

Исследование вращающейся тросовой космической системы в зависимости от силы натяжения троса

© А.А. Екимовская, В.Ю. Ермаков, А. Туфан

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

Рассмотрено потенциальное применение тросовых космических систем для выполнения орбитальных маневров и возвращения на Землю малых космических аппаратов в случае недоступности химического топлива при различных конфигурациях: вращающаяся система с двумя одинаковыми грузами; симметричная и несимметричная системы с тремя одинаковыми грузами. Разработана математическая модель для определения силы натяжения троса с учетом изменений массово-геометрических характеристик. Проведено математическое моделирование тросовых космических систем с использованием специально разработанного программно-алгоритмического обеспечения. Изучено влияние количества соединительных тросов в конструкции на силу натяжения и углы «провисания», что позволило предварительно оценить эффективность предложенных схем тросовых космических систем.

Ключевые слова: тросовая космическая система, малый космический аппарат, орбитальный переход Гомана, сила натяжения троса, искусственная гравитация

Введение. Создание новых космических систем с учетом законов орбитального движения, в частности, развитие тросовых космических систем (ТКС) и перспективы их применения рассмотрены в работах, посвященных механике космического полета [1–4]. Применение новых принципов построения космических систем, таких как ТКС, может привести к появлению и новых направлений в данной отрасли, перспективных не только в плане создания искусственной гравитации, но и для расчета орбитального маневра космических аппаратов (КА) и их возвращения на Землю. Это свидетельствует об актуальности работы в данной области [5, 6].

Одним из перспективных направлений является разработка искусственной гравитации с использованием вращающейся тросовой системы, которая позволяет не только создавать искусственную гравитацию, но и накапливать энергию вращения для дальнейшего орбитального маневра КА [6, 7]. При этом энергия высвобождается после управляемого разрыва троса между частями системы. Одна часть КА получает разгонный импульс и увеличивает апогей орбиты, а другая часть, напротив, получает тормозной импульс и уменьшает перигей орбиты.

В настоящее время использование малых КА становится все более актуальным вследствие ряда их преимуществ, таких как относительно низкая стоимость; простота конструкции; меньшее количество радиопомех; высокая оперативность получения данных при орбитальной

группировке; возможность возвращаться на Землю без расходования топлива, включая использование ТКС, и др. [8].

Целью данной работы является определение силы натяжения троса при различных конфигурациях вращающихся ТКС.

Постановка задачи. Принцип создания определенного относительного перемещения основан на импульсе, создаваемом качающейся ТКС [9, 10]. Этот же принцип применим и к вращающейся ТКС. Новизна представленного материала заключается в следующем. При выполнении различных орбитальных маневров и возвращении на Землю малых КА, которым уже передан импульс на вращение, используется раскрученная тросовая космическая система, в которую входит, например, многожильный трос из нержавеющей стали [11], пропитанный графитовой смазкой и покрытый фторопластовой оплеткой. В месте отделения троса расположен датчик силы, на конце троса прикреплен груз, который отделяется от малого КА и получает дополнительный импульс от натянутого троса, как показано на рис. 1.

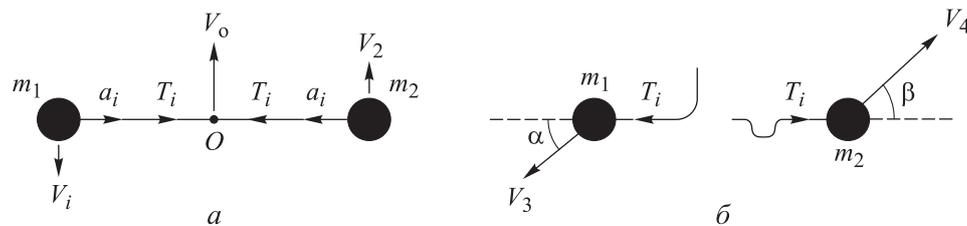


Рис. 1. Математическое моделирование тросовой космической системы:

a — до разрыва троса; *б* — после разрыва связи, в момент максимальной силы натяжения троса; m_1, m_2 — масса грузов, кг; V_1, V_2 — скорости вращения грузов, м/с; a_i — центростремительное ускорение, м/с²; T_i — сила натяжения троса, Н; V_0 — общая скорость всей системы, м/с; O — центр масс системы; V_3, V_4 — скорости грузов после разрыва троса, м/с

После разрыва троса скорости грузов V_3, V_4 будут следующими:

$$|V_3| = \frac{V_1}{\sin \alpha} + m \frac{dS}{dt} + T_3;$$

$$|V_4| = \frac{V_1}{\sin \beta} + m \frac{dS}{dt} + T_4.$$

Здесь α, β — угол между вектором скорости грузов и тросом, рад; $m \frac{dS}{dt}$ —

приращение скорости, зависящей от силы натяжения троса, м/с.

Скорость каждого груза после разрыва троса всегда направлена по касательной к траектории — окружности, если трос предполагается недеформируемым.

После разрыва троса необходимо рассмотреть две ситуации:

1) $\alpha = 0$; $\beta = 0$. Рассмотрим случай, когда трос абсолютно нерастяжимый, при этом линейная скорость вращательного движения в каждый момент времени направлена по касательной к окружности, поэтому грузы приобретают дополнительные импульсы строго перпендикулярно. Угла не будет при нерастяжимом тросе (рис. 1, а). После мгновенного разрыва троса при отсутствии его деформации, по первому закону Ньютона, ввиду отсутствия внешних сил линейная скорость грузов сохранится и векторно добавится к скорости центра масс системы. Таким образом, для получения разгонной дополнительной скорости одним грузом и тормозной скорости другим грузом необходимо выполнить разрыв недеформируемого троса в момент времени, когда обе линейные скорости относительного вращения грузов коллинеарны орбитальной скорости центра масс системы;

2) $\alpha \neq 0$; $\beta \neq 0$. Для расчета данный случай является более сложным, здесь учитываются упругие свойства троса. В процессе вращения грузов длина троса не только возрастает по закону Гука (от силы натяжения за счет действия центростремительного ускорения), но дополнительно появляются возмущения за счет неоднородности гравитационного поля Земли. Например, ближе к Земле гравитационное поле сильнее, чем в более отдаленных точках. При малой длине троса такую неоднородность обычно не учитывают, но с увеличением размеров этим фактором пренебрегать нельзя. Реальные свойства упругого троса, т. е. его деформация, совместно с неоднородностью гравитационного поля приведут к периодическим колебаниям двух грузов друг относительно друга. Следовательно, появятся продольные составляющие дополнительных скоростей грузов, которые тоже векторно добавятся к орбитальной скорости центра масс КА после разрыва троса. В результате грузы приобретут дополнительные скорости, направленные не вдоль орбитальной скорости КА, т. е. перпендикулярно начальной связке вращающейся тросовой системы, а под некоторыми углами к ней [12]. Вариант деформируемого троса представлен на рис. 1, б.

С помощью уравнений Лагранжа второго рода составим уравнения движения механической системы [13]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial L}{\partial q_j}, \quad (1)$$

где L — лагранжиан системы, $L = U - \Pi$; $U - \Pi$ — разность между значениями кинетической и потенциальной энергии системы соответственно, Дж; q_j — обобщенные координаты, м; \dot{q}_j — обобщенные скорости, м/с.

Соотношения для системы двух грузов имеют вид

$$m_i a_n + \varepsilon_{Ti} v + k_i \Delta u = m_i a_n + \varepsilon_{Ti} v + k_i \Delta u. \quad (2)$$

Здесь m_i — масса грузов в системе, кг; $i = 1, 2$; a_n — центростремительное ускорение грузов, м/с^2 ; ε_{ti} — относительная деформация тросов, м; k_i — коэффициент жесткости тросов, Н/м; Δu — относительное удлинение троса, м, $\Delta u = \frac{4m_t g u_0}{\pi d^2 E}$ (m_t — масса троса, кг; g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; u_0 — начальная длина троса, м; d — диаметр троса, м; E — модуль упругости троса, Па).

Для решения данных двух уравнений учтем, что, по закону Гука, сила натяжения троса

$$T = k_i \Delta u, \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Поскольку система состоит из двух грузов, связанных с тросом, запишем уравнения движения системы в следующем виде:

$$a = \frac{1}{m} (F_i^g + \Phi_i^e + \Phi_i^c + F_i). \quad (4)$$

Здесь F_i^g — сила гравитационного воздействия Земли, Н, $F_i^g = -\mu \frac{m_i}{|\vec{r}_i|^3} \cdot r_i$, где $i = 1, 2$; \vec{r}_i — вектора, определяющие расстояние от центра Земли до центров масс грузов, $|\vec{r}_i| = r + \Delta u$ (r — расстояние от центра Земли до начала координат, в которой движется система, м); Φ_i^e — переносные силы инерции, Н, $\Phi_i^e = -m_i a_i$, где a_i — ускорение системы, м/с^2 , $a_i = a_0 - b_i \omega^2$ (a_0 — ускорение точки центра масс троса, м/с^2 ; b_i — расстояние до оси вращения для грузов, м); Φ_i^c — силы инерции Кориолиса, Н, $\Phi_i^c = -m_i a_i^c$, где a_i^c — переносное ускорение, м/с^2 ; F_i — сила взаимодействия грузов, Н.

Таким образом, уравнение движения системы примет вид

$$a = -\mu \frac{m_i}{|\vec{r}_i|^3} r_i \omega^2 + b_i \omega^2 - a_i^c + \frac{F_i}{m_i}, \quad (5)$$

где ω — угловое ускорение, рад/с^2 ; $i = 1, 2$.

Сила взаимодействия двух грузов

$$F_1 = F_2 = T_T \frac{\Delta}{|\Delta|}, \quad (6)$$

где T_T — упругая сила троса, Н; Δ — текущее расстояние между двумя грузами, м.

При этом направление силы T_T совпадает с направлением вектора, определяющим текущее расстояние между двумя грузами:

$$T_T = \begin{cases} k_T \varepsilon_T + c_T + \dot{\varepsilon}_T, & |\Delta| \geq 1; \\ 0, & |\Delta| < 1, \end{cases} \quad (7)$$

где первое слагаемое отвечает за силу упругости, а второе — за силу демпфирования; k_T , c_T — жесткость и коэффициент демпфирования

для троса соответственно; $\varepsilon_T = \frac{|\Delta|}{u} - u$ (u — удлинение троса, м); $\dot{\varepsilon}_T$ —

скорость деформации троса, м/с, $\dot{\varepsilon}_T = \frac{\Delta \dot{\Delta}}{|\Delta| u_x} - \frac{\Delta u_x}{|\Delta| u_x}$ (u_x — недеформируемая длина троса, м).

Теоретически сложно учесть колебательное движение грузов на деформируемом тросе, поэтому интерес представляет все тот же случай разрыва троса в момент времени перпендикулярности скоростей грузов соединительной линии. Такой момент времени соответствует максимальной потенциальной энергии упругой системы, т. е. максимальному растяжению троса. По закону Гука, в этот момент времени сила натяжения троса будет максимальной. Следовательно, достаточно установить датчик силы троса, чтобы определить требуемый момент времени разрыва соединительной связи. Но при этом остается задача одновременной ориентации линейных скоростей вращения грузов параллельно орбитальной скорости центра масс вращающейся системе.

Часто такой момент времени должен быть согласован с баллистическими требованиями, т. е. с заданной точкой положения КА на орбите. При этом должны совпасть сразу три момента времени: баллистическое требование, параллельность трех векторов скоростей, максимальная сила натяжения троса. При учете всех этих требований можно сделать следующий вывод: быстрое вращение тросовой системы и быстрые упругие колебания вызваны относительно большим коэффициентом жесткости троса при относительно малых массах грузов, что предпочтительнее с точки зрения баллистики. Необходимым элементом вращающейся тросовой системы является датчик силы. При этом трос предполагается абсолютно гибким, т. е. в каждой точке сила натяжения одна и та же. Максимальное натяжение определяется датчиком силы, например, типа SK-02 (ТУ 4273-030-32564943-09), расположенным в месте разрыва троса (рис. 2). Отделение массы происходит в момент наибольшего натяжения троса (который фиксируется датчиком силы), тем самым увеличивается скорость отделяемого объекта.



Рис. 2. Датчик силы типа SK-02

Диапазон рабочих температур датчика типа SK-02 — от $-30,0$ до $+50,0$ °С. Материалом корпуса датчика является легированная сталь. Для троса, например, удерживающего массу $1,0 \cdot 10^3$ кг, выбираем, исходя из прочностных требований, многожильный трос диаметром $8,0 \cdot 10^{-3}$ м из нержавеющей стали [14], пропитанный графитовой смазкой и закрытый фторопластовой оплеткой. При разматывании в вакууме вероятность слипания в тросе уменьшается благодаря графитовой смазке, а фторопластовая оплетка удерживает эту смазку на поверхности многожильного троса.

Методико-аналитический подход к решению поставленной задачи. Введем допущения в решение предлагаемой задачи. Самая простая тросовая система состоит из двух одинаковых грузов, соединенных абсолютно гибким тросом, который предполагается невесомым. Это означает, что масса троса намного меньше, чем масса грузов. Техническое предложение состоит в использовании системы вращающихся грузов, которые отталкиваются друг от друга после разрыва троса [15].

Например, при орбитальной раскрутке большой ТКС для получения относительной скорости вращения грузов достаточно иметь радиус $1,0 \cdot 10^2$ м, т. е. трос длиной $2,0 \cdot 10^2$ м, и угловую скорость вращения $1,0$ рад/с. При разрыве троса в момент, когда скорость одного груза направлена противоположно скорости орбитального движения центра масс системы, этот груз получает тормозной импульс $1,0 \cdot 10^2$ кг·м/с, что является достаточным условием для обеспечения безопасного возвращения КА на Землю. Суть маневра торможения заключается в приложении тормозного импульса в точке апогея, в результате чего высота перигея уменьшается, при этом остается второй груз, который можно использовать для других задач на другой орбите. Далее определим орбиту груза, получившего разгонный импульс.

Рассмотрим уравнение Кеплера, которое описывает траекторию движения КА в задаче двух тел [16]:

$$V_{d1}^2 + 2V_1V_{d1} = \frac{\mu}{r_1} \frac{r_2 - r_1}{r_1 + r_2}, \quad (8)$$

где V_{d1} — разгонная скорость на начальной (круговой) орбите, м/с;
 V_1 — круговая скорость, м/с, $V_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}}$; r_1 — начальный радиус круговой орбиты, м, $r_1 = R_i + h_1$ (R_i — радиус небесного тела, м; h_1 — высота круговой орбиты); r_2 — радиус апогея конечной (эллиптической) орбиты, м.

Применительно к небесному телу типа Земли приведем следующие исходные данные: $V_{d1} = 1,0 \cdot 10^2$ м/с; $R_i = R_3 = 6,38 \cdot 10^6$ м; $h_1 = 2,0 \cdot 10^5$ м; $\mu = 3,98 \cdot 10^{14}$ м³/с².

Из уравнения (8) получим апогей r_2 :

$$r_2 = r_1 \frac{1 + A}{1 - A}, \quad (9)$$

где $A = \frac{[V_{d1}^2 + 2V_1V_{d1}^2]r_1}{\mu}$.

Таким образом, высота апогея эллиптической орбиты над поверхностью Земли может быть рассчитана по формуле

$$h_2 = r_2 - R_3. \quad (10)$$

На рис. 3 представлена схема первого орбитального перехода груза, получившего разгонный импульс, в котором первый груз замедляется и возвращается на Землю, а второй груз переходит на эллиптическую орбиту (схема Гомана). Здесь 1 — точка перехода на эллиптическую орбиту; 2 — точка второго импульса для дальнейшего перехода с разгонной скоростью V_{d2} на конечную (эллиптическую) орбиту. Эта классическая схема Гомана, которую можно считать наиболее экономичной при выполнении орбитального маневра [17]. В современных КА такой маневр проводится с использованием химических ракетных двигателей, что значительно сокращает их срок активного существования на рабочих орбитах.

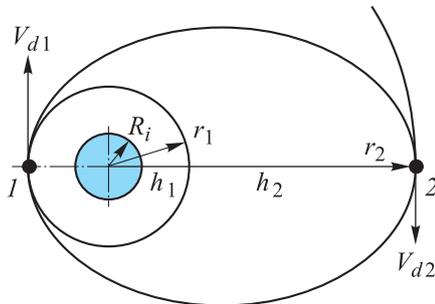


Рис. 3. Орбитальный переход по схеме Гомана

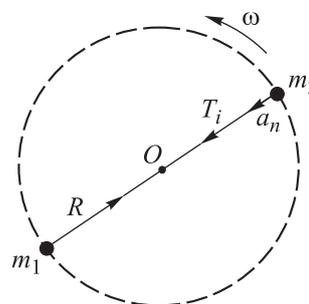


Рис. 4. Схема тросовой космической системы с двумя одинаковыми грузами

Рассмотрим вращающуюся ТКС, которая представляет собой систему, состоящую из двух грузов, соединенных абсолютно гибким невесомым тросом.

Схема вращающейся ТКС с двумя грузами представлена на рис. 4, где $m_1 = m_2$; R — радиус вращения, м. При вращении грузов вокруг центра масс системы O у каждого будет центростремительное (нормальное) ускорение a_n , направленное к центру вращения, которое может быть определено следующим образом:

$$a_n = \omega^2 R, \quad (11)$$

которое и является следствием силы, действующей на груз, т. е. силой натяжения троса, связывающей два груза:

$$T_i = \frac{m}{2} a_n = \frac{m}{2} \omega^2 R, \quad (12)$$

где $i = 1, 2$ — номер груза; m — общая масса системы, кг, $m = \frac{m_1 + m_2}{2}$.

Обобщением задачи о силе натяжения тросов является случай трех вращающихся грузов. Этот вариант интересен с практической точки зрения для осуществления маневра Гомана. Для такого маневра нужны два импульса, что соответствует последовательному разрыву двух тросов — в перигее и апогее переходного эллипса орбиты Гомана.

Рассмотрим симметричную ТКС, состоящую из трех одинаковых грузов. В этой системе угловая скорость вращения ω и радиус вращения грузов R остаются неизменными, каждый груз обладает массой $m/3$ и расположен в углах правильного треугольника. При этом возникает необходимость определить силу натяжения каждого из трех соединительных тросов [18, 19]. Так как система симметрична, силы натяжения трех тросов будут одинаковы. Величина каждой силы натяжения обозначена символом T_{ii} , где индекс $i = 1, 2, 3$ — номер груза; T_{12} — сила натяжения троса от первого груза ко второму, Н; T_{21} — сила натяжения троса от второго груза к первому, Н.

Схема симметричной вращающейся ТКС с тремя грузами представлена на рис. 5, где m — общая масса системы, кг, $m = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{2}$ (m_3 — масса третьего груза, кг, $m_1 = m_2 = m_3$); a_{ni} — центростремительное (нормальное) ускорение от одного груза к другому, m/c^2 ; R_i — радиус системы от груза до центра O , м.

Для каждого груза массой $m/3$ величина центростремительного (нормального) ускорения рассчитывается по формуле (4). Это ускорение создается двумя одинаковыми проекциями двух одинаковых сил

натяжения тросов T_i , прикрепленных к рассматриваемому грузу. Так как грузы находятся в вершинах правильного треугольника, в проекции на нормаль второй закон Ньютона записывается в виде уравнения

$$2T_i \cos 30 = \frac{m}{3} \omega^2 R. \quad (13)$$

Из уравнения (13) получаем силу натяжения каждого из трех соединительных тросов:

$$T_i = \frac{m}{3\sqrt{3}} \omega^2 R. \quad (14)$$

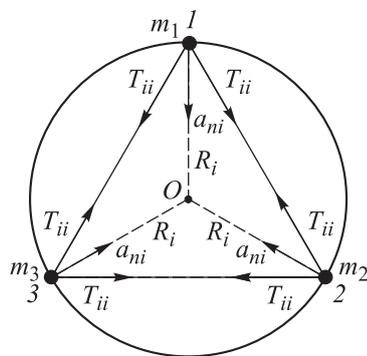


Рис. 5. Схема симметричной тросовой космической системы с тремя одинаковыми грузами 1–3

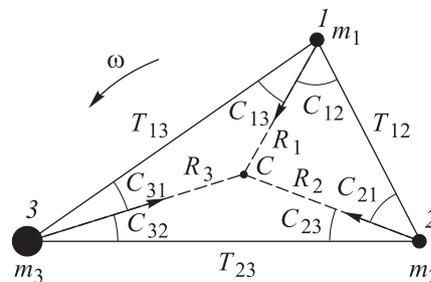


Рис. 6. Обобщенная треугольная вращающаяся тросовая система

Схема несимметричной вращающейся треугольной ТКС представлена на рис. 6. Здесь 1, 2, 3 — номера вершин произвольного треугольника; $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ — абсциссы и ординаты координат грузов, помещенных в вершины треугольника 1, 2 и 3, м; C — центр масс трех грузов, соединенных тросами, вокруг которого происходит вращение тросовой системы; R_1, R_2, R_3 — радиусы траекторий окружностей вращения грузов от центра масс C , м; $C_{12}, C_{13}, C_{21}, C_{23}, C_{31}, C_{32}$ — углы между двумя прямыми, одна из которых соединяет вершину треугольника с номером, обозначенным первой цифрой, с центром масс C , а другая содержит отрезок стороны треугольника, обозначенный первой и второй цифрами, рад; T_{12}, T_{13}, T_{23} — искомые силы натяжения тросов, расположенных по сторонам треугольника, соединяющим вершины, которые обозначены в индексах двумя цифрами, Н.

Проведем математическое моделирование для определения значений сил натяжения соединительных тросов во вращающейся системе (см. рис. 6). При этом исходными данными являются массы m_1, m_2, m_3 и координаты грузов $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$. Далее определим координаты

центра масс C системы, радиусов вращения и центростремительного ускорения для трех грузов:

$$x_C = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2 + x_3 m_3}{m_1 + m_2 + m_3}; \quad y_C = \frac{y_1 m_1 + y_2 m_2 + y_3 m_3}{m_1 + m_2 + m_3}, \quad (15)$$

$$R_i = \sqrt{(x_C - x_i)^2 + (y_C - y_i)^2}, \quad (16)$$

$$a_{ni} = \omega^2 R_i, \quad (17)$$

где x_C, y_C — абсцисса и ордината координаты центра масс трех грузов, м; $i = 1, 2, 3$.

Найдем координаты углов, показанных на рис. 6:

$$C_{12} = \frac{(x_C - x_1)(x_2 - x_1) + (y_C - y_1)(y_2 - y_1)}{\sqrt{(x_C - x_1)^2 + (y_C - y_1)^2} + \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}, \quad (18)$$

$$C_{13} = \frac{(x_C - x_1)(x_3 - x_1) + (y_C - y_1)(y_3 - y_1)}{\sqrt{(x_C - x_1)^2 + (y_C - y_1)^2} + \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}}, \quad (19)$$

$$C_{21} = \frac{(x_C - x_2)(x_1 - x_2) + (y_C - y_2)(y_1 - y_2)}{\sqrt{(x_C - x_2)^2 + (y_C - y_2)^2} + \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}, \quad (20)$$

$$C_{23} = \frac{(x_C - x_2)(x_3 - x_2) + (y_C - y_2)(y_3 - y_2)}{\sqrt{(x_C - x_2)^2 + (y_C - y_2)^2} + \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}}, \quad (21)$$

$$C_{31} = \frac{(x_C - x_3)(x_1 - x_3) + (y_C - y_3)(y_1 - y_3)}{\sqrt{(x_C - x_3)^2 + (y_C - y_3)^2} + \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2}}, \quad (22)$$

$$C_{32} = \frac{(x_C - x_3)(x_2 - x_3) + (y_C - y_3)(y_2 - y_3)}{\sqrt{(x_C - x_3)^2 + (y_C - y_3)^2} + \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}}. \quad (23)$$

Для решения системы уравнений движения трех связанных грузов методом Крамера сначала найдем главный определитель системы. Затем вычислим вспомогательные определители и используем формулы Крамера для того, чтобы определить неизвестные величины [20, 21]:

$$\begin{cases} T_{12} \cos C_{12} + T_{13} \cos C_{13} = m_1 \omega^2 R_1 \\ T_{21} \cos C_{21} + T_{23} \cos C_{23} = m_2 \omega^2 R_2 \\ T_{32} \cos C_{32} + T_{31} \cos C_{31} = m_3 \omega^2 R_3 \end{cases}; \quad \Delta = \begin{vmatrix} \cos C_{12} & 0 & \cos C_{13} \\ \cos C_{21} & \cos C_{23} & 0 \\ 0 & \cos C_{32} & \cos C_{31} \end{vmatrix}. \quad (24)$$

Поскольку главный определитель не равен нулю (все указанные углы являются острыми), система уравнений имеет единственное решение по первой части теоремы Крамера [20, 21], а определители системы можно представить следующим образом:

$$\Delta_{12} = \begin{vmatrix} m_1\omega^2 R_1 & 0 & \cos C_{13} \\ m_2\omega^2 R_2 & \cos C_{23} & 0 \\ m_3\omega^2 R_3 & \cos C_{32} & \cos C_{31} \end{vmatrix}; \quad \Delta_{13} = \begin{vmatrix} \cos C_{12} & 0 & m_1\omega^2 R_1 \\ \cos C_{21} & \cos C_{23} & m_2\omega^2 R_2 \\ 0 & \cos C_{32} & m_3\omega^2 R_3 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_{23} = \begin{vmatrix} \cos C_{12} & m_1\omega^2 R_1 & \cos C_{13} \\ \cos C_{21} & m_2\omega^2 R_2 & 0 \\ 0 & m_3\omega^2 R_3 & \cos C_{31} \end{vmatrix}. \quad (25)$$

В результате решения системы силы натяжения соединительных тросов во вращающейся системе можно представить в виде:

$$T_{12} = \frac{\Delta_{12}}{\Delta}; \quad T_{13} = \frac{\Delta_{13}}{\Delta}; \quad T_{23} = \frac{\Delta_{23}}{\Delta}. \quad (26)$$

В итоге после разрыва вращающейся ТКС, состоящей из трех грузов, один груз получает отрицательный импульс, переходит на более низкую орбиту и его движение замедляется, а оставшаяся связка из двух грузов, напротив, получает положительный импульс и переходит на более высокую орбиту. Суть заключается в обрыве троса при максимальном его натяжении, что объясняется максимальной скоростью груза в определенный момент времени. Важно учитывать, что натяжение троса постоянно изменяется при вращении, именно поэтому устанавливают датчик силы, который позволит подать команду на разъединение троса в тот момент времени, когда появится максимальная сила T натяжения троса.

Рассчитаем относительную нагрузку (в долях натяжения соединительных тросов) во вращающейся системе $T_{ii} = 0,5m\omega^2 R$ в зависимости от числа грузов n (рис. 7).

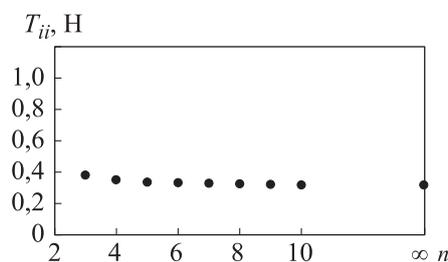


Рис. 7. Зависимость относительной нагрузки в долях натяжения соединительных тросов во вращающейся системе от числа грузов n

В таблице представлена зависимость относительной нагрузки в долях натяжения соединительных тросов во вращающейся системе T_{ii} от числа грузов n , где φ — угол между смежными сторонами многоугольника соединительных тросов во вращающейся системе, град,

$$\varphi = \frac{(n-2) \cdot 180}{n}; \alpha \text{ — угол откоса (провисания) соединительных тросов во вращающейся системе, град, } \alpha = \frac{180}{n}.$$

Таблица

Число грузов n	Угол между смежными сторонами многоугольника φ , град	Угол откоса α , град	Относительная нагрузка в долях T_{ii} , Н
2	0	90	1
3	60	60	$\frac{1}{1,5\sqrt{3}} \approx 0,385$
4	90	45	$\frac{1}{2\sqrt{2}} \approx 0,354$
5	108	36	0,340
6	120	30	$\frac{1}{3} \approx 0,333$
...
∞	180	0	$\frac{1}{\pi} \approx 0,318$

Проведенный анализ результатов математического моделирования показал, что в многомерной системе с n грузами сила натяжения тросов уменьшается при уменьшении угла их «провисания». Это указывает на необходимость дальнейшего исследования систем с большим количеством грузов. Представленные вращающиеся системы являются принципиально новым видом КА с присущими им новыми свойствами, обусловленными неинерциальностью связанной с КА системы отсчета.

Заключение. Показана возможность применения вращающихся тросовых систем для обеспечения орбитального маневра космических аппаратов. Путем разрыва троса можно одновременно переводить грузы на разные орбиты при максимальном его натяжении, что достигается за счет максимальной скорости груза в определенный момент времени. Важно учитывать, что натяжение троса постоянно

изменяется при вращении. Поэтому предлагаемая система обязательно включает датчик силы, который позволяет подать команду на разъединение троса в тот момент времени, когда сила натяжения троса станет максимальной.

В результате аналитических исследований были определены силы натяжения троса при различных конфигурациях вращающейся тросовой космической системы, которые имеют логарифмическую зависимость от числа грузов.

Преимущество вращающейся тросовой космической системы перед другими системами заключается в наличии кинетической энергии вращения, которую можно использовать для орбитального маневра. Это может способствовать сокращению потребления химического топлива и послужить основой для разработки перспективных космических аппаратов.

Проведенный анализ математического моделирования вращающейся тросовой космической системы показал, что уменьшение угла «провисания» тросов приводит к снижению силы натяжения, свидетельствует о возможности эффективного распределения нагрузок и улучшения эксплуатационных характеристик системы в целом. Дальнейшие исследования и разработки в области применения тросовых систем в космической технике открывают новые перспективы для изучения и освоения космического пространства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта по базовой части государственного задания (проект FSFF-2025-0001).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Урлич Ю.М. *Глобальные проблемы человечества и космос*. Москва, НИИКС им. А.А. Максимова, 2010, 570 с.
- [2] Акалу Й.А., Еленев Д.В., Гермамо А.Й. Применение и эксперименты по реализации космических тросовых систем. *Наука и бизнес: пути развития*, 2023, № 4 (142), с. 12–16.
- [3] Асланов В.С., Юдинцев В.В. Выбор параметров системы увода космического мусора с упругими элементами посредством тросовой буксировки. *Вестник Московского авиационного института*, 2018, т. 25, № 1, с. 7–17. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=89045>
- [4] Даниленко А.В., Елкин К.С., Лягушина С.Ц. Проект программы развития в России перспективной космической технологии — космических тросовых систем. *Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент*, 2016, т. 21, № 1 (42), с. 90–95.
- [5] Кульков В.М., Егоров Ю.Г., Тузиков С.А., Фирсюк С.О. Особенности построения малоразмерных космических электродинамических тросовых систем. *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2019, № 3, с. 52–67. DOI: 10.1134/S0002331019030117

- [6] Заболотнов Ю.М. Управление развертыванием орбитальной тросовой системы, состоящей из двух малых космических аппаратов. *Космические исследования*, 2017, т. 55, № 3, с. 236–246. DOI: 10.7868/S002342061702008X
- [7] Дон Ч. Анализ динамики и управление движением низкоорбитальной космической тросовой системы. *Вестник Московского авиационного института*, 2018, т. 25, № 1, с. 84–91.
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=89856>
- [8] Кульков В.М., Фирсюк С.О., Юров А.М., Тузиков С.А., Егоров Ю.Г., Юн Сон Ук. Принципы построения и области применения малых космических аппаратов на базе унифицированных космических платформ. *Космические аппараты и технологии*, 2022, т. 6, № 2 (40), с. 133–143.
DOI: 10.26732/j.st.2022.2.08
- [9] Акимов А., Гриценко А., Степанов А., Чазов В. Особенности построения и эксплуатации орбитальных группировок систем спутниковой связи. *Спутниковая связь и вещание*, 2016, с. 72–87.
- [10] Кульков В.М. Анализ проектных параметров и исследование режимов управления орбитальным движением электродинамической тросовой системы. *Вестник Московского авиационного института*, 2011, т. 18, № 2, с. 41–46. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=26075>
- [11] *ГОСТ 2172–80. Канаты стальные авиационные. Технические условия.* Москва, Стандартинформ, 1982, 4 с.
- [12] Волошенюк О.Л., Пироженко А.В., Храмов Д.А. Космические тросовые системы — перспективное направление космической техники и технологии. *Космическая наука и технология*, 2011, т. 17, № 2, с. 32–34.
- [13] Заболотнов Ю.М., Ледкова Т.А. Моделирование и анализ движения космической тросовой системы на окололунной орбите. *Сб. тр. по мат. VI Междунар. конф. и молодежной школы, г. Самара, 26–29 мая 2020 г.* В 4 т. Самара, Изд-во Самар. ун-та, 2020. Т. 3. *Математическое моделирование физико-технических процессов и систем*, с. 565–573.
- [14] *ГОСТ 3241–91. Канаты стальные. Технические условия.* Москва, Изд-во стандартов, 1992, 18 с.
- [15] Ismail N.A., Cartmell M.P. Three dimensional dynamics of a flexible Motorised Momentum Exchange Tether. *Acta Astronautica*, 2016, vol. 120, pp. 87–102.
DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.12.001
- [16] Иванов В.А., Ручинская Е.В., Ручинский В.С. Математическое моделирование транспортных операций в космосе с использованием тросовых систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 3 (80), с. 119–123.
- [17] Кульков В.М., Егоров Ю.Г., Тузиков С.А. Исследование конфигурации и формирование проектного облика развернутой электродинамической тросовой системы в составе орбитальных космических аппаратов. *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2018, № 3, с. 119–130.
DOI: 10.7868/S0002331018030123
- [18] Иванов В.А., Купреев С.А., Ручинский В.С. Анализ возможности реализации орбитальной тросовой системой функции атмосферного тормозного устройства. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 5 (77).
DOI: 10.18698/2308-6033-2018-5-1764
- [19] Лаптев Е.В. Метод учета характеристик троса при моделировании движения орбитальной тросовой системы. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета)*, 2010, № 2 (22), с. 34–38.

- [20] Ван Ч., Заболотнов Ю.М. Анализ динамики формирования тросовой группировки из трех наноспутников с учетом их движения вокруг центров масс. *Прикладная математика и механика*, 2021, т. 85, № 1, с. 21–43.
DOI: 10.31857/S0032823521010082
- [21] Орлов А.Л., Лобачев В.И. Основные проблемы управления тросовой системой в космосе. *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник*, 2012, № 6, с. 9–13.

Статья поступила в редакцию 29.05.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Екимовская А.А., Ермаков В.Ю., Туфан А. Исследование вращающейся тросовой системы в зависимости от силы натяжения троса. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 10. EDN TDCCMG

Екимовская Анна Алексеевна — техник кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: any_ekimovskaya03@mail.ru

Ермаков Владимир Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: v_ermakov2003@mail.ru

Туфан Ант — ассистент кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: anttufan@gmail.com

Study of a rotating tethered space system depending on the tether tension force

© A.A. Ekimovskaya, V.Yu. Ermakov, A. Tufan

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 125993, Russian Federation

The paper considers potential introduction of a tethered space system for the small spacecraft orbital maneuvering and Earth re-entry in the event chemical fuel is unavailable. It takes into account various configurations including a rotating system with two identical payloads, as well as the symmetrical and asymmetrical systems with three identical payloads. A mathematical model is developed for the tether tension force determination, taking into account alteration in the mass and geometric characteristics. The tethered space systems are mathematically simulated using the specially developed software and algorithms. The paper studies the effect of the number of connecting cables in a structure on the tension force and sagging angles making it possible to assess preliminary efficiency of the proposed tethered space system schemes.

Keywords: *tethered space system, small spacecraft, Hohmann orbital transfer, tether tension force, artificial gravity*

The work was performed with financial support provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the basic part of the State Assignment (Project FSFF-2025-0001).

REFERENCES

- [1] Menshikov V.A., Perminov A.N., Urlich Yu.M. *Globalnye problemy chelovechestva i kosmos* [Global problems of humanity and outer space]. Moscow, NIIKS im. A.A. Maksimova Publ., 2010, 570 p.
- [2] Akalu Y.A., Elenev D.V., Germamo A.Y. *Primenenie i eksperimenty po realizatsii kosmicheskikh trosovykh sistem* [Application and experiments for the implementation of space tether systems]. *Nauka i biznes: puti razvitiya — Science and Business: Development Ways*, 2023, no. 4 (142), pp. 12–16.
- [3] Aslanov V.S., Yudin V.V. *Vybor parametrov sistemy uvoda kosmicheskogo musora s uprugimi elementami posredstvom trosovoy buksirovki* [Parameters selection for a space debris removal system with elastic elements by the tether towing]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 7–17. Available at: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=89045>
- [4] Danilenko A.V., Elkin K.S., Lyagushina S.C. *Proekt programmy razvitiya v Rossii perspektivnoy kosmicheskoy tekhnologii — kosmicheskikh trosovykh sistem* [Project of a program of development in Russia of a prospective space technology – space tether systems]. *Aktualnye problemy aviatsionnykh i aérokosmicheskikh sistem: protsessy, modeli, eksperiment — Actual Problems of Aviation and Aerospace Systems: Processes, Models, Experiment*, 2016, vol. 21, no. 1 (42), pp. 90–95.
- [5] Kulkov V.M., Egorov Yu.G., Tuzikov S.A., Firsyuk S.O. *Osobennosti postroeniya malorazmernykh kosmicheskikh elektrodinamicheskikh trosovykh sistem* [Peculiarities of design for small-size space electrodynamic tether systems].

- Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika — Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics*, 2019, no. 3, pp. 52–67.
<https://doi.org/10.1134/S0002331019030117>
- [6] Zabolotnov Y.M. Upravlenie razvertyvaniem orbitalnoy trosovoy sistemy, sos-toyashchey iz dvukh malykh kosmicheskikh apparatov [Control over deployment of an orbital tether system that consists of two small spacecraft]. *Kos-micheskije issledovaniya — Cosmic Research*, 2017, vol. 55, no. 3, pp. 236–246.
<https://doi.org/10.7868/S002342061702008X>
- [7] Don Ch. Analiz dinamiki i upravlenie dvizheniem nizkoorbitalnoy kosmich-eskoy trosovoy sistemy [Analysis of dynamics and motion control of low-orbital space tether system]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 84–91. Available at:
<https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=89856>
- [8] Kulkov V.M., Firsyuk S.O., Yurov A.M., Yun Son Uk. Printsipy postroeniya i oblasti primeneniya malykh kosmicheskikh apparatov na baze unifikirovannykh kosmicheskikh platform [Principles of construction and application areas of small spacecraft based on unified space platforms]. *Kosmicheskije apparaty i tekhnologii — Spacecrafts & Technologies*, 2022, vol. 6, no. 2 (40), pp. 133–143.
<https://doi.org/10.26732/j.st.2022.2.08>
- [9] Akimov A., Gritsenko A., Stepanov A., Chazov V. Osobennosti postroeniya i ekspluatatsii orbitalnykh gruppirovok sistem sputnikovoy svyazi [Features of construction and operation of the orbital constellation of satellite communication systems]. *Sputnikovaya svyaz i veshchanie*, 2016, pp. 72–87.
- [10] Kulkov V.M. Analiz proektnykh parametrov i issledovanie rezhimov upravleni-ya orbitalnym dvizheniem elektrodinamicheskoy trosovoy sistemy [Electrody-namics tether system design parameter analysis and orbit motion control modes investigation]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta – Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no 2, pp. 41–46. Available at:
<https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=26075>.
- [11] *GOST 2172–80. Kanaty stalnye aviatsionnye. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 2172–80. Steel aircraft ropes. Technical requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 1982, 4 p.
- [12] Voloshenyuk O.L., Pirozhenko A.V., Khramov D.A. Kosmicheskije trosovye sis-temy — perspektivnoe napravlenie kosmicheskoy tekhniki i tekhnologii [Space tethers as a perspective direction of space technique and technology]. *Kosmich-eskaya nauka i tekhnologiya — Space Science and Technology*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 32–34.
- [13] Zabolotnov Yu.M., Ledkova T.A. Modelirovanie i analiz dvizheniya kosmich-eskoy trosovoy sistemy na okololunnoy orbite [Simulation and analysis of the space tethered system motion in a lunar orbit]. *Sb. tr. po mat. VI Mezhdunar. konf. i molodezhnoy shkoly, Samara, 26–29 maya 2020 g. V 4 t. T. 3. Ma-tematicheskoe modelirovanie fiziko-tekhnicheskikh protsessov i sistem* [Collec-tion of works on materials of the VI International Conference and Youth School, Samara, May 26–29, 2020. In 4 vol. Vol. 3. Mathematical simulation of physical and technical processes and systems]. Samara, Samarskiy Un-t Publ., pp. 565–573.
- [14] *GOST 3241–91. Kanaty stalnye. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 3241–91. Steel ropes. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1992, 18 p.
- [15] Ismail N.A., Cartmell M.P. Three dimensional dynamics of a flexible Motorised Momentum Exchange Tether. *Acta Astronautica*, 2016, vol. 120, pp. 87–102.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.12.001>
- [16] Ivanov V.A., Ruchinskaya E.V., Ruchinskiy V.S. Matematicheskoe modeliro-vanie transportnykh operatsiy v kosmose s ispolzovaniem trosovykh sistem

- [Mathematical simulation transport operations in space using cable systems.]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Priborostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2010, no. 3 (80), pp. 119–123.
- [17] Kulkov V.M. Egorov Yu.G., Tuzikov S.A. Issledovanie konfiguratsii i formirovanie proektnogo oblika razvernutoy elektrodinamicheskoy trosovoy sistemy v sostave orbitalnykh kosmicheskikh apparatov [Study of configuration and creation of a concept design for the deployed space electrodynamic tether system as a part of the orbital spacecraft]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika — Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics*, 2018, no. 3, pp. 119–130. <https://doi.org/10.7868/S0002331018030123>
- [18] Ivanov V.A., Kupreev S.A., Ruchinskiy V.S. Analiz vozmozhnosti realizatsii orbitalnoy trosovoy sistemoy funktsii atmosfernogo tormoznogo ustroystva [The analysis of possibility of performing the function of the atmospheric braking device by orbital tether system]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 5 (77). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-5-1764>
- [19] Laptev E.V. Metod ucheta kharakteristik trosa pri modelirovanii dvizheniya orbitalnoy trosovoy sistemy [Tether parameters consideration during motion simulation of orbital tether system]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolyova (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta) — Vestnik of Samara State University*, 2010, no. 2 (22), pp. 34–38.
- [20] Van Ch., Zabolotnov Yu.M. Analiz dinamiki formirovaniya trosovoy gruppirovki iz trekh nanosputnikov s uchetom ikh dvizheniya vokrug tsentrov mass [Analysis of the dynamics of the formation of a tether group of three nanosatellites taking into account their movement around the centers of mass]. *Prikladnaya matematika i mekhanika – Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2021, vol. 85, no. 1, pp. 21–43. <https://doi.org/10.31857/S0032823521010082>
- [21] Orlov A.L., Lobachev V.I. Osnovnye problemy upravleniya trosovoy sistemoy v kosmose [The main problems of controlling a tether system in space]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa-Lesnoy vestnik — Forestry Bulletin*, 2012, no. 6, pp. 9–13.

Ekimovskaya A.A., Technician, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, Moscow Aviation Institute (National Research University).
e-mail: any_ekimovskaya03@mail.ru

Ermakov V.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, Moscow Aviation Institute (National Research University).
e-mail: v_ermakov2003@mail.ru

Tufan Ant, Assistant, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: anttufan@gmail.com