

И. М. Сидоров, Г. В. Веселова

**О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВЕРТЫВАНИЯ
ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ**

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

**МОСКВА
2013**

**О возможности развёртывания орбитальной тросовой системы
на базе Международной космической станции**

И. М. Сидоров, Г. В. Веселова

Настоящая работа посвящена созданию алгоритмов управления развёртыванием троса, являющегося гибкой связью блока-терминала и Международной космической станции. Рассмотрены также колебания троса, возникающие в процессе его развёртывания, и способы их подавления.

**On the Possibility of Deploying an Orbital Tether System Based
on International Space Station**

I. M. Sidorov, G. V. Veselova

This paper deals with the creation of the control algorithm of deploying tether, connecting the block-terminal with the International Space Station. Different types of oscillations, arising during the deployment of the tether and methods of their suppressions are also discussed.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена созданию алгоритма управления процессом развёртывания гибкой связи блока-терминала с Международной космической станцией (МКС) с учётом возникающих в процессе развёртывания продольных колебаний связи и колебаний в плоскостях стабилизации.

Оснащение МКС тросовой системой (блоком-терминалом с гибкой связью — тросом) приводит к появлению новой системы — орбитальной тросовой системы (ОТС) с новыми возможностями, в частности, для МКС.

При использовании автоматизированного модуля, выполняющего в активном режиме указания оператора по инспекции поверхности станции или транспортировке грузов, блок-терминал может быть местом базирования такого модуля, а в пассивном режиме также наблюдать за поверхностью МКС. Принцип стыковки модуля с блоком подробно обсуждался в литературе [Назиров и др., 2003; Сидоров и др., 1981; Sidorov, Frolov, 2000]. При необходимости гибкая связь может быть использована для подтягивания модуля на МКС с целью его починки или модернизации.

При увеличении длины троса (>100 км) появляется возможность создания нового способа доставки грузов на МКС.

Одной из наиболее сложных проблем, решение которой необходимо для функционирования орбитальной станции, является система угловой стабилизации. В штатном режиме ориентация обеспечивается установленными на орбитальной станции системами гироскопов. Оснащение орбитальной станции тросовой системой позволит создать альтернативную систему угловой стабилизации: становится возможной одноосная гравитационная стабилизация МКС, а также высокоточная активная трёхосная стабилизация.

Кроме того, открываются новые возможности для проведения научных экспериментов и наблюдений. В блок-терминале может находиться научная аппаратура; другие части аппаратуры могут находиться непосредственно на МКС (на определённом постоянном расстоянии) и работать совместно.

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

Здесь мы не будем рассматривать детально характеристики отдельных компонентов системы связи блока-терминала с МКС — это есть предмет отдельного рассмотрения. Мы остановимся на общих принципиальных характеристиках, необходимых для реализации всей системы, написания алгоритмов управления, приемлемых для конкретных условий МКС.

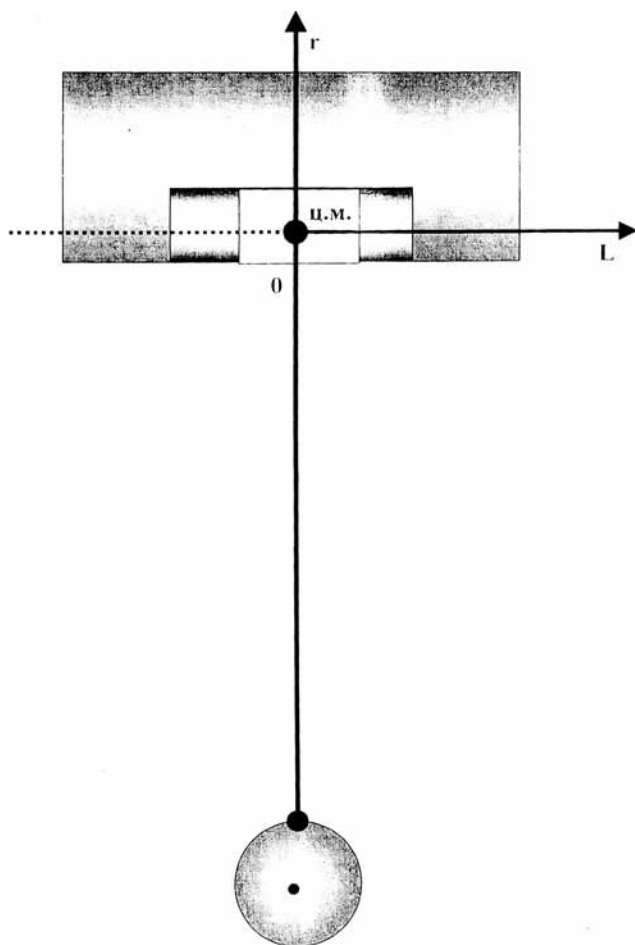


Рис. 1. Схема подвеса груза-терминала к МКС

Предлагается следующая схема системы: **МКС — блок-терминал с гибкой связью с МКС** (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.

Развёртывание и свёртывание 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 ~ 1 см/с.

Терминальный блок представляет собой груз массой ~ 20 кг. Для наблюдения за движением груза используются **телевизионная камера и позиционно чувствительный оптический датчик** или лазерный дальномер, установленные на МКС. На рис. 1 груз-терминал изображён 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.

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 передаётся в блок привода на МКС.

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

В процессе развёртывания троса и при дальнейшем движении единственным управляющим органом является привод, установленный на МКС. Привод должен управлять скоростью разматывания троса, и после развёртывания 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 развёртывание троса и далее управлять движением троса в плоскости орбиты, в плоскости рыскания и продольными колебаниями.

2. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ТРОСА. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ТРОСЕ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ИМ, НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

2.1. Уравнения движения тросовой системы

Для создания 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 орбитальной тросовой системы (ОТС), концевые блоки которой — МКС с одной стороны и груз-терминал — с другой.

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

Схема расположения МКС и груза в процессе развёртывания троса показана на рис. 2.

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.

$$\left. \begin{aligned} m_j x_j'' &= -m_j \mu \frac{x_j}{R_j^3} + \gamma_j \frac{F(x_2 - x_1)}{S_0}, \\ m_j y_j'' &= -m_j \mu \frac{y_j}{R_j^3} + \gamma_j \frac{F(y_2 - y_1)}{S_0}, \\ m_j z_j'' &= -m_j \mu \frac{z_j}{R_j^3} + \gamma_j \frac{F(z_2 - z_1)}{S_0}, \end{aligned} \right\} j = 1, 2, \quad (1)$$

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,

$$S_k = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}. \quad (2)$$

Сила натяжения троса определяется законом Гука

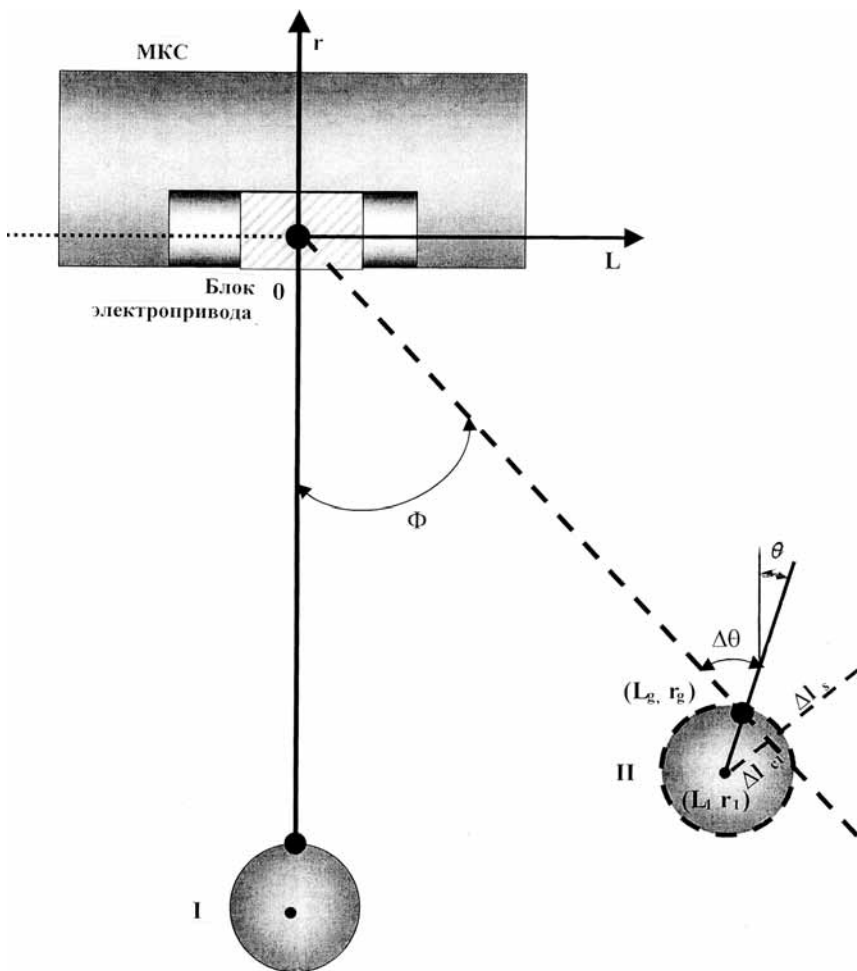


Рис. 2. Угловые движения троса в процессе колебаний и груза относительно троса

$$F = \Delta S E_m \frac{C_h}{S_0}, \quad (3)$$

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 тяжёлым тросом, в которой трос моделируется, как n — точечных грузов,

связанных отрезками невесомого растяжимого троса [Дигнат, Шиллен, 2000], качественно даёт те же результаты, что и модель невесомого троса.

При решении задачи развёртывания 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 [Назиров и др., 2003] при решении задачи исследования движения свободно летающей платформы (модуля) в окрестности орбитальной станции. В задаче развёртывания троса движение груза подчиняется тем же уравнениям, которые рассмотрены в [Назиров и др., 2003] с учётом дополнительной силы натяжения, действующей вдоль направления натянутого троса.

Начало координат выбирается 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 (см. рис. 2); (L_1, r_1) — координаты центра масс груза; (L_2, r_2) — координаты центра масс МКС; (L_s, r_s) , (L_g, r_g) — координаты точек крепления троса; φ — угол между направлением троса и осью $(0r)$; ψ — угол между поперечной осью МКС и осью $(0r)$.

При решении задачи развёртывания троса, особенно на первом этапе, наряду с уравнениями, которые описывают движение центра масс груза и МКС, необходимо рассмотрение уравнений углового движения.

Линеаризованные уравнения движения тросовой системы следующие:

$$\left. \begin{aligned} L_j'' &= -2\omega r_j' + v_j F(t) \frac{L_s - L_g}{S_0} m_j, \\ r_j'' &= 2\omega L_j' + 3\omega^2 r_j + v_j F(t) \frac{r_s - r_g}{S_0} m_j, \quad j = 1, 2, \\ z_j'' &= \omega^2 z_j + v_j F(t) \frac{z_s - z_g}{S_0} m_j, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где угол φ определяется из выражений $\sin \varphi = \frac{L_s - L_g}{S_0}$, $\cos \varphi = \frac{r_s - r_g}{S_0}$ (см. рис. 2); S_k — расстояние между точками крепления, $S_k(t) = \sqrt{(L_s - L_g)^2 + (r_s - r_g)^2 + (z_s - z_g)^2}$.

В уравнениях (4) $v_j=1$, если $j=1$, $v_j=-1$, если $j=2$; m_1, m_2 — массы груза и МКС; J_g, J_s — моменты инерции; d_g — расстояние между точкой подвеса груза и центром масс груза; d_s — расстояние между точкой крепления троса и центром масс МКС (см. рис. 2); ω — угловая скорость движения по круговой орбите. Если $H_0=450$ км, $\omega=0,00112$ с⁻¹.

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

Сила натяжения троса

$$F(t) = K_F \Delta S(t), \quad \Delta S(t) = S_k(t) - S(t), \quad S_0(t) = \Delta S_0 + u_0 t, \quad (5)$$

где $S_0(t)$ — текущая длина троса; u_0 — скорость развёртывания троса; ΔS_0 — слабина троса в момент выталкивания груза. После развёртывания троса на полную длину пружина наталкивается на ограничитель и перестаёт работать; сила натяжения троса определяется по формуле (3).

Уравнения (4) приближённо описывают движение ОТС. В системе (4) колебания координаты z в плоскости рыскания предполагается малыми. Из уравнений (4) следует, что при развёртывании троса выполняются соотношения

$$L_2 = kL_1, \quad r_2 = kr_1, \quad \text{где } k = m_2/m_1.$$

Центр масс тросовой системы остаётся в начале координат (L, r) .

Из уравнений (4) для переменных $L_j, r_j, j=1, 2$ получаем систему уравнений для переменных $L = L_1 - L_2, r = r_1 - r_2$

$$\left. \begin{aligned} L'' &= -2\omega r' - W(t) \frac{L}{S_k}, \\ r'' &= 2\omega L' + 3\omega^2 r - W(t) \frac{r}{S_k}, \\ F(t) &= W(t) m_k m_k = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где L, r — проекции натянутого троса на оси координат на рис. 2; $W(t)$ — центростремительное ускорение, которое определяется натяжением троса.

Для целей анализа несколько упростим уравнения (6). Выполним следующую замену переменных: L, r на a, φ . Угол φ определён

выше, приближенное значение $\varphi(t) = L(t)/a$; $a(t)$ — расстояние между грузом и МКС.

$$\left. \begin{aligned} L &= a \sin \varphi, \quad r = -a \cos \varphi, \\ L' &= a' \sin \varphi + a \varphi' \cos \varphi, \quad r' = -a' \cos \varphi + a \varphi' \sin \varphi, \\ L'' &= a'' \sin \varphi + 2a' \varphi' \cos \varphi + a \varphi'' \cos \varphi - a \varphi' \sin \varphi, \\ r'' &= -a'' \cos \varphi + 2a' \varphi' \sin \varphi + a \varphi'' \sin \varphi + a \varphi' \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Получаем уравнения для a , φ , которые удобнее для аналитического исследования движения ОТС.

$$\varphi'' = -1,5\omega^2 \sin 2\varphi + \frac{2(\omega - \varphi')a'}{a}. \quad (8)$$

Для величины натяжения $F(t)$ имеем следующее выражение

$$F(t) = m_k(-a'' + a\varphi'^2 - 2a\omega a\varphi' + 3a\omega^2 \cos^2 \varphi). \quad (9)$$

2.2. Динамика развёртывания тросовой системы

Процесс развёртывания троса моделируется интегрированием системы уравнений (2.4). Аналитические выражения для описания различных режимов динамики движения получены из уравнения (2.8). Полученные результаты показывают, что, несмотря на принятые субъективные решения и при достаточно произвольном выборе параметров, процесс развёртывания происходит достаточно стационарно. На начальном этапе поведение троса имеет некоторые стохастические отклонения, но через определённое время процесс развёртывания устанавливается и в малой степени зависит от разброса начальных параметров.

Для реализации развёртывания тросовой системы наиболее трудной является задача обеспечения стабильного протекания начального этапа развёртывания. Рассмотрим особенности движения системы на начальном этапе.

Для получения конкретных результатов зададимся следующими начальными условиями, определяющими динамику развёртывания.

Пусть в начальный момент $t=0$ груз выталкивается со скоростью w_0 вдоль оси r (т. е. перпендикулярно продольной оси МКС); при $t=0$ привод начинает выпускать трос со скоростью u_0 , которая меньше, чем w_0 на величину Δw . Начальные условия для интегрирования уравнений (4) следующие:

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= w_0 - \Delta w, \quad L_1(0) = 0, \quad L_1'(0) = 0, \quad L_2(0) = 0, \quad L_2'(0) = 0, \\ r_1(0) &= \frac{-m_2(d_s + d_g)}{m_1 + m_2}, \quad r_2(0) = \frac{m_1(d_s + d_g)}{m_1 + m_2}, \\ r_1'(0) &= \frac{-m_2 w_0}{m_1 + m_2}, \quad r_2'(0) = \frac{m_1 w_0}{m_1 + m_2}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

На интервале $(0 < t < t_1)$ трос не натянут, и груз движется, как свободное тело около МКС. Предполагается, что из-за неточности работы толкателя груз имеет начальное угловое отклонение и угловую скорость вращения около своего центра масс $\theta(0)$, $\theta'(0)$.

При выбранных параметрах движения, слабина троса ΔS_0 постепенно выбирается, и при $t = t_1$ трос натягивается. К этому моменту длина троса невелика и величина его растяжения в соответствии с (3) незначительна. Пружина, через которую груз крепится к тросу, растягивается.

Рассмотрим сначала динамику движения груза после появления силы натяжения в предположении, что скорость разматывания троса не регулируется и остаётся постоянно равной $u(0)$. Величина растяжения пружины определяется уравнением

$$\Delta S''(t) = K_F \Delta S(t), \quad (t_1 < t < t_2) \quad (11)$$

при начальных условиях $\Delta S(t_1) = 0$, $\Delta S'(t) = \Delta w$. На интервале времени $(t_1 < t < t_2)$ растяжение пружины определяется как

$$\Delta S(t_1) = \frac{\Delta w \sin \omega_F (t - t_1)}{\omega_F}, \quad \omega_F = \sqrt{K_F}, \quad t_2 = t_1 + \pi / \omega_F.$$

Соответствующий график показан линией А на рис. 3. Величина натяжения $F(t)$ определяется согласно (5). На протяжении данного интервала времени скорость движения груза относительно МКС уменьшается на величину $2\Delta w$ и достигает величины

$$w(t_2) = w_0 - 2\Delta w.$$

При $t = t_2$ растяжение пружины становится равным нулю, и трос провисает. В момент времени $t = t_1$ скорость разматывания троса была меньше скорости движения груза на величину Δw . При $t = t_2$ скорость разматывания троса оказывается больше скорости движения на Δw . Если не учитывать поля тяготения, то скорость движения груза остаётся неизменной, провисание троса будет увеличиваться и повторного натяжения не произойдёт. Но в поле тяготения движение груза подчиняется уравнениям (6) при условии, что $F(t) = 0$.

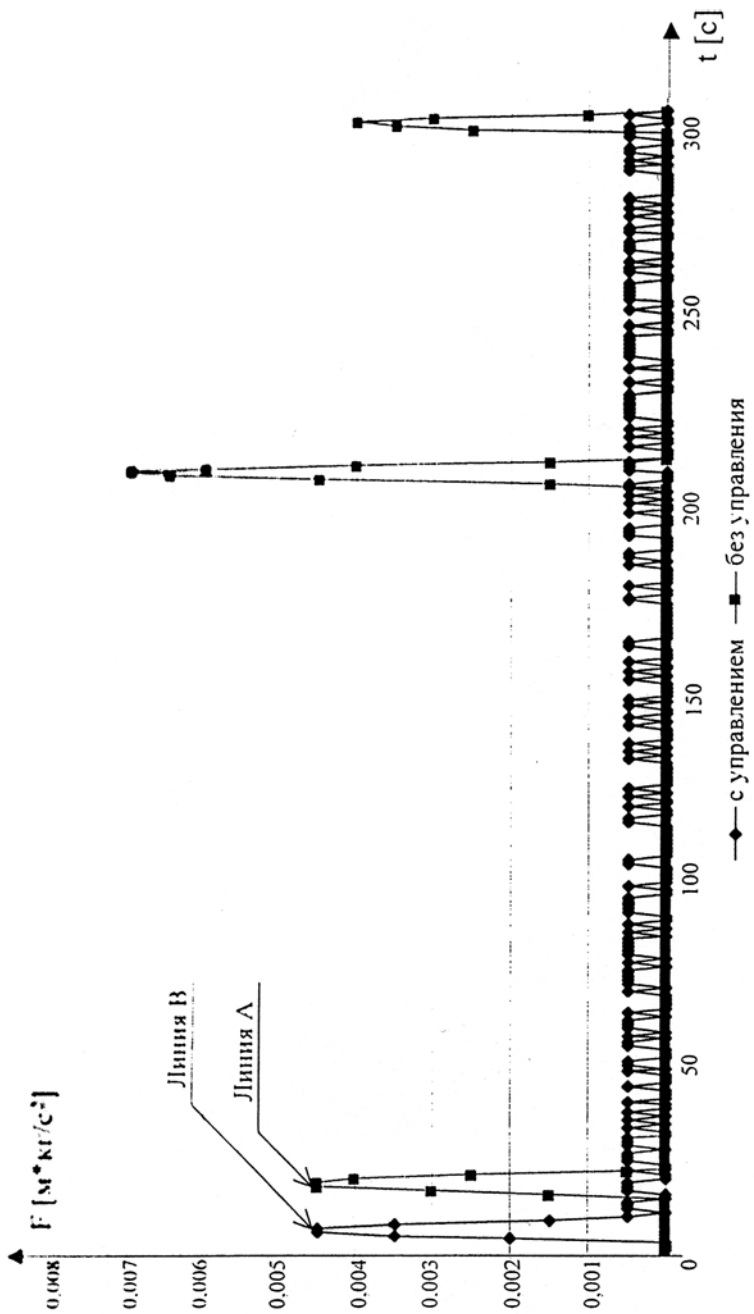


Рис. 3. Зависимость натяжения троса от времени

Решения этих уравнений можно получить в аналитическом виде и определить скорость движения груза. Решения показывают, что скорость груза относительно МКС постепенно увеличивается.

$$\omega(t) = \omega(t_2)(1 + \omega^2(t - t_2)^2) \quad (t > t_2) \quad (12)$$

В результате через достаточно длительный интервал времени ($t_2 < t < t_3$) трос натянется, сила натяжения будет действовать на интервале ($t_3 < t < t_4$), а далее опять длительный интервал времени — при отсутствии натяжения. На рис. 3 линией А показано последовательное появление пиков натяжения троса.

Задача развёртывания осложняется тем обстоятельством, что груз не является точечной массой, а точка крепления груза отстоит от центра масс на расстоянии d_g . Из-за неточности работы механизма выталкивания к моменту $t = t_1$ ось груза отклоняется от направления троса на угол $\Delta\theta(t_1)$.

Во время действия натяжения на интервале ($t_1 < t < t_2$) груз получает импульс угловой скорости и начинает вращаться в обратную сторону. Процесс последовательного натяжения и ослабления троса повторяется достаточно много раз. Груз ведёт себя как шарик на резинке в известной игрушке. Угловая скорость вращения груза может достигать значительных величин, и он может перекручиваться. Динамика движения определяется, прежде всего, продольными колебаниями пружины. Необходимо, чтобы процесс периодического появления слабину троса сменился режимом постоянного натяжения.

2.3. Управление процессом развёртывания троса

Предлагается реализовать управление скоростью $u(t)$ разматывания троса таким образом, чтобы после того, как при $t > t_1$ слабина троса будет выбрана, при дальнейшем развёртывании трос не провисал, т. е. величина натяжения $F(t) > 0$ при $t > t_1$.

Первый вариант такого управления следующий. Если датчик натяжения, установленный на грузе, показывает, что $F(t) > \Delta F$, где ΔF — минимально измеряемое значение натяжения, то скорость разматывания троса увеличивается на величину Δu и становится равной $u(t) = u(0) + \Delta u$. Если натяжение троса $F(t) < \Delta F$, то скорость разматывания троса $u(t) = u(0)$. При выборе конкретных значений Δu , ΔF , график изменения растяжения пружины показан на рис. 3 линией В. Таким образом, предлагается релейный закон управления скоростью разматывания троса.

Второй вариант — это более универсальное управление, которое решает одновременно и задачу развёртывания троса, и подавления продольных колебаний пружины и троса при различных режимах движения ОТС. В этом варианте следует изменять скорость развёртывания пропорционально производной от измеряемой величины натяжения.

$$u(t) = u(0) + \gamma \frac{dF(t)}{dt}, \quad \frac{dF(t)}{dt} = \frac{F(t) - F(t - h_0)}{h_0}. \quad (13)$$

где h_0 — шаг опроса информации; γ — параметр управления. Для решения реальной задачи развёртывания закон управления (13) также не является удовлетворительным. Величина натяжения $F(t)$ на начальном этапе достаточно мала, и ошибки измерения приведут к большому случайному разбросу производной $dF(t)/dt$. Следует выбрать управление в следующем виде:

$$u(t) = u(t - h) + \alpha F(t), \quad (14)$$

где α — соответствующим образом выбранный параметр управления. В законе управления (14) необходимый фазовый сдвиг достигается интегрированием наблюдаемого сигнала, а не дифференцированием, как в управлении (13). Результаты интегрирования уравнений (4) показывают, что использование управления обеспечивает необходимый режим развёртывания.

На основе анализа уравнений (8), (9) получим аналитическое описание процесса развёртывания троса. Рассмотрим установившийся процесс в предположении, что трос не провисает и сила натяжения $F(t)$ не равна нулю. На первом этапе развёртывания в уравнении (8) положим $\sin 2\varphi = 2\varphi$. Уравнение (8) будет иметь вид

$$\varphi'' = -3\omega^2 2\varphi + 2(\omega - \varphi') \frac{S'_k}{S_k}. \quad (15)$$

Так как трос развёртывается с постоянной скоростью u_0 , то длина троса $S_k(t) = u_0 t$. Уравнение (2.15) имеет точное решение:

$$\varphi(t) = \frac{2}{3}\omega t - 2\cos \frac{\omega_1 t}{3\omega t}, \quad \omega_1 = \sqrt{3} \cdot \omega. \quad (16)$$

В плоскости (L, r) траектория движения груза определяется координатами $L(t) = u(0)t\varphi(t)$, $r(t) = -u(0)t$. Соответствующий график показан на рис. 4 линией А. При удлинении троса груз опускается вдоль прямой L_c (см. рис. 4), которая смещена относительно оси $(0, r)$ на величину $L_c = 2u(0)/3\omega t$. При этом груз совершает колебания относительно прямой с постоянной амплитудой.

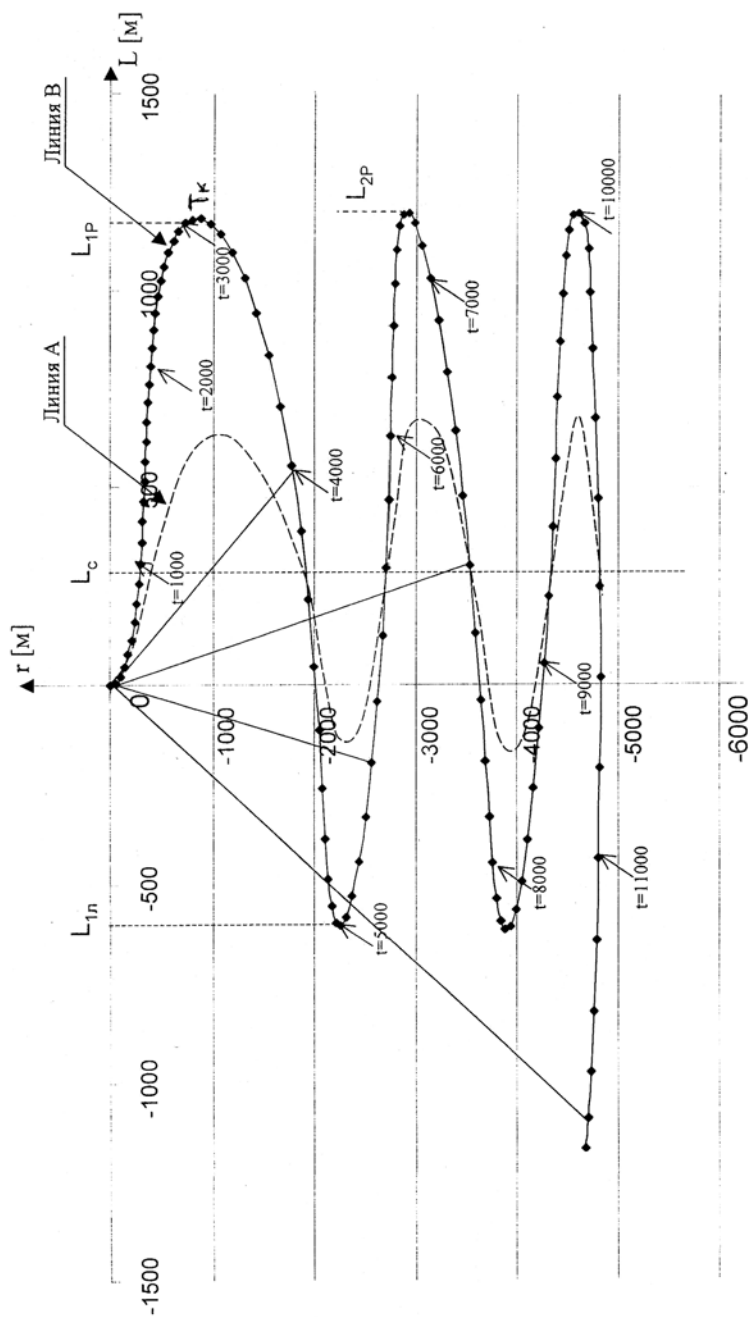


Рис. 4. Динамика движения центра масс груза в процессе развёртывания троса

Смещение груза не величину L_c есть результат действия кориолисовой силы [Дигнат, Шилен, 2000]. Груз совершает колебания относительно прямой C с постоянной амплитудой L_1 и с частотой ω_1 которая при развёртывании троса остаётся практически постоянной и определяется формулой (2.16).

Результаты численного интегрирования уравнений (4) — линия В на рис. 4. Рисунок 4 показывает качественное совпадение результатов, полученных по аналитической формуле (16) — линия А, и численного интегрирования. Численные характеристики существенно отличаются на первом цикле колебания при движении груза вправо от значения $L(0)$ до значения $L(T_k)$. Это рассогласование есть следствие замены в уравнении (8) $\sin 2\varphi$ на 2φ , что неправомерно, так как при этом движении угол φ достигает значения 60° . При дальнейшем движении груза интегрирование уравнений (4) показывает, что колебания груза происходят около вертикальной прямой L_c . Частота колебаний груза в плоскости (L, r) при развёртывании троса остаётся практически постоянной и определяется формулой (16)

$$\omega_1 = \sqrt{3} \cdot \omega .$$

Аналитическую оценку величины натяжения $F(t)$ можно получить подстановкой решения (11) в (9). На рис. 4 линией В показана зависимость $F(t)$, где величина натяжения получена численным интегрированием системы (4). Как следует из графика, величина натяжения на первом цикле колебания на интервале $(0 < t < T_r)$ достаточно мала и практически не возрастает по мере удлинения троса. Это и обуславливает трудности при развёртывании троса на начальном этапе. Заметим, что максимальное значение угла $\varphi(t)$ достигается в момент времени T_k (см. рис. 4) и не зависит от величины $u(0)$, начальной скорости выталкивания груза. Момент времени $T_k \approx 3000$ с, когда достигается максимальное значение $\varphi(t)$, также не зависит от величины $u(0)$.

В момент времени T_N трос достигает заданной длины, размотывание троса прекращается

При вариации скорости развёртывания недопустимо скачкообразное изменение величины $u(t)$. Скорость $u(t)$ следует изменять постепенно на интервале времени длиной ΔT .

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= u(t - h_0) - \frac{u(0)h_0}{\Delta T} + \alpha F(t), & (T_N < t < T_N + \Delta T), \\ u(t) &= u(t - h_0) + \alpha F(t), & t < T_N + \Delta T. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

3. УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЯМИ ТРОСА В РЕЖИМЕ КОСМИЧЕСКОГО МАЯТНИКА ПРИ РАЗВЕРНУТОМ ТРОСЕ

После завершения процесса развёртывания тросовая система находится в возбуждённом состоянии и совершает колебания на различных частотах. Для подавления этих колебаний и создания условий для эксплуатации троса с грузом-терминалом (например, для стыковки модуля с терминалом) необходимо построить управление этими колебаниями. Перечислим типы колебаний, которые испытывает трос после развёртывания.

1. Продольные колебания троса.
2. Колебания троса в плоскости орбиты, в плоскости (L, r) .
3. Колебания троса в плоскости перпендикулярной плоскости орбиты, в плоскости рыскания.
4. Угловые колебания груза относительно троса.

Рассмотрим характеристики каждого типа колебания и способы управления ими. Исполнительный орган во всех случаях — привод, который подтягивает или отпускает трос по заданному закону.

Для управления необходимо иметь информацию о параметрах колебательных составляющих в каждый момент времени $t_k = t_{k-1} + h_0$. Решение этой задачи неоднозначно и зависит от состава задействованных средств. В полном объёме в настоящей работе этот вопрос не исследуется, а рассмотрены отдельные предложения применительно к поставленной задаче.

3.1. Продольные колебания троса

Как было показано выше, слагаемое $\alpha F(t)$ в (14) подавляет продольные колебания тросовой системы. Это слагаемое должно входить в закон управления при всех управляемых манёврах ОТС.

При движении с неизменной длиной троса S_0 , после успокоения продольных колебаний, можно положить параметр $\alpha = 0$. Задача активного управления продольными колебаниями рассмотрена ниже.

Все режимы вариации длины троса приводят к возникновению продольных колебаний.

Определим частоту продольных колебаний из уравнения (9). На начальном этапе развёртывания троса, в условиях данного эксперимента, частота ω_F продольных колебаний определяется коэффициентом растяжения пружины $\omega_F = K_F$, согласно (11). Так как

натяжение в этом случае мало, то трос считается нерастяжимым. После завершения развёртывания пружина выключается, и частота колебаний определяется величиной ΔS растяжения троса (2.3).

$$\omega_F^2 = \Delta S E_m \frac{C_h}{m_1} L_0 . \quad (18)$$

Для активного подавления продольных колебаний можно использовать управление длиной троса в двух вариантах (13) и (14).

3.2. Колебания троса в плоскости орбиты

Угол $\varphi(t)$ показывает отклонение направления троса от радиуса вектора, оси (θ, r) . Из уравнения (8) можно получить следующее приближенное выражение:

$$\varphi(t) = A_1 \sin \omega_1 t + A_3 \sin 3\omega_1 t , \quad (19)$$

где $\omega_1 = \sqrt{3} \cdot \omega \left(1 - \frac{A_1^2}{4} \right)$, $A_3 = \frac{A_1^3}{48}$.

При сравнительно малой амплитуде A_1 колебания в плоскости орбиты

$$\omega_1 = \sqrt{3} \cdot \omega . \quad (20)$$

В отличие от математического маятника частота колебания тросовой системы как космического маятника не зависит от длины троса.

В процессе колебания натяжение $F(t)$ троса изменяется. Из (8) следует, что

$$F(t) = m_1 S_0 \omega^2 \left[3 - \frac{3A_1^2}{4} + \frac{9A_1^2 \cos 2\omega_1 t}{4} - 2\sqrt{3} \cdot A_1 \cos \omega_1 t \right] . \quad (21)$$

Из (3.4.) следует, что при движении груза слева направо натяжение меньше, чем при обратном движении груза. В первом случае орбитальная скорость груза складывается с относительной скоростью груза, а при обратном движении относительная скорость груза вычитается из орбитальной. При малой амплитуде колебания натяжение груза

$$F(t) = 3m_1 a_0 \omega . \quad (22)$$

Для примера, если масса груза $m_1 = 50$ кН, длина троса $S_0 = 5$ км, ОТС движется по круговой орбите на высоте 450 км, то по формуле (22) натяжение $F(t) = 0,1$ кг.

Для управления колебаниями троса в плоскости орбиты необходимо располагать значениями $\varphi(t_k)$. С этой целью можно использовать величины $F(t_k)$, измеряемые датчиком натяжения. Согласно (21) функция $F(t)$ содержит гармонику $A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_0)$. На основе известных методов выделения из сигнала гармонических составляющих в реальном времени определяются значения частоты ω_1 , амплитуды A_1 и фазы φ_0 . По формулам (7) вычисляются величины $L(t_k)$, $L'(t_k)$, $r(t_k)$, $r'(t_k)$.

При дальнейшем развитии тросовых систем целесообразно информацию о параметрах движения определять с помощью автономных инерционных систем (БИНС), а также возможно использование системы глобального позиционирования GPS.

Предлагается два варианта управления амплитудой колебания угла $\varphi(t)$.

В варианте А закон изменения длины троса, который реализуется работой электропривода, следующий:

$$S(t) = S_0 \left[1 + \frac{p_1 L(t)}{S_0} \right] + \sigma F(t), \quad (23)$$

где S_0 — номинальная длина троса; p_1 — параметр управления, который характеризует величину изменения длины троса. При использовании данного управления в уравнении (8) для $\varphi(t)$ появляется член $2\omega_1 \varphi'(t)/S_0$. Следовательно, угол $\varphi(t)$ изменяется следующим образом:

$$\varphi(t) = e^{-\alpha t} A_1 \sin \omega_1 t, \quad \alpha = \frac{p_1 \omega}{S_0}. \quad (24)$$

При $p_1 > 0$ амплитуда колебания ОТС в плоскости орбиты согласно (24) уменьшается, при $p_1 < 0$ амплитуда колебания увеличивается. Длина троса периодически изменяется на величину $\pm p_1 A_1 S_0$, а максимальная скорость подтягивания троса равна $p_1 A_1 S_0 \omega_1$. Для примера, если $S_0 = 5000$ м, $p_1 = 0,02$, $A_1 = 0,6$, то длина троса изменяется на 60 м с максимальной скоростью 0,1 м/с. Коэффициент $\alpha = 3,3 \cdot 10^{-5}$. Если начальная амплитуда колебания троса по углу $A_1 = 0,6$ и, следовательно, значение $L(t)$ меняется в пределах $(-3000 < L < 3000)$, то за три часа работы привода, согласно (24), амплитуда колебания угла уменьшится до 0,42 и $(-2100 < L < 2100)$. При выбранном значении p_1 , за сутки работы привода можно практически устранить колебания ОТС в плоскости орбиты.

В варианте В управление обеспечивается параметрическим резонансом. В этом случае

$$S(t) = S_0 \left[1 + \frac{p_2 L(t) L'(t)}{S_0^2} \right] + \sigma F(t), \quad S(t) = S_0 (1 + p_2 \sin(2\omega_1 t)) + \sigma F(t). \quad (25)$$

Из уравнения (8) значение α в (24) определяется как

$$\alpha = -p_2 \omega_1. \quad (26)$$

В рассматриваемой системе, когда длина троса сравнительно невелика, и соответственно мало натяжение, параметры управления p_1, p_2 следует включать и выключать постепенно на интервале времени длиной ΔT , как в (17). При большей длине троса допустимы более резкие управляющие воздействия.

Из (24), (26) следует, что при увеличении высоты орбиты эффективность данного управления уменьшается. Вне действия сил гравитации управление углом φ за счёт изменения длины троса невозможно.

3.3. Колебания троса в плоскости рыскания

Обозначим $z(t) = z_1(t) - z_2(t)$. Из системы (4) получим уравнение для $z(t)$, которое описывает колебания троса в плоскости (r, z)

$$z'' = -\omega_z^2 - \frac{F(t)z}{S_0}. \quad (27)$$

Эти колебания могут появиться в момент выталкивания груза. Пусть отклонение по рысканию составляет угол λ . Тогда начальные условия для уравнения по переменной $z(t)$ следующие: $z(0) = d_s \lambda$, $z'(0) = u(0)\lambda$. Амплитуда колебаний $z(t)$ по сравнению с $L(t)$ сравнительно невелика. Следует обеспечить минимальную величину колебаний по $z(t)$. Необходимо уметь управлять этими колебаниями.

Определим колебания по координате $z(t)$ следующим образом:

$$z(t) = A_z \sin(\omega_z t). \quad (28)$$

При малых колебаниях по координатам $L(t)$ и $z(t)$ величина натяжения $F(t)$ определяется (22). Подстановкой (22) в (27) получаем, что частота $\omega_z = 2\omega$.

При завершении развёртывания троса возникают совместные колебания груза по координатам $L(t)$ и $z(t)$. На рис. 5 в плоскости (L, z) показана траектория движения груза. Так как отношение частот $\omega_1/\omega_z = \sqrt{3}/2$ является несоизмеримым, то в течение длитель-

ного времени траектория движения груза зачертит прямоугольник, показанный на рис. 5. Увеличение амплитуды колебания ОТС в плоскости орбиты по координате $L(t)$ приводит к появлению дополнительных гармоник в процессе колебаний по координате $z(t)$.

Для управления колебаниями $z(t)$ используется также принцип параметрического резонанса.

$$S(t) = S + p_z \sin 2\omega_z t + \sigma F(t), \quad (29)$$

где p_z — параметр управления. В данном случае длина троса изменяется на удвоенной частоте колебания маятника в плоскости рыскания. Из уравнения (2.8) следует, что угловая скорость $\varphi'(t)$ будет содержать гармоническую составляющую $2\omega p_z \sin 2\omega_z t / S_0$.

Значение натяжения определяется (2.9) следующим образом:

$$F(t) = 3\omega_2 S (1 + \gamma \sin 2\omega_z t), \quad \gamma = \frac{4p_z}{S_0}. \quad (30)$$

Вариация натяжения на двойной частоте собственных колебаний координаты $z(t)$ в уравнении (27) приводит к эффекту параметрического возбуждения. Решение уравнения (27) может быть представлено в виде

$$z(t) = e^{\alpha_z t} A_z \sin(\omega_z t), \quad \alpha_z = -\frac{3}{2}\omega\gamma \quad (31)$$

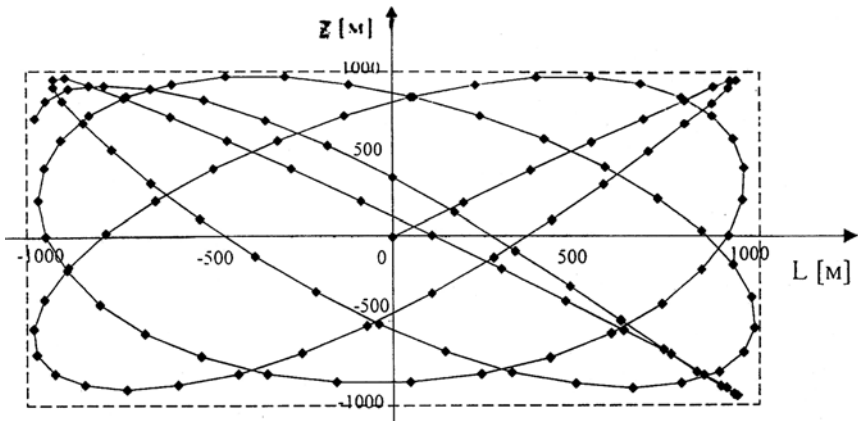


Рис. 5. Движение груза в картинной плоскости (L, z) при начальных условиях $L'(t_0) = 2 \text{ м/с}$, $z'(t_0) = 2 \text{ м/с}$

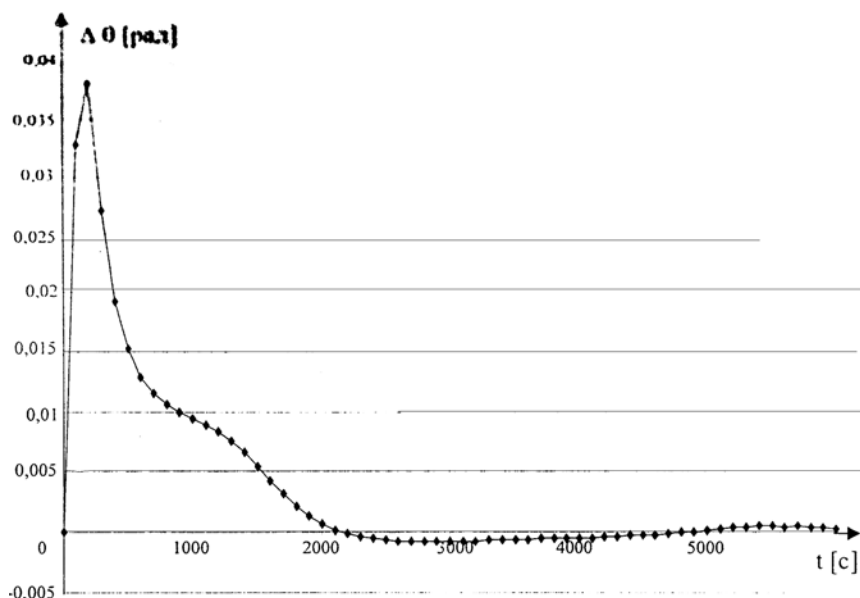


Рис. 6. Зависимость угла поворота груза относительно направления троса от времени

3.4. Угловые колебания груза-терминала относительно троса

После выталкивания груза могут возникнуть колебания по углу $\Delta\theta$ (см. рис. 2), которые характеризуют отклонение оси груза от направления троса. Если на грузе нет систем определения его углового положения, то нет возможности реализовать активное подавление колебаний груза по углу $\Delta\theta$. Математическое моделирование процессов колебания груза по углу показывает, что при выбранных параметрах системы к концу процесса развёртывания троса амплитуды колебания по углу $\Delta\theta$ сравнительно невелики. На рис. 6. показан процесс колебания $\Delta\theta$ угла на протяжении процесса развёртывания троса. Для дополнительного подавления колебаний можно предложить такую схему подвески груза, которая обеспечивает демпфирование угловых колебаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математическое моделирование процесса развёртывания троса путём интегрирования системы уравнений движения тросовой си-

стемы показало, что управлять движением троса (как для случая стабильного протекания процесса развёртывания троса, так и при подавлении продольных колебаний) можно с помощью алгоритма управления скоростью развёртывания троса в зависимости от величины натяжения троса, измеряемого датчиком, установленном на грузе-терминале. Такое управление движением троса позволяет создать орбитальную тросовую систему на базе Международной космической станции.

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 полётов в космическом пространстве без использования принципа реактивного движения // Полёт. 2002. № 9. С. 17–23.
- [Сидоров и др., 1981] *Сидоров И. М., Гончарова Л. И., Лебедев В. Г.* Управление движущимися объектами на основе алгоритма «с моделью». М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
- [Sidorov, Frolov, 2000] *Sidorov I. M., Frolov V. A.* Applications of Adaptive Control Algorithm with “Model” for Processes of Maneuvering and Docking With Random Disturbances // Proc. ASCE Intern. Conf. Space 2000 and Robotics 2000. New Mexico Albuquerque. USA. 2000. P. 221–228.

Оглавление

Введение	3
1. Принципиальная схема орбитальной тросовой системы на базе Международной космической станции. Предварительные параметры входящих в систему блоков	4
2. Алгоритмы управления процессом развёртывания троса. Моделирование основных динамических процессов, возникающих в тросе при управлении им, на имитационной модели	6
2.1. Уравнения движения тросовой системы	6
2.2. Динамика развёртывания тросовой системы	10
2.3. Управление процессом развёртывания троса	13
3. Управление колебаниями троса в режиме космического маятника при развёрнутом тросе	17
3.1. Продольные колебания троса	17
3.2. Колебания троса в плоскости орбиты	18
3.3. Колебания троса в плоскости рыскания	20
3.4. Угловые колебания груза-терминала относительно троса	22
Заключение	22
Литература	23