

Лаптев Е. В., Божко Н. Р.

### КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫПУСКОМ ТРОСА ПРИ РАЗВЕРТЫВАНИИ ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается орбитальная тросовая система (ОТС), состоящая из базового КА, отделяемого груза (ОГ) и связывающего их гибкого троса. Под развёртыванием ОТС понимается процесс, состоящий в отделении от базового КА массой  $m_0$  ОГ массой  $m_1$  с некоторой начальной относительной скоростью и последующем управлении их относительным движением посредством управления выпуском троса. Способы управления при этом, как известно, разделяются на кинематический и динамический. Вследствие того, что управление динамическим способом, как показано в работе [1], носит неустойчивый характер, в данной работе рассмотрены кинематические законы управления.

В качестве управляющего параметра в них используется скорость выпуска троса. Уравнение управления может быть представлено в виде следующего дифференциального соотношения

$$\dot{L} = V_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина выпущенного троса,  $V_{\text{тр}}$  – скорость выпуска троса.

Наиболее простым является закон управления с постоянной скоростью, в котором

$$V_{\text{тр}} = C, \quad (2)$$

где  $C = \text{const}$ , а его графическая иллюстрация показана на рисунке 1.

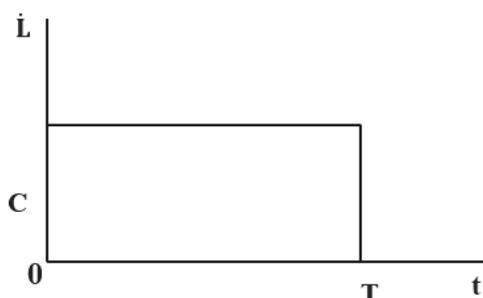


Рисунок 1 – Закон управления с постоянной скоростью

Длина выпущенного троса при этом изменяется по линейному закону, а полное время развёртывания ОТС ( $T$ ) определяется из соотношения

$$T = L_{\text{п}}/V_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где  $L_{\text{п}}$  – полная длина выпущенного троса.

Однако, несмотря на относительную простоту, закон управления с постоянной скоростью обладает рядом недостатков, наиболее существенным из которых является скачкообразное изменение скорости выпуска троса в начальный и конечный моменты, что

создаёт опасность его обрыва. Кроме того, для обеспечения натяжения троса величина импульса отделения ОГ от КА ( $\Delta V_{отд}$ ) должна удовлетворять условию

$$\Delta V_{отд} \geq V_{тр}, \quad (4)$$

что не всегда приемлемо и технически реализуемо, особенно, при достаточно большой массе ОГ.

С целью устранения отмеченных недостатков для управления развёртыванием ОТС целесообразно использовать кусочно-линейный или синусоидальный законы управления.

Уравнения кусочно-линейного закона управления можно представить в виде

$$\begin{aligned} V_{тр} &= \frac{B_m}{t_1} t && \text{при } 0 \leq t < t_1, \\ V_{тр} &= B_m && \text{при } t_1 \leq t \leq t_2, \\ V_{тр} &= \frac{B_m}{t_2 - T} (t - T) && \text{при } t_2 \leq t < T, \end{aligned} \quad (5)$$

$$t_1 = k_1 T, \quad t_2 = (1 - k_2) T, \quad k_1 + k_2 \leq 1,$$

где  $t$  - текущее время, отсчитываемое от момента отделения ОГ от КА;  $t_1, t_2$  - времена достижения характерных точек;  $T$  - полное время развёртывания ОТС;  $B_m$  - максимальная скорость выпуска троса. Графическая иллюстрация закона показана на рисунке 2.

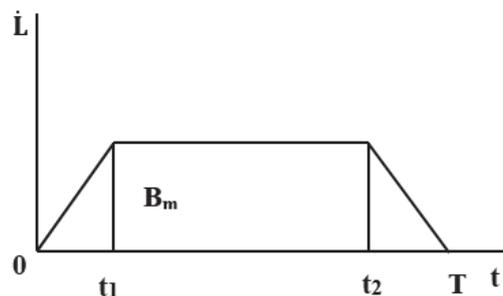


Рисунок 2 – Кусочно-линейный закон управления

Полное время развёртывания ОТС и времена достижения характерных точек связаны с полной длиной выпускаемого троса и параметрами закона управления соотношениями

$$\begin{aligned} L_{п} &= \frac{1}{2} B_m T (2 - k_1 - k_2), \\ T &= \frac{2L_{п}}{B_m (2 - k_1 - k_2)}, \end{aligned} \quad (6)$$

из которых следует, что кусочно-линейный закон управления (5) полностью определяется заданием параметров  $B_m, k_1$  и  $k_2$ , т. е.

$$V_{тр} = V(B_m, k_1, k_2). \quad (7)$$

Уравнение синусоидального закона управления записывается в виде (рисунок 3):

$$V_{тр} = A_m \sin \frac{\pi}{T} t, \quad (8)$$

где  $A_m$  - максимальная скорость выпуска троса.

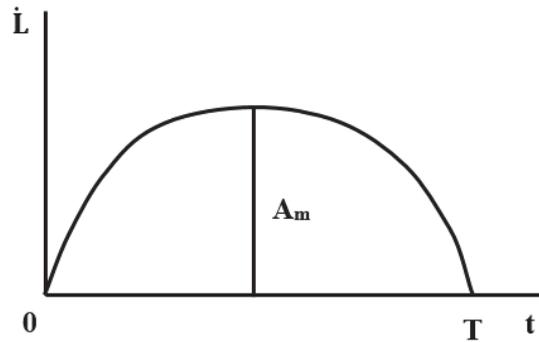


Рисунок 3 – Синусоидальный закон управления

Полное время развёртывания ОТС связано с полной длиной выпускаемого троса соотношениями

$$L_{\pi} = \frac{2TA_m}{\pi}, \quad T = \frac{\pi L_{\pi}}{2A_m}, \quad (9)$$

из которых следует, что синусоидальный закон можно представить в виде

$$V_{\text{тр}} = A_m \text{Sin} \frac{2A_m}{L_{\pi}} t. \quad (10)$$

При использовании кусочно-линейного или синусоидального законов управления скорость выпуска троса изменяется плавно и непрерывно от нулевого значения в начале и до нулевого значения в конце выпуска троса, что позволяет исключить опасность его обрыва и производить отделение ОГ от КА с малыми импульсами независимо от их массы.

Синусоидальный закон управления, кроме того, может быть приведён к виду, в котором в качестве аргумента используется не текущее время, а текущая длина выпущенного троса, что может существенно упростить процесс управления. Скорость выпуска троса в этом случае будет связана с его текущей длиной ( $L$ ) соотношением

$$V_{\text{тр}} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2L}{L_{\pi}}\right)^2}. \quad (11)$$

Для оценки рассматриваемых законов управления проведено численное моделирование процесса развёртывания ОТС при различных значениях параметров отделения ОГ от КА и законов управления. При этом принято: орбита КА круговая с высотой  $H_{\text{кр}} = 350$  км; масса КА  $m_0 = 6000$  кг; масса ОГ  $m_1 = 100$  кг; полная длина выпускаемого троса  $L_{\pi} = 30000$  м; трос невесомый и нерастяжимый. Моделирование проведено методом раздельного пошагового интегрирования уравнений движения объектов ОТС, описание которого приведено в [2].

Положение ОГ определяется в орбитальной системе координат (ОСК) с началом в центре масс КА его координатами ( $X, Y, Z$ ) или длиной ( $R$ ) отрезка, соединяющего центры масс ОГ и КА, и его угловым положением в плоскости орбиты и относительно плоскости

орбиты, определяемым углами  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно (рисунок 4).

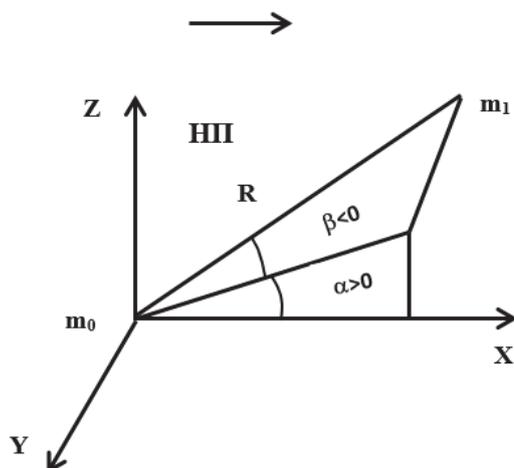


Рисунок 4 – Орбитальная система координат и положение ОГ в ОСК

Результаты моделирования развёртывания ОТС при выпуске троса с постоянной скоростью представлены на рисунках 5-8.

На рисунках 5 и 6 приведены траектории движения ОГ в ОСК и изменение его углового положения в плоскости орбиты в зависимости от времени и направления его отделения от КА, а на рисунках 7 и 8 – траектории движения ОГ в ОСК и изменение его отклонений от местной вертикали в зависимости от времени и скорости выпуска троса. Аналогичный характер носят указанные зависимости при выпуске троса по кусочно-линейному и синусоидальному законам управления.

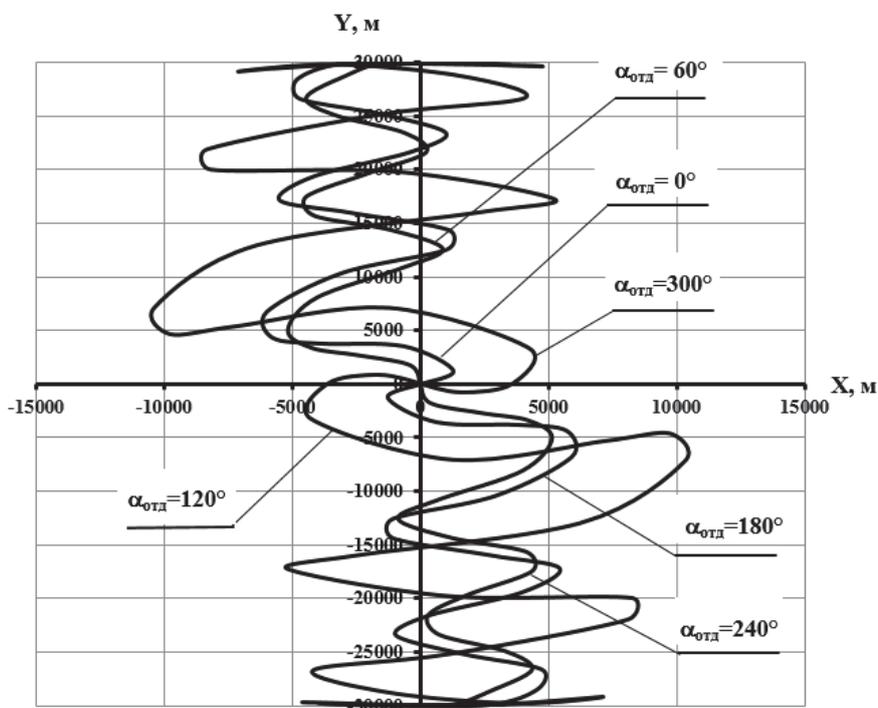


Рисунок 5 - Траектории движения ОГ в плоскости орбиты КА в зависимости от направления отделения ОГ от КА при выпуске троса с постоянной скоростью ( $\Delta V_{отд}=3$  м/с)

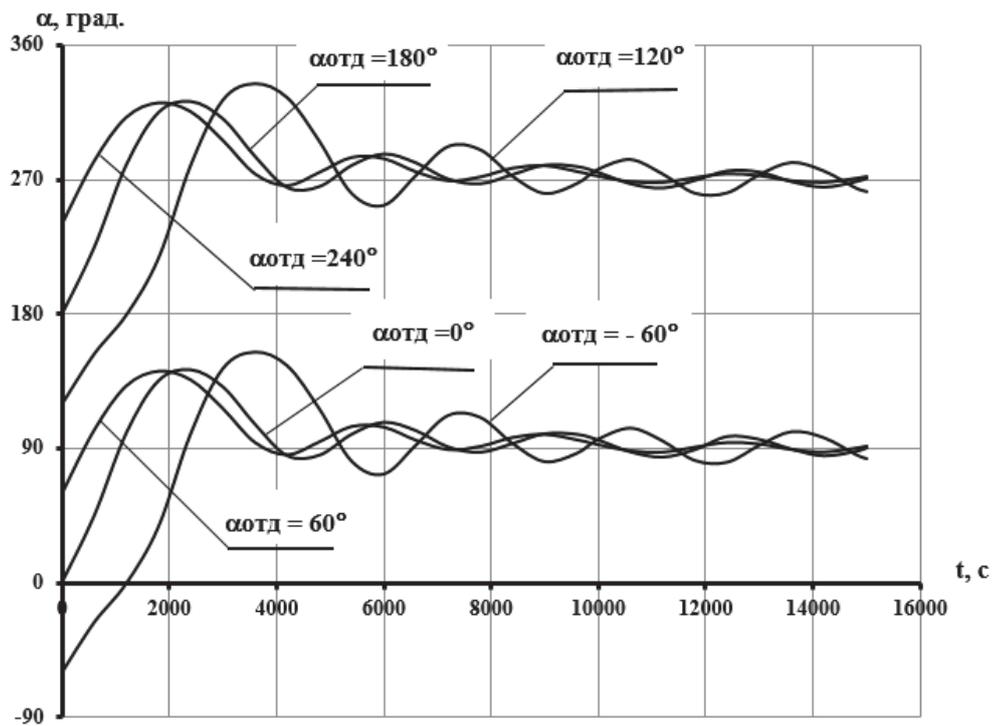


Рисунок 6 - Изменение углового положения ОГ в плоскости орбиты КА от времени и угла отделения ОГ от КА при выпуске троса с постоянной скоростью  $V_{тр}=3\text{м/с}$

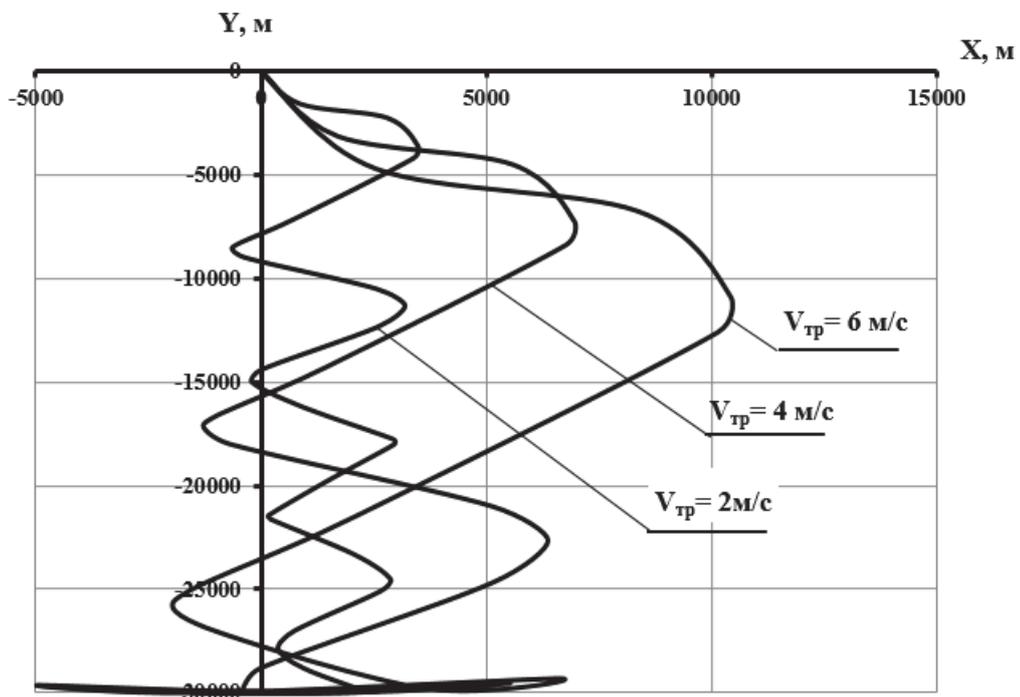


Рисунок 7 - Траектории движения ОГ в плоскости орбиты КА в зависимости от скорости выпуска троса ( $\alpha_{отд}=240^\circ$ )

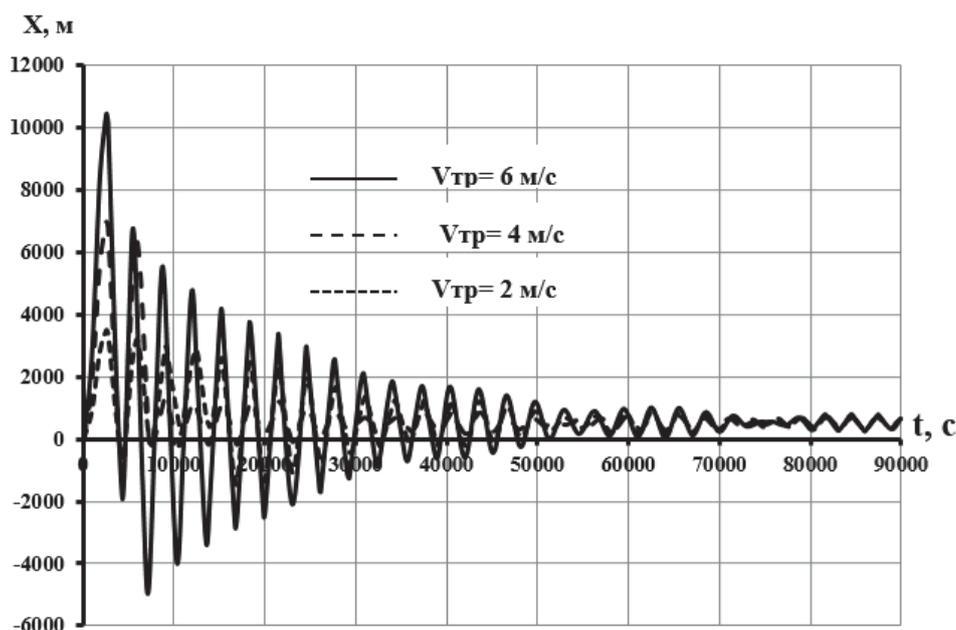


Рисунок 8 - Изменение отклонений ОГ относительно местной вертикали от времени и скорости выпуска троса ( $\alpha_{отд}=240^\circ$ )

Проведённое моделирование и полученные результаты позволяют утверждать, что при любом кинематическом законе управления выпуском троса при развёртывании ОТС имеют место следующие закономерности:

- в зависимости от направления отделения ОГ от КА развёртывание ОТС может происходить либо вверх, либо вниз к местной вертикали;
- в процессе развёртывания ОГ совершает колебания относительно местной вертикали, частота и амплитуда которых зависят от параметров закона управления;
- после окончания выпуска троса колебания ОГ переходят в затухающие, в результате которых ОТС стремится занять стационарное относительно местной вертикали положение.

#### Библиографический список

- 1 Лаптев Е.В. Исследование влияния способа управления выпуском троса на процесс развёртывания орбитальной тросовой системы. Сборник научных трудов XVI Всероссийского семинара по управлению движением и навигации ЛА. Самара, 18-20 июня 2013 г., ч.1., 2013 г. С. 68-72.
- 2 Лаптев Е.В. Метод отдельного пошагового моделирования движения орбитальной тросовой системы. Сборник научных трудов XIV Всероссийского семинара по управлению движением и навигации ЛА. Самара, 8-10 июня 2009 г., ч.1., 2011 г. С. 148-151.