



Ч. Дон<sup>1</sup>, Ч. Ван<sup>2</sup>, Ю.М. Заболотнов<sup>1</sup>

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ НА НИЗКОЙ ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ

(<sup>1</sup>Самарский университет)

(<sup>2</sup>Северо-западный политехнический университет, г.Сиань, КНР)

Рассматривается задача стабилизации движения космической тросовой системы (КТС) на низкой околоземной орбите. Стабилизация движения системы в заданном диапазоне высот осуществляется с помощью корректирующего реактивного двигателя, расположенного на базовом космическом аппарате. Математическое моделирование движения системы проводится по математической модели с распределенными параметрами, в которой трос представляется совокупностью материальных точек.

Космическая тросовая система (КТС) состоит из базового и малого космических аппаратов (БКА и МКА), и соединяющего их троса. МКА представляет собой атмосферный зонд, надувной или складной конструкции, имеющий увеличенный баллистический коэффициент. Зонд может быть использован, например, для мониторинга верхних слоев атмосферы.

При записи уравнений движения КТС с растяжимым тросом используются следующая совокупность систем координат  $OXYZ$ ,  $OX_oY_oZ_o$ ,  $Cx_o y_o z_o$ ,  $Cx_t y_t z_t$ . Геоцентрическая правая система координат  $OXYZ$  связана с плоскостью орбиты центра масс системы  $C$ , где ось  $OX$  направлена по линии узлов, ось  $OZ$  – по направлению вектора кинетического момента его орбитального движения. Геоцентрическая подвижная орбитальная система координат  $OX_oY_oZ_o$  вращается относительно системы координат  $OXYZ$  с угловой скоростью  $\dot{u} = du / dt$ , где  $u$  – аргумент широты. Оси орбитальных подвижных систем координат  $OX_oY_oZ_o$  и  $Cx_o y_o z_o$  параллельны и отличаются только положением начал координат. Система координат  $Cx_t y_t z_t$  связана с линией, соединяющей концевые тела. Положение системы координат  $Cx_t y_t z_t$  относительно системы координат  $Cx_o y_o z_o$  определяется углами  $\theta$  и  $\beta$  (рисунок 1).

Математическая модель движения КТС с распределенными параметрами представляет собой механическую систему, в которой трос рассматривается как совокупность  $n$  материальных точек, соединенными упругими односторонними связями. В этом случае уравнения движения КТС записываются в виде [1]

$$\frac{d\mathbf{r}_k}{dt} = \mathbf{V}_k, \quad m_k \frac{d\mathbf{V}_k}{dt} = \mathbf{G}_k + \mathbf{R}_k + \mathbf{T}_k - \mathbf{T}_{k-1} \quad (1)$$

где  $\mathbf{r}_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) – радиус-вектора БКА ( $k = 1$ ), материальных точек троса ( $k = 2, 3, \dots, n-1$ ) и МКА ( $k = n$ ),  $m_k = \frac{m_t}{n-2}$  ( $k = 2, 3, \dots, n-1$ ) – масса материальной точки троса,  $m_t$  – суммарная масса троса,  $n$  – количество точек,  $\mathbf{V}_k$  – абсо-



плотные скорости,  $\mathbf{G}_k = -K \frac{m_k \mathbf{r}_k}{r_k^3}$ ,  $K$  – гравитационный параметр Земли,  $\mathbf{R}_k$  – вектора аэродинамических сил, приложенные к  $k$  – ой точке. Причем на крайние точки действует только одна сила натяжения, то есть  $\mathbf{T}_0 = \mathbf{T}_n = 0$ .

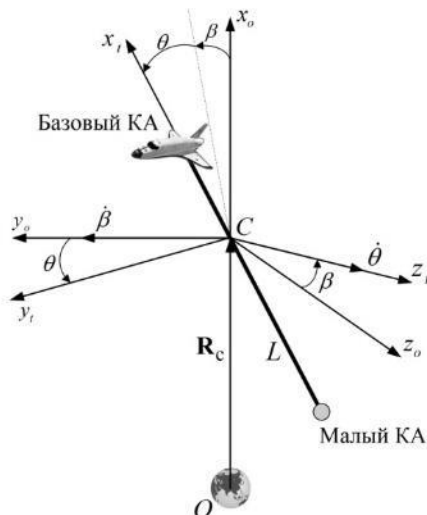


Рис. 1 Взаимное положение систем координат  $Cx_0y_0z_0$  и  $Cx_t y_t z_t$

Силы натяжения  $\mathbf{T}_k$  между точками системы определяются по закону Гука с односторонними механическими связями

$$\mathbf{T}_k = T_k \frac{\mathbf{r}_{k+1} - \mathbf{r}_k}{|\mathbf{r}_{k+1} - \mathbf{r}_k|}, \quad (k = 1, 2, \dots, n-1) \quad (2)$$

$$T_k = \begin{cases} c \frac{|\mathbf{r}_{k+1} - \mathbf{r}_k| - \Delta L_k}{\Delta L_k}, & \text{if } |\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{k+1}| - \Delta L_k \geq 0 \\ 0, & \text{if } |\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{k+1}| - \Delta L_k < 0 \end{cases} \quad (3)$$

где  $\Delta L_k$  – нерастянутая длина  $k$  – ого участка троса,  $c$  – жесткость троса.

Особенностью математической модели (1) по сравнению с известными моделями [1, 2] является наличие аэродинамических сил, существенно влияющих на движение низкоорбитальных КТС. Аэродинамические силы, действующие на участки троса после его дискретизации, вычисляются из выражений [3]

$$\mathbf{R}_{c,k} = -\frac{1}{2} c_t \rho D_t \Delta L_k V_{c,k} \mathbf{V}_{c,k} |\sin(\alpha_k)|, \quad (k = 1, 2, \dots, n-1) \quad (4)$$

где  $\mathbf{V}_{c,k}$  – скорость центра  $k$  – ого участка троса (цилиндра) относительно атмосферы,  $c_t$  – коэффициент аэродинамического сопротивления ( $c_t = 2.2$ ),  $\alpha_k$  – угол атаки  $k$  – ого цилиндра. Плотность атмосферы  $\rho$  соответствует ГОСТ 25645.101–83.

Скорость центра участка троса и его угол атаки определяются по формулам

$$\mathbf{V}_{c,k} = \frac{\mathbf{V}_{r,k} + \mathbf{V}_{r,k+1}}{2}, \quad \cos \alpha_k = \frac{(\mathbf{r}_{k+1} - \mathbf{r}_k) \cdot \mathbf{V}_{c,k}}{|\mathbf{r}_{k+1} - \mathbf{r}_k| V_{c,k}}, \quad (k = 1, 2, \dots, n-1) \quad (5)$$



где  $\mathbf{V}_{r,k}$  – скорости точек относительно атмосферы.

Тогда для точек троса и для концевых тел аэродинамические силы вычисляются следующим образом

$$\mathbf{R}_k = \frac{(\mathbf{R}_{c,k-1} + \mathbf{R}_{c,k})}{2}, (k = 2, 3, \dots, n-1) \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_1 = -\frac{1}{2}c_1\rho_1S_1|\mathbf{V}_{r,1}|\mathbf{V}_{r,1} + \frac{\mathbf{R}_{c,1}}{2}, \mathbf{R}_n = -\frac{1}{2}c_n\rho_nS_n|\mathbf{V}_{r,n}|\mathbf{V}_{r,n} + \frac{\mathbf{R}_{c,n-1}}{2} \quad (7)$$

Абсолютные и относительные скорости концевых тел и материальных точек троса связаны следующим соотношением

$$\mathbf{V}_{r,k} = \mathbf{V}_k - \boldsymbol{\Omega}_e \times \mathbf{r}_k, (k = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

где  $\boldsymbol{\Omega}_e$  – вектор угловой скорости вращения Земли.

При моделировании процесса стабилизации КТС в соответствии с уравнениями (1) были приняты следующие исходные данные: конечная длина троса  $L_{\text{end}} = 30$  км, линейная плотность материала троса  $\rho_t = 0.2$  кг/км, жесткость троса  $c = 7070$  н, коэффициенты сил аэродинамического сопротивления БКА и МКА  $c_k = 2.4$  ( $k = 1, n$ ), баллистические коэффициенты БКА и МКА  $\sigma_1 = 3.016 \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/кг,  $\sigma_n = 0.015$  м<sup>2</sup>/кг, начальная масса БКА  $m_1^0 = 2500$  кг ( $m_1^0 = m_1 + m_t$ ,  $m_t$  – масса троса). МКА представляет собой тело, близкое к сфере радиуса 1 м и массой 20 кг. В качестве примера использовался корректирующий двигатель ЖРДМТ 11Д428АФ-16 [4]. Параметры двигателя: тяга и удельный импульс  $F_{D \text{ max}} = 157$  н и  $I = 3002$  м/с.

На рис.2 показаны изменение высот полета БКА и МКА в процессе стабилизации.

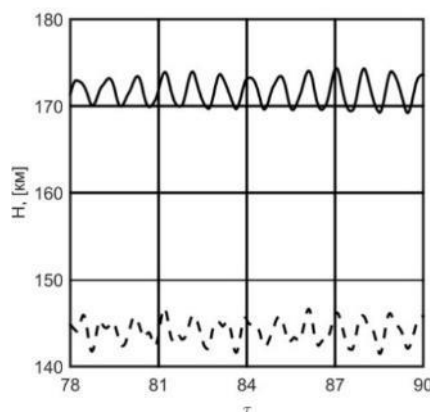


Рис. 2

Периодическое включение двигателя, тяга которого направлена противоположно скорости БКА относительно атмосферы, позволяет поддерживать высоту полета БКА (сплошная линия) и МКА (штриховая линия) в заданном диапазоне (на рис. 2  $\tau = t/t_p$  – безразмерное время,  $t_p$  – период движения системы по начальной круговой орбите). Периодическое включение и выключение



двигателя происходит при уменьшении высоты полета БКА (или большой полуоси орбиты) до 170 км и при достижении высоты 173 км.

Таким образом, использование корректирующего двигателя на БКА, тяга которого направлена противоположно относительной скорости его движения, позволяет обеспечить стабилизацию полета КТС в заданном диапазоне высот.

### Литература

1. Zabolotnov, Yu. Introduction to Dynamics and Control in Space Tether System. Beijing: Science Press, 2013. 140 p.
2. Дон, Ч. Анализ динамики развёртываемой космической тросовой системы с атмосферным зондом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4 (4). С. 726-732.
3. Белецкий, В.В. Динамика космических тросовых систем. М.: Наука, 1990. 336 с.
4. Егорычев, В.С. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги и их характеристики. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2010. 99 с.

Н.В. Ефимушкина

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ ПРЯМОГО ДОСТУПА В ПАМЯТЬ КОМПЬЮТЕРА

(Самарский государственный технический университет)

*Аннотация:* Описывается подход к разработке имитационной модели подсистемы прямого доступа в память современных компьютеров. Моделирующая программа позволяет исследовать типовую структуру этой подсистемы и режимы ее работы. В ней для обеспечения наглядности применяются принципы анимации.

*Ключевые слова:* имитация, процессор, память, прямой доступ, внешнее запоминающее устройство, контроллер.

### Введение

Общеизвестно, что современные компьютеры имеют сложную структуру и режим функционирования. Для их исследования используются методы теории вычислительных систем (ВС) [1 - 3]: аналитические, имитационные и экспериментальные. Наиболее достоверные результаты позволяют получить эксперименты непосредственно над объектом в реальных или специально созданных условиях. Высокая сложность компьютеров и их подсистем, а также огромные скорости протекания процессов в них ограничивают применение экспериментальных методов для исследования и обучения. Аналитические модели имеют невысокую сложность, но характеризуются большими погрешностями.

### Формулировка проблемы