

УДК 629.78

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ РАЗВЕРТЫВАНИЕМ  
ОТС С УЧЁТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА СКОРОСТЬ ВЫПУСКА ТРОСА**

Сюй Сяое, Фадеев П. В., Ишков С. А.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика  
С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), г. Самара

В процессе развёртывания орбитальной тросовой системы (ОТС) скорость выпуска троса может достигать значений 25 – 30 м/сек, что является большим значением [1, 2]. При этом могут возникнуть различные аварийные ситуации. Ставится задача ограничения скорости выпуска троса во избежание аварийных ситуаций.

В настоящей работе решается задача синтеза закона управления натяжением троса, ограничивающим скорость выпуска троса до безопасных 10 – 15 м/сек.

Рассматривается следующая математическая модель развёртывания ОТС:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= V_{\theta}, \\ \dot{V}_{\theta} &= -\frac{2(V_{\theta} + \omega)V_r}{r} - \frac{3\omega^2 \sin \theta \cos \theta}{k}, \\ \dot{r} &= V_r, \\ \dot{V}_r &= r \left[ (V_{\theta} + \omega)^2 + \frac{\omega^2 (3 \cos^2 \theta - 1)}{k} \right] - \frac{T}{m_A}, \\ \dot{\vartheta} &= \mu^{1/2} p^{-3/2} k^2, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $r$  – длина троса,  $\theta$  – угол отклонения субспутника от линии местной вертикали,  $V_r$  – скорость выпуска троса,  $V_{\theta}$  – скорость изменения угла отклонения троса от линии местной вертикали,  $T$  – натяжение троса,  $m_A$  – масса субспутника,  $\vartheta$  – угол истинной аномалии БКА,  $k = 1 + e \cdot \cos \vartheta$ ,  $e, p$  – эксцентриситет и фокальный параметр орбиты БКА,  $\mu$  – гравитационный параметр Земли.

Параметрическая программа управления натяжением троса, учитывающая ограничения на скорость выпуска троса, состоящая из трёх участков, имеет вид:

$$T = \begin{cases} m_A \cdot r \left[ (V_{\theta} + \omega)^2 + \frac{\omega^2 \cdot (3 \cos^2 \theta - 1)}{k} \right] - \dot{V}_r \cdot m_A, & t < t_1, & (2.1) \\ m_A \cdot r \left[ (V_{\theta} + \omega)^2 + \frac{\omega^2 \cdot (3 \cos^2 \theta - 1)}{k} \right], & t = t_1 .. t_2, & (2.2) \\ m_A \cdot r \left[ (V_{\theta} + \omega)^2 + \frac{\omega^2 \cdot (3 \cos^2 \theta - 1)}{k} \right] + T_{\max} \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \right), & t = t_2 .. t_3, & (2.3) \end{cases}$$

Для полученной параметрической программы управления натяжением троса решается параметрическая краевая задача с граничными условиями вида:

$$\begin{aligned} t = t^0 : & \quad r = r^0, \quad \theta^0 = 0, \quad V_r^0 = 0 \quad V_{\theta}^0 = 0 \\ t = t^K : & \quad r = r^K, \quad \theta^0 \rightarrow \max, \quad V_r^K = 0 \quad V_{\theta}^K = 0 \end{aligned} \tag{3}$$

для неизвестных параметров  $t_1$ ,  $t_2$  и  $T_{max}$ . Краевая задача решалась путём минимизации функции:

$$J = c_1 \cdot (\theta - \theta^k)^2 + c_2 \cdot V_\theta^2 + c_3 \cdot (r - r^k)^2 + c_4 \cdot V_r^{k^2}, \quad (4)$$

где  $c_1, c_2, c_3$  и  $c_4$  – заданные весовые коэффициенты.

Выполним расчёт для следующих начальных данных. Базовый космический аппарат находится на эллиптической орбите с высотой перицентра 344 км, высотой апоцентра 362 км, эксцентриситетом 0,001314. Предполагается, что трос выпущен на некоторую начальную длину (3 км) и стабилизирован на линии местной вертикали.

На рисунках цифрами обозначены участки программы управления натяжением.

На рисунке 1 покажем график зависимости скорости выпуска троса  $V_r$  от времени  $t$ , на рисунке 2 покажем график зависимости натяжения троса  $T$  от времени  $t$ .

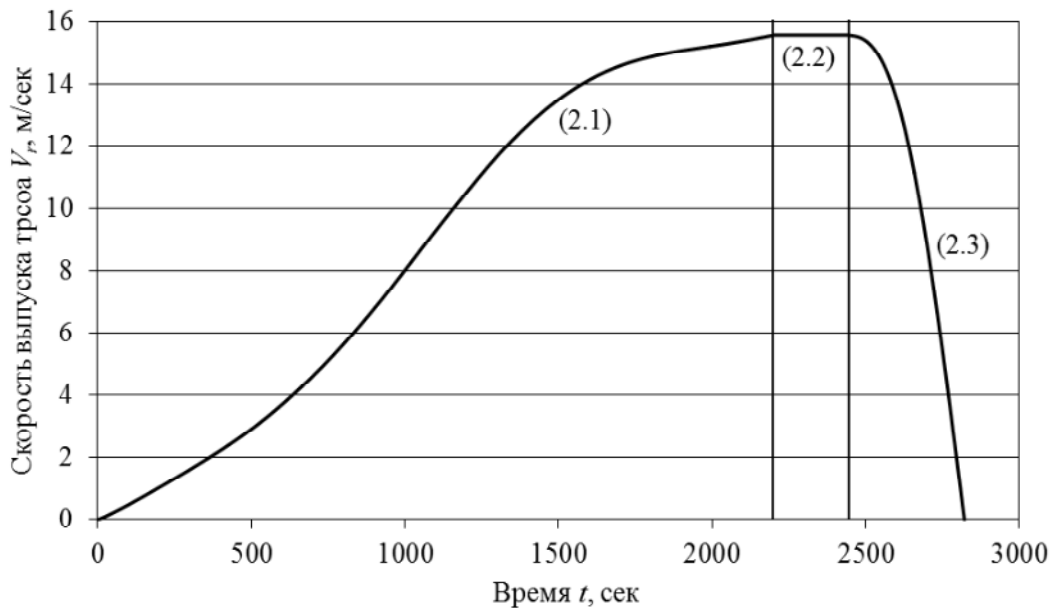


Рис. 1. График зависимости скорости выпуска троса от времени

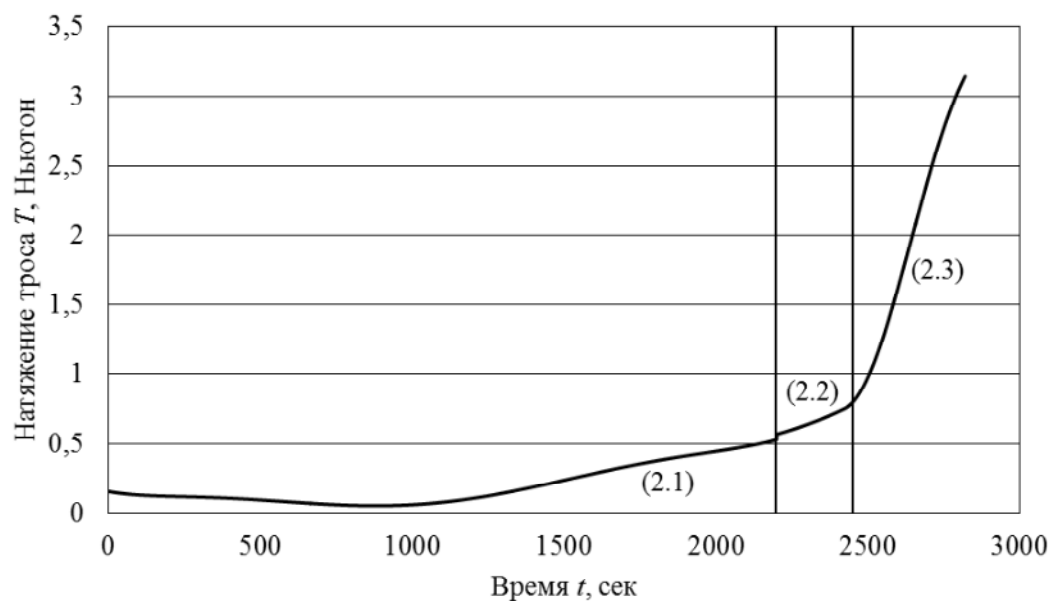


Рис. 2. График зависимости натяжения троса от времени

Как видно из рисунка 1, наибольшее значение скорости выпуска троса составило 15,3 м/сек, что является приемлемым. Однако, как видно из рисунка 2, в момент переключения натяжения троса с (2.1) на (2.2) происходит «скачок» натяжения, а затем натяжение троса растёт до 3,1 Ньютона, что также является достаточно большой величиной.

Отметим, что при реализации параметрической программы управления натяжением (2.1) – (2.3) угол входа субспутника в атмосферу Земли составил минус 1,432 градуса, что несколько меньше минус 1,5 градусов, обеспеченных применением релейной программы управления натяжением троса, изложенной в [2].

### Библиографический список

1. Белецкий, В.В., Левин, Е.М. Динамика космических тросовых систем. – М.: Наука. – 1990. – 336 с.
2. Ишков, С. А. Управление развёртыванием орбитальной тросовой системы [Текст]/С. А. Ишков, С. А. Наумов//Вестник СГАУ. – 2006. – №9. – С. 77-85.