



6. Reynold, S. Xin. A Resilient Distributed Graph System on Spark [Текст] / S. Xin Reynold, E. Gonzalez Joseph, J. Franklin Michael, Stoica Graph X Ion. – Berkeley, 2013. – 6 с. (дата обращения 17.05.2019).

Н.С. Якошук, Ю.М. Заболотнов

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ПРОВОДЯЩЕГО ТОК ТРОСА

(Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва)

Введение

Космическая тросовая система (КТС) – это связка двух или более космических аппаратов, соединенных тросами длиной в десятки или сотни километров, причем её развертывание и ориентация в пространстве обеспечивается в основном за счет действия гравитационных сил [1].

Космические тросовые системы представляют существенный практический интерес, так как позволяют решать широкий спектр задач, которые практически невозможно или неэффективно выполнять с помощью уже существующих технических средств. Например, они позволяют снизить затраты на поддержание и маневрирование на орбите спутников, сход с орбиты спускаемых аппаратов. Также КТС могут быть использованы для выполнения ремонтных работ космического аппарата (КА), для снабжения КА электроэнергией, для удаления КА, которые завершили срок службы, и другого космического мусора с орбиты, для обеспечения транспортных операций в космосе. Это всего лишь небольшая часть возможных практических применений КТС.

В связи с этим становится актуальной задача разработки автоматизированной системы, которая могла бы позволить моделировать процесс формирования вращающейся тросовой системы с помощью проводящего ток троса. Использование данной системы позволит рассчитать управление величиной тока для перевода системы во вращение для различных входных параметров. Разработанное программное обеспечение может быть использовано для исследования динамики электродинамической космической тросовой системы (ЭДКТС).

Постановка задачи

На рисунке 1 изображена схема ЭДКТС на орбите. Точка C – центр масс системы, точка O – центр масс Земли, m_1 и m_2 – массы концевых тел, θ – угол отклонения троса от вертикали. \vec{F} – вектор силы Ампера, \vec{B} – вектор магнитной индукции, I – величина тока в тросе.

Процесс формирования тросовой системы описывается системой дифференциальных уравнений (ДУ). Для исследования основных закономерностей динамики данного процесса целесообразно применять упрощенные модели, в



которых присутствуют только существенные для исследуемого процесса взаимодействия.

Модель для невесомого троса описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\ddot{\theta} + \dot{\vartheta}_0^2 + \frac{3}{2}v^{-1}\dot{\vartheta}_0^2 \sin 2\theta = \frac{M_\theta}{m_e L^2}, \quad (1)$$

где θ – угол отклонения троса от вертикали, рад; ϑ_0 – истинная аномалия в невозмущенном движении, рад; $v = 1 + e \cos \vartheta$; $M_\theta = F \left(\frac{L}{2} - rc \right)$ – момент силы Ампера; $F = IBL$ – сила Ампера; I – ток; $m_e = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ – приведенная масса; L – длина троса КТС.

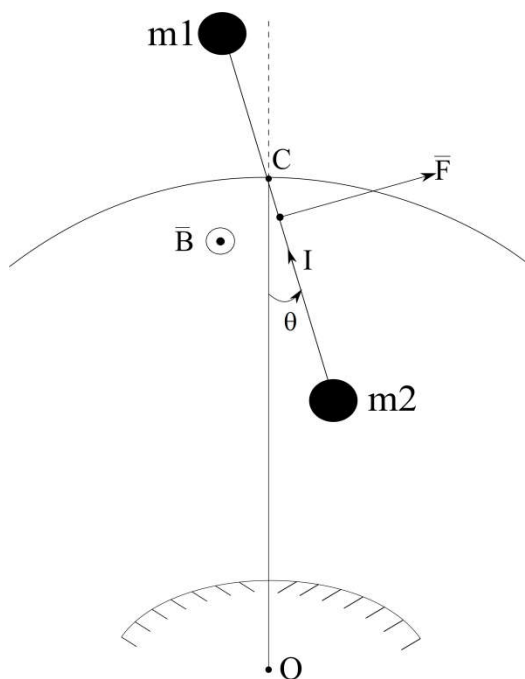


Рисунок 6 – Схема электродинамической космической тросовой системы

Возмущенная система для движения центра масс системы в оскулирующих элементах имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{K}} \frac{2A}{1-e^2} (a_s e \sin \vartheta + a_T p/R) \\ \frac{de}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{K}} \left\{ a_s \sin \vartheta + a_T \left[\left(1 + \frac{R}{p} \right) + eR/p \right] \right\}, \\ \frac{d\vartheta}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{K}} \left[\frac{K}{R^2} + a_s \frac{\cos \theta}{e} - \frac{a_T}{e} (1 + R/p) \sin \vartheta \right] \end{aligned} \quad (2)$$

где t – время; A – большая полуось орбиты; $p = A(1 - e^2)$ – параметр ты; e – эксцентриситет орбиты; ϑ – истинная аномалия.

Процесс формирования КТС описывается совокупностью дифференциальных уравнений (1) и (2) [2].

Для формирования вращательного движения тросовой системы используются различные законы управления током. Например, ток может иметь по-



стоянную величину, а также может изменяться по релейному закону. Для релейного закона сила Ампера задается в виде

$$F = \begin{cases} F_A, & \text{если } \omega_\theta > 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3)$$

где $F_A = IBL$ – сила Ампера; ω_θ – угловая скорость вращения троса; t – время.

Разработанное программное обеспечение

Разработанная автоматизированная система предназначена для моделирования процесса формирования вращающейся ЭДКТС, то есть представляет собой систему моделирования. Решение системы дифференциальных уравнений осуществляется с помощью метода Рунге-Кутты 4-ого порядка точности с переменным шагом интегрирования. Программа разработана на языке программирования C# в среде разработки Microsoft Visual Studio. Разработанная программа выполняет следующие функции:

- сохранение параметров математической модели в файле;
- загрузка параметров математической модели из файла;
- выдача справочной информации о системе;
- решение начальной задачи Коши;
- проверка корректности введенных пользователем параметров;
- проведение серии испытаний;
- построение графиков полученных характеристик процесса.

Пользователю необходимо задать все необходимые параметры тросовой системы, параметры орбиты, а также закон управления током.

Результаты моделирования

В работе проводилась оценка влияния параметров тросовой системы на процесс формирования её вращательного движения, а именно: влияние массы концевых тел КТС, длины троса, угловой скорости вращения КТС. Также были рассмотрены случаи использования постоянного и релейного закона управления током.

Исходя из результатов моделирования можно сделать вывод о том, что во многих случаях импульс силы Ампера при постоянном токе оказывается достаточно большим, что ведет к существенным затратам топлива и энергии. Импульс силы определяется как произведение силы Ампера на время включения тока. С другой стороны, изменение тока в соответствии с релейным законом приводит к существенному уменьшению необходимой силы тока для перевода системы во вращение, однако количество случаев провисания троса возрастает. Для исключения этих случаев требуется тщательный выбор параметров закона управления. При этом требуется большее количество периодов колебаний системы относительно вертикали для перевода системы во вращение.



Проведенный параметрический анализ процесса формирования вращающейся электродинамической тросовой системы позволил сделать следующие выводы:

1. Увеличение массы конечных тел ЭДКТС приводит к увеличению силы Ампера и тока, необходимого для перевода системы во вращение. Применение релейного закона позволяет привести систему во вращение, используя меньший по величине ток.

2. Увеличение длины троса ЭДКТС также приводит к увеличению силы Ампера и минимально необходимого тока. Применение релейного закона позволяет снизить затраты энергии, но необходимо следить за силой натяжения троса, так как при увеличении длины троса увеличивается количество случаев его провисания.

3. При моделировании процесса формирования вращающейся ЭДКТС на эллиптической орбите для релейного закона увеличивается количество колебаний системы относительно вертикали до перевода системы во вращение. При использовании постоянного тока количество колебаний системы значительно не увеличивается.

4. Увеличение конечной угловой скорости вращения КТС приводит к увеличению импульса силы Ампера и величины подаваемого тока для перевода системы во вращение. Однако суммарный импульс при заданной конечной угловой скорости практически не зависит от величины подаваемого тока для обоих законов изменения тока.

Литература

1. Белецкий, В.В. Динамика космических систем с тросовыми и шарнирными соединениями [Текст]/А.П. Алпатов [и др.]. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2007. – 560 с.

2. Zabolotnov, Yu. Introduction to the dynamics and control of the motion of space tether systems [Текст] / Yu. Zabolotnov. –China: Beijing: Science Press, 2013. – 140 с.