H[l] = \begin{cases} 1, & l > l_0 \\ 0, & l \leq l_0 \end{cases}$ – функция Хэвисайда. Подставляя (7) в уравнения Лагранжа и

проводя алгебраические преобразования, получим уравнения движения системы:

$$\begin{cases} \ddot{l} - l\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{M} H[l] c (l - l_0) = \frac{1}{M} Q_l, \\ \ddot{\alpha} + \frac{2\dot{l}}{l} \dot{\alpha} = U, \end{cases} \quad (8)$$

где $M = (m_1 + m_2)/(m_1 m_2)$ – приведенная масса системы; U – сила, управляющая угловым движением связки относительно центра масс:

$$U = -k\alpha - k_\alpha \dot{\alpha}, \quad (9)$$

k и k_α – коэффициенты демпфирования.

Обобщенную силу в (8) определим следующим образом

$$Q_l = F \cos \alpha + H[l] k_d (\dot{l} - \dot{l}_0), \quad (10)$$

где первое слагаемое отвечает за тягу двигателей буксира, второе – за силу демпфирования троса.

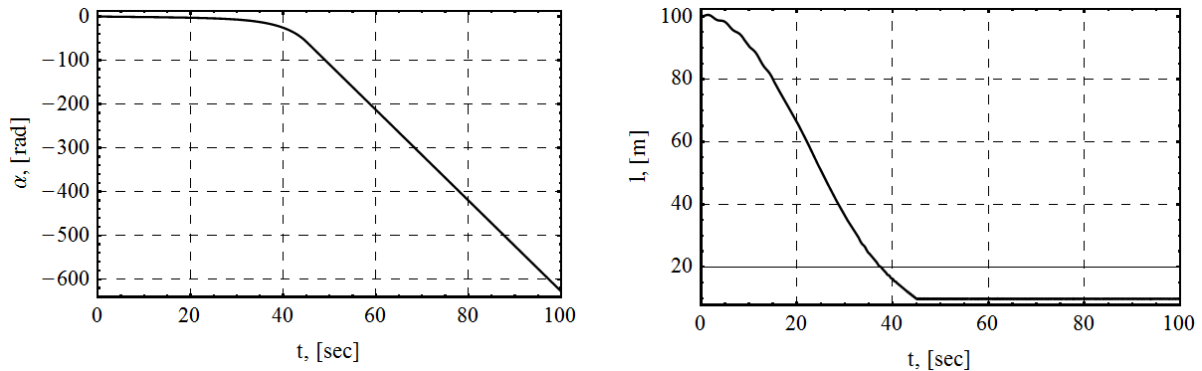
Будем использовать ранее введенный закон управления длиной троса [8-10]

$$l_0 = \frac{L_0}{2} (1 + \cos(\pi t / t_k)), \quad (11)$$

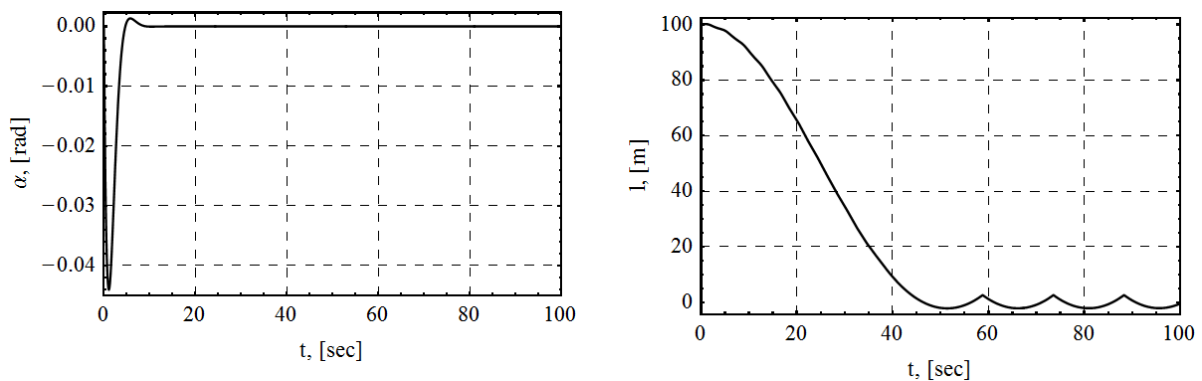
где t_k – время выполнения маневра сближения.

2. Численный эксперимент

Проведем численный эксперимент, используя следующие параметры системы: $L_0 = 100$ м, $m_1 = 800$ кг, $m_2 = 2000$ кг, $F = 100$ Н, $t_k = 50$ с, $k = 1$, $k_\alpha = 1,5$ и начальные условия: $\alpha(0) = 0$, $\dot{\alpha}(0) = -0,1$ рад/с, $l(0) = L_0$, $\dot{l}(0) = 0$. Рассмотрим два случая: а – сближение без управления угловым движением, б – сближение с управлением. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.



(а) – сближение с начальными возмущениями без управления угловым движением



(б) – сближение с начальными возмущениями с управлением угловым движением

Рис. 2. Результаты моделирования

Как видно из рисунка 2, в первом случае по мере сближения происходит рост значения угла α . После завершения сближения, система продолжает вращаться с постоянно угловой скоростью. Во втором случае управление в самом начале гасит вращения системы. После завершения сближения система не вращается.

Заключение

Рассмотрена задача управления угловым движением системы «буксир – космический мусор» на тросовой связи на этапе сближения, осуществляемого путем управления длиной троса. Предложен закон управления, позволяющий гасить вращение системы до и во время сближения. Результаты численного эксперимента показывают, что введенное управление позволяет избежать закрутки системы относительно собственного центра масс.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (Проект № 18-01-00215).

Библиографический список

1. Kessler, D.J. The Kessler syndrome: implications to future space operations [Текст] / D.J. Kessler, N.L. Johnson, J.C. Liou, M. Matney // *Advanced in the Astronautical Science*. - 2010. - Vol. 137. №8. P. 1-15.
2. Bonnal, C. Active debris removal: Recent progress and current trends [Текст] / C. Bonnal, J.M. Ruault, M.C. Desjean // *Acta Astronautica*. - 2013. Vol.85. P. 51-60.
3. Pelton, J.N. New solutions for the space debris problem [Текст] / J.N. Pelton. – Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 2015. – 94 p.
4. Aslanov, V.S. Rigid body dynamics for space applications [Текст] / V.S. Aslanov. – Elsevier, 2017. – 420 P.
5. Mark, C.P. Review of Active Space Debris Removal Methods [Текст] / C.P. Mark, S. Kamath // *Space Policy*. – 2019. – Vol.47. – P. 194-2-6.
6. Пикалов, Р.С. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора [Текст] / Р.С. Пикалов, В.В. Юдинцев // *Труды МАИ*. – 2018. – № 100. – С.1-37.
7. Jasper, L.E.Z. Tethered tug for large low Earth orbit debris removal [Текст] / L.E.Z. Jasper, C.R. Seubert, H. Schaub, V. Trushlyakov, E. Yutkin // *Advances in the Astronautical Science*. – 2012. – Vol.143. – P. 2223-2242.
8. Aslanov, V.S. Rendezvous of non-cooperative spacecraft and tug using a tether system [Текст] / V.S. Aslanov, R.S. Pikalov // *Engineering Letters*. – 2017. – Vol.25. № 2. – P. 142-146.
9. Асланов, В.С. Безударное сближение космического мусора с буксиром при использовании тросовой системы [Текст] / В.С. Асланов, Р.С. Пикалов // *Труды МАИ*. – 2017. – № 92. – С. 1-24.
10. Trushlyakov, V.I. Dynamic control of tug-debris tethered system after debris capture [Текст] / V.I. Trushlyakov, V.V. Yudinsev, R.S. Pikalov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol.1050. № 2. – P. 1-11.