

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИКИ РАН)

Пр-2168

И. М. Сидоров, Г. В. Веселова

СВЁРТЫВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

Представлено к печати
зам. директора ИКИ РАН
Р. Р. Назировым

**МОСКВА
2013**

Свёртывание орбитальной тросовой системы

И. М. Сидоров, Г. В. Веселова

Рассматривается случай, когда Международная космическая станция оснащена тросовой системой. Созданы алгоритмы управления свёртыванием троса. Управление состоит в изменении скорости подтягивания троса в зависимости от его текущей длины.

Clotting Orbital Tether System

I. M. Sidorov, G. V. Veselova

We consider a variant in which the International Space Station is equipped with a tether system. Control algorithms of clotting tether of orbital tether system are developed. Control is to change the speed of a pulling-up tether, depending on its current length.

ВВЕДЕНИЕ

В большей части проектов и предложений с использованием тросовых систем предполагается возможность как раскрытия троса, так и его подтягивания, свёртывания. Последнее необходимо, например, при посадке груза, находящегося на терминале троса, на посадочное место; также необходимость свёртывания троса может возникнуть для его замены, починки или ревизии.

1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВХОДЯЩИХ В СИСТЕМУ БЛОКОВ

Принципиальная схема системы Международная космическая станция (МКС) – блок-терминал с гибкой связью с МКС изображена на рис. 1.

В качестве гибкой связи используется **трос**, изготовленный из композитного материала (торнела или кевлара) в виде ленты шириной 5...10 мм и сечением $\sim 1 \text{ мм}^2$. Такой выбор существенно уменьшает вероятность повреждения троса микрометеоритами. Длина троса — 5 км, вес ~ 7 кг. При этих параметрах запас прочности троса составляет 1000 единиц. Развертывание и свертывание троса, его выпуск и подтягивание осуществляются с помощью **электропривода**, установленного на МКС. Мощность электродвигателя привода — около 1 Вт. Привод должен обеспечивать управляемую скорость вращения. Точность выпуска троса $\sim 1 \text{ см/с}$.

Терминальный блок представляет собой груз массой ~ 20 кг. На рис. 1, 2 терминальный блок изображён в виде шара. Для наблюдения за движением груза используются **телевизионная камера** и **позиционно чувствительный оптический датчик** или лазерный дальномер, установленные на МКС. На рис. 1 груз-терминал изображен в виде шара. Если предусматривается стыковка автоматизированного модуля с грузом-терминалом, последний должен иметь **реперные метки**; в случае использования лазерного дальномера поверхность блока (или её часть) должна обладать высокой отражательной способностью.

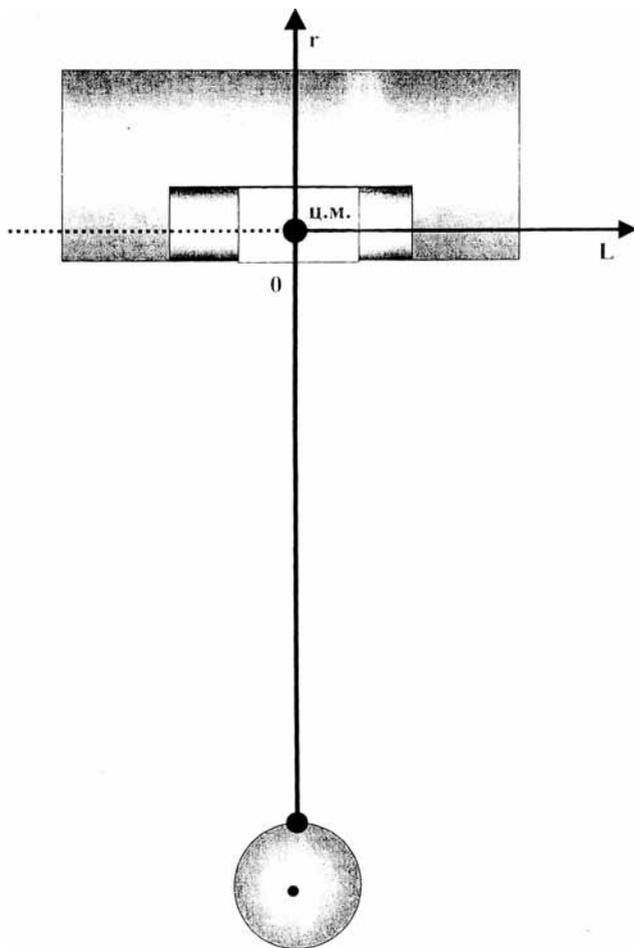


Рис. 1. Схема повеса груза-терминала к МКС

Терминальный блок крепится к тросу с помощью **мягкой пружины**. Пружина должна обеспечивать натяжение, компенсирующее динамическую нагрузку троса — $\sim 3...5$ г/см. Установленный в терминальном блоке **датчик натяжения** должен измерять растяжение пружины с точностью до 1 мм; эта информация передается в блок привода на МКС.

Для выталкивания груза-терминала необходимо устройство, которое отталкивало бы груз от МКС, например, **пружинный толкатель**.

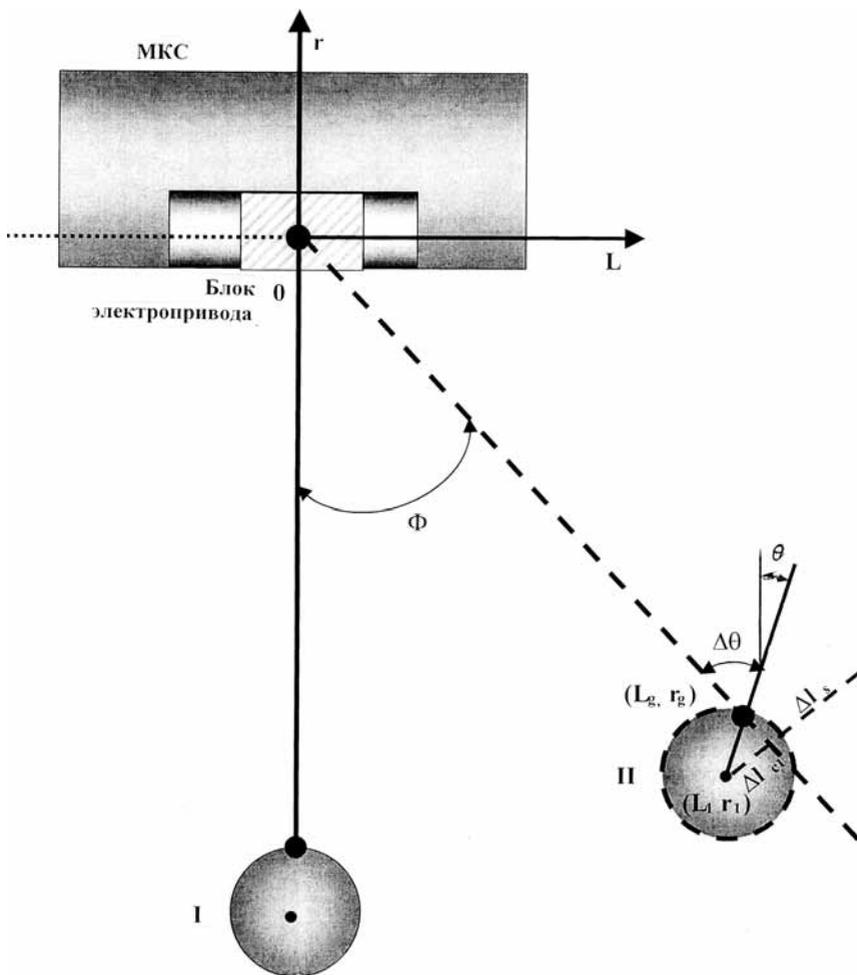


Рис. 2. Угловые движения троса в процессе колебаний и груза относительно троса

В процессе развертывания троса, при управлении колебаниями троса в режиме космического маятника при развернутом тросе [Сидоров, Веселова, 2013], при свёртывании, т. е. при его дальнейшем движении единственным управляющим органом является привод, установленный на МКС. Привод должен управлять скоростью размотывания троса, и после развертывания троса привод должен по заданному закону подтягивать и отпускать трос. Законы

управления выбираются на основе показаний датчика, установленного на грузе-терминале и измеряющего величину натяжения троса. Утверждается, что несмотря на такое ограниченное управление, можно реализовать развертывание троса и далее управлять движением троса в плоскости орбиты, в плоскости рыскания и продольными колебаниями.

2. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ РАЗВЕРТЫВАНИЯ И СВЕРТЫВАНИЯ ГИБКОЙ СВЯЗИ ГРУЗА-ТЕРМИНАЛА С МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИЕЙ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ТРОСЕ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ИМ, НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

2.1. Уравнения движения тросовой системы

Для создания орбитальной тросовой системы (ОТС) груз с начальной частью троса (~20 см — для создания некоторой «слабины» троса) выталкивается в направлении радиус-вектора и одновременно начинает работать привод, обеспечивающий разматывание троса с заданной скоростью. С этого момента можно говорить о появлении ОТС, концевые блоки которой — МКС с одной стороны и груз-терминал — с другой.

В работах [Дигнат, Шилен, 2000; Сидоров, 2002] динамика тросовой системы исследуется на основе интегрирования уравнений движения в поле тяготения двух тел в виде точечных масс, связанных невесомым растяжимым тросом. Уравнения составлены в декартовой системе координат.

$$m_j x_j'' = -\frac{m_j \mu x_j}{R_j^3} + \frac{\gamma_j F(x_2 - x_1)}{S_0},$$

$$m_j y_j'' = -\frac{m_j \mu y_j}{R_j^3} + \frac{\gamma_j F(y_2 - y_1)}{S_0}, \quad j = 1, 2,$$

$$m_j z_j'' = -\frac{m_j \mu z_j}{R_j^3} + \frac{\gamma_j F(z_2 - z_1)}{S_0},$$

где x_j, y_j, z_j — координаты двух тел; $\gamma_j = 1$, если $j + 1$, $\gamma_j = -1$, если $j = 2$; R — радиус Земли; $\mu = 398\,606 \text{ км}^3/\text{с}^2$; m_j — масса концевых блоков; $R_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2 + z_j^2}$; S_0 — длина троса между концевыми

блоками в свободном ненапрянутом состоянии; S_k — расстояние между точками крепления, $S_k = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$.

Сила натяжения троса определяется законом Гука

$$F = \frac{\Delta S E_m C_h}{S_0},$$

где E_m — модуль упругости материала троса; C_h — площадь сечения троса; ΔS — удлинение троса, $\Delta S = S_k - S_0$.

Предварительное рассмотрение модели движения ОТС с тяжелым тросом, в которой трос моделируется, как n точечных грузов, связанных отрезками невесомого растяжимого троса, качественно даёт те же результаты, что и модель невесомого троса.

При решении задачи развертывания ОТС предполагается, что длина троса сравнительно невелика (5 км). Это позволяет для аналитического исследования динамики движения ОТС использовать линеаризованные уравнения в орбитальной системе координат. Соответствующие преобразования приведены в работе [Назиров и др., 2003] при решении задачи исследования движения свободно летающей платформы (модуля) в окрестности орбитальной станции. В задачах и развертывания, и свёртывания троса движение груза подчиняется тем же уравнениям, которые рассмотрены в работе [Назиров и др., 2003], с учетом дополнительной силы натяжения, действующей вдоль направления натянутого троса.

Схема алгоритмов выпуска и подтягивания троса получена на основе анализа уравнений совместного движения космической станции и груза-терминала, связанного тросом с поверхностью станции.

Математическая модель выбирается таким образом, чтобы было возможно исследовать как задачи развёртывания и свёртывания тросовой системы, так и задачу управления различными режимами движения ОТС при полностью развёрнутом тросе.

Схема ОТС показана на рис. 1, 2. Начало координат — в центре масс тросовой системы. Орбита движения центра масс круговая на высоте H над поверхностью Земли. Ось $(0L)$ направлена по вектору скорости, $(0r)$ — по радиус-вектору; (L_1, r_1) — координаты центра масс груза; (L_s, r_s) , (L_g, r_g) — координаты точек крепления троса; φ — угол между направлением троса и осью $(0r)$; θ — угол между осью груза и осью $(0r)$; $\Delta\theta$ — угол отклонения продольной оси груза от направления троса.

При решении уравнений движения ОТС наряду с уравнениями, которые описывают движение центра масс груза, необходимо рассмотрение уравнений углового движения груза.

Линеаризованные уравнения движения тросовой системы следующие:

$$\left. \begin{aligned} L'' &= -2\omega r' + \nu F(t) \frac{L}{S_k} m_{gj}, \\ r'' &= 2\omega L' + 3\omega^2 r + F(t) \frac{r_s}{S_k} m_g, \\ z'' &= \omega^2 z + F(t) \frac{z_s}{S_k} m_g, \\ \theta'' &= F(t) d_k \sin \frac{\Delta\theta}{J_g}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В рассматриваемом варианте задачи груз, подвешенный на тросе, не имеет системы угловой стабилизации. Поэтому все маневры по развёртыванию троса, по управлению различными режимами колебаний, а также по свёртыванию троса должны выполняться таким образом, чтобы угол отклонения $\Delta\theta$ продольной оси груза от направления троса оставался в заданных пределах.

Параметры в (1) определяются следующим образом:

$\Delta\theta = \varphi - \theta$; угол φ определяется из выражений: $\sin \varphi = \frac{L}{S_k}$, $\cos \varphi = \frac{r}{S_k}$; $S_k(t) = \sqrt{L^2 + r^2 + z^2}$; m_g — масса груза; J_g — момент инерции; d_g — расстояние между точкой подвеса груза и центром масс груза; ω — угловая скорость движения по круговой орбите, если $H_0 = 450$ км, $\omega = 0,00112$ с⁻¹.

В задаче развертывания троса предполагается, что трос связан с грузом через слабую пружину. Коэффициент растяжения пружины K_F выбран так, что на всем протяжении процесса развертывания троса величина удлинения пружины будет существенно больше, чем растяжение троса.

Сила натяжения троса

$$F(t) = K_F \Delta S(t), \quad \Delta S(t) = S_k(t) - S_0(t), \quad S_0 = \Delta S_0 + u_0 t, \quad (2)$$

где $S_0(t)$ — текущая длина троса; u_0 — скорость развертывания троса; ΔS_0 — слабина троса в момент выталкивания груза. После раз-

вертывания троса на полную длину пружина наталкивается на ограничитель и перестает работать; сила натяжения троса определяется по формуле (2).

Уравнения (1) приближенно описывают движение ОТС. В системе (1) не приведены уравнения углового движения груза в плоскости перпендикулярной плоскости орбиты, т. е. в плоскости рыскания. Колебания координаты z в плоскости рыскания предполагаются малыми.

Рассмотрим преобразование системы уравнений, описывающих линейное движение центра масс груза в плоскости орбиты. Полученные в результате этого преобразования аналитические выражения позволяют выбрать более обоснованные алгоритмы управления режимом подтягивания троса.

$$\left. \begin{aligned} L'' &= -2\omega r' - F(t) \frac{L}{S_k}, \\ r'' &= 2\omega L' + 3\omega^2 r - F(t) \frac{r}{S_k}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для целей анализа несколько упростим уравнения (3), а именно, положим, что груз представляет собой точечную массу. Поэтому при достаточно длинном тросе можно считать, что длина троса равна расстоянию от центра масс груза до точки подвеса троса на поверхности станции, т. е. $S_k(t) = S_0(t)$.

В выражении (3) выполняем следующую замену переменных: L, r на S_0, φ . Угол φ определен выше; $S_0(t)$ — расстояние между грузом и орбитальной станцией.

$$\left. \begin{aligned} L &= S_0 \sin \varphi, \quad r = -S_0 \cos \varphi, \\ L' &= S_0' \sin \varphi + S_0 \varphi' \cos \varphi, \quad r' = -a S_0' \cos \varphi + S_0 \varphi' \sin \varphi, \\ L'' &= S_0'' \sin \varphi + 2S_0' \varphi' \cos \varphi + S_0 \varphi'' \cos \varphi - S_0 \varphi'^2 \sin \varphi, \\ r'' &= -S_0'' \cos \varphi + 2S_0' \varphi' \sin \varphi + S_0 \varphi'' \sin \varphi + S_0 \varphi'^2 \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Получаем уравнения для S_0, φ , которые удобнее для аналитического исследования движения ОТС

$$\left. \begin{aligned} \varphi'' &= -\frac{3}{2} \omega^2 \sin 2\varphi + 2(\omega - \varphi') \frac{S_0'}{S_0}, \\ F(t) &= M_g \left[-S_0'' + S_0 \varphi'^2 - 2S_0 \omega \varphi' + 3S_0 \omega^2 \cos^2 \varphi \right]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Исследуем решения уравнений (5) в предположении, что амплитуда колебаний тросовой системы относительно направления радиуса – вектора сравнительно невелика, так что можно считать

$$\varphi = \frac{L}{S_0} \quad \text{и} \quad \sin 2\varphi = 2\varphi. \quad (6)$$

Первое уравнение системы (5) преобразуется к виду

$$\varphi'' = -3\omega^2\varphi + 2(\omega - \varphi')\frac{S_0'}{S_0}. \quad (7)$$

2.2. Управление процессом развёртывания троса

Положим, что привод, установленный на станции, выпускает трос со скоростью u , $u > 0$. При $u < 0$ трос подтягивается.

В этом случае длина троса и соответственно расстояние от груза до станции изменяется следующим образом

$$S_0(t) = ut. \quad (8)$$

Уравнение (7) в этом случае имеет вид

$$\varphi'' = -3\omega^2\varphi + \frac{2(\omega - \varphi')}{t}. \quad (9)$$

Нетрудно показать, что уравнение (9) имеет решение, которое точно задаётся следующей формулой

$$\varphi = \frac{2}{3}\omega t + A \sin \sqrt{3} \frac{\omega t}{t}. \quad (10)$$

Из (8) следует, что отклонение груза в направлении оси $(0, L)$ следующее:

$$L(t) = \frac{2u}{3\omega} + Au \sin \sqrt{3} \cdot \omega t. \quad (11)$$

Таким образом, в процессе развёртывания троса груз совершает колебания относительно прямой $L_k = 2u/3\omega$ с частотой $\omega_1 = \sqrt{3} \cdot \omega$. Величина отклонения L_k характеризует кориолисовую силу, действующую на груз в процессе развёртывания. Соответствующий пример расчёта процесса развёртывания показан на рис. 3.

В процессе развёртывания троса можно таким образом выбрать значение u скорости выпуска троса, чтобы в (11) амплитуда колебаний A была равна нулю, $A = 0$.

Если в момент времени t_1 груз достигает крайнего правого положения в точке C_1 как на рис. 3, так что в этой точке составляющая скорости $L'(t)=0$, то начиная с этого момента времени можно выпускать трос со скоростью u_1 таким образом, что груз будет опускаться вертикально вниз, как на рис. 3. Значение скорости u_1 определяется из (11).

$$u_1 = \frac{3}{2} \omega L(t_1). \tag{12}$$

После достижения тросом заданной длины привод на орбитальной станции заканчивает процесс развёртывания. ОТС переходит в режим колебания с постоянной длиной троса [Сидоров, Веселова, 2013].

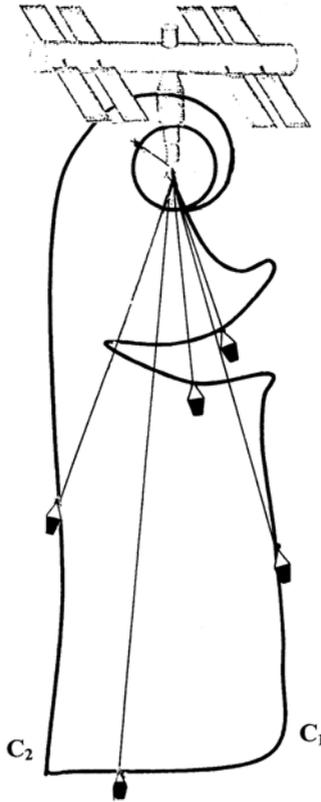


Рис. 3. Развёртывание троса и его свёртывание с постоянной скоростью подтягивания троса

2.3. Управление процессом свёртывания троса

Для решения задачи свёртывания тросовой системы необходимо построить соответствующий закон управления приводом на станции, который реализует подтягивание троса. Моделируя на основе интегрирования уравнений различные режимы свёртывания при произвольном законе управления, можно видеть, что при уменьшении длины троса амплитуда колебаний тросовой системы увеличивается. При дальнейшем уменьшении длины троса груз начинает вращаться около орбитальной станции, натяжение троса возрастает, что может привести к обрыву троса.

Управление подтягиванием троса выбирается на основе анализа уравнения (9).

В момент времени t_2 груз в процессе колебаний достигает крайнего левого положения в точке C_2 (см. рис. 3), так что в этой точке составляющая скорости $L'(t_2) = 0$, начиная с этого момента времени можно подтягивать трос со скоростью u_2

$$u_2 = -\frac{3}{2}\omega L(t_2). \quad (13)$$

Как показано на рис. 3, груз поднимается вертикально. При приближении груза к станции угол возрастает, и соотношения утрачивают силу. В этом случае уравнения перестают описывать процесс движения. Колебательный режим переходит во вращательный, как на рис. 2.

Для решения задачи предлагается подтягивать трос не с постоянной скоростью, а изменять скорость подтягивания в зависимости от текущей длины троса. Если в момент t_2 длина троса $S_0(t_2)$, то далее предлагается изменять длину троса следующим образом:

$$S_0(t) = S_0(t_2) \exp\left(\frac{-u_2(t-t_2)}{S_0(t_2)}\right). \quad (14)$$

Скорость подтягивания троса в этом случае

$$u(t) = S_0'(t) = -u_2 \exp\left(\frac{-u_2(t-t_2)}{S_0(t_2)}\right). \quad (15)$$

После подстановки (14), (15) в уравнение (9) можно видеть, что решением уравнения является постоянное значение угла φ

$$\varphi(t) = \frac{L(t_2)}{S_0(t_2)}. \quad (16)$$

На рис. 4 показан процесс подтягивания троса в том случае, когда скорость подтягивания троса приводом уменьшается согласно (15).

В итоге груз постепенно подтягивается к поверхности станции и на расстоянии 1...2 м от стыковочного узла относительная скорость $L'(t)$ груза 0,02...0,05 м/с. Угловое отклонение груза от направления троса также не превышает 2...4°.

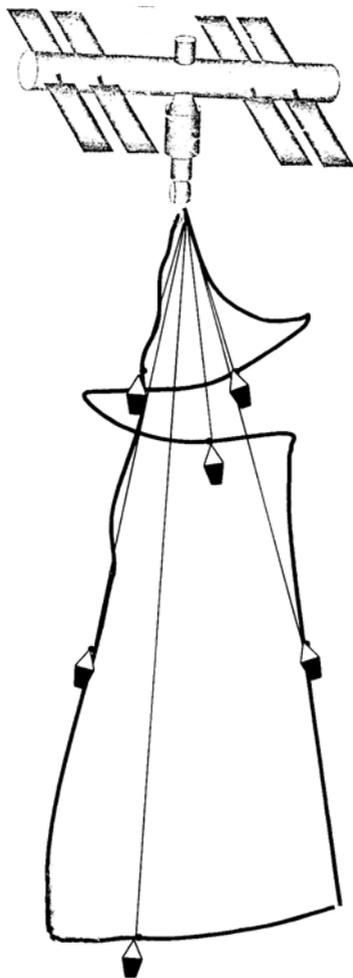


Рис. 4. Развёртывание троса и его свёртывание с управлением скоростью подтягивания троса

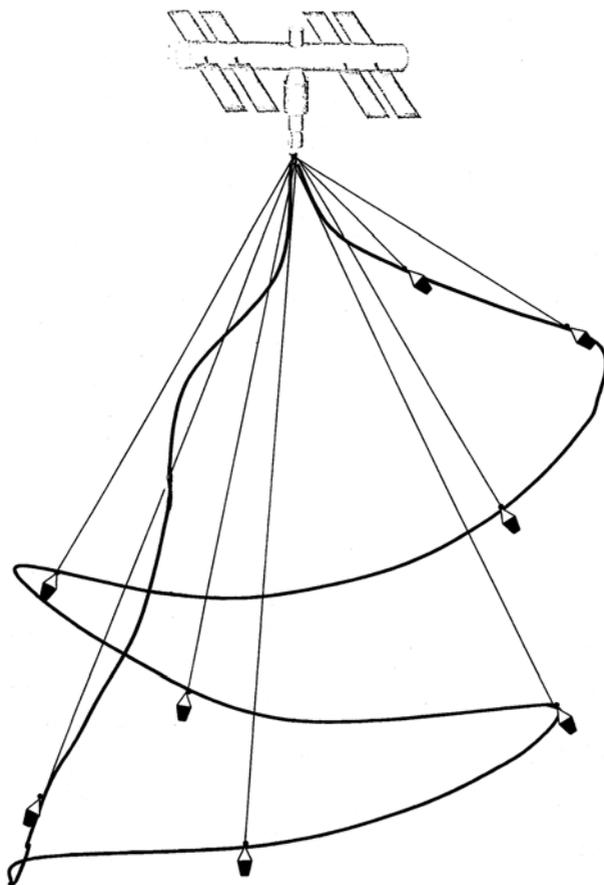


Рис. 5. Развёртывание троса при большой амплитуде колебаний и его свёртывание с управлением скоростью подтягивания троса

На рис. 5 показан ещё один вариант развёртывания и последующего подтягивания троса при большей амплитуде колебания. Конечные результаты близки к варианту рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты показывают принципиальную возможность создания тросовой системы на орбитальной станции. В частности, ОТС может использоваться для обслуживания спутника - инспектора в окрестности станции.

При увеличении длины троса (≥ 200 км) появляется возможность создания на основе ОТС транспортного канала по доставке грузов на орбитальную станцию.

ЛИТЕРАТУРА

- [Дигнат, Шилен, 2000] *Дигнат Ф., Шилен В.* Управление колебаниями орбитальной тросовой системы // Прикладная математика и механика. 2000. Т. 64. Вып. 5. С. 747–754.
- [Назирова и др., 2003] *Назирова Р.Р., Сидоров И.М., Фролов В.А.* О некоторых методах автоматического управления относительным движением объектов на околоземных орбитах // Космич. исслед. 2003. Т. 41. № 1. С. 80–91.
- [Сидоров, 2002] *Сидоров И.М.* О реализации полетов в космическом пространстве без использования принципа реактивного движения // Полёт. 2002. № 9. С. 17–23.
- [Сидоров, Веселова, 2013] *Сидоров И.М., Веселова Г.В.* О возможности развёртывания орбитальной тросовой системы на базе Международной космической станции: Препринт ИКИ РАН. М.: ИКИ РАН, 2013. Пр-2167. 24 с.

Оглавление

Введение	3
1. Принципиальная схема орбитальной тросовой системы на базе Международной космической станции. Предварительные параметры входящих в систему блоков	3
2. Алгоритмы управления процессами развертывания и свёртывания гибкой связи груза-терминала с Международной космической станцией. Моделирование основных динамических процессов, возникающих в тросе при управлении им, на имитационной модели	6
2.1. Уравнения движения тросовой системы	6
2.2. Управление процессом развёртывания троса	10
2.3. Управление процессом свёртывания троса	12
Заключение	14
Литература	15