

Модификация механизма Йо-Йо

Гашение угловой скорости орбитальной ступени при помощи
механизма Йо-Йо без образования космического мусора

Юдинцев В. В., Асланов В. С.

Кафедра теоретической механики

28 марта 2017 г.



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

Содержание

- 1 История
- 2 Применение
- 3 Модель классического варианта механизма
- 4 Механизм Йо-Йо и космический мусор
- 5 Модель пространственного движения
- 6 Механизм без отделяющихся элементов
- 7 Результаты

Предисловие

JOURNAL OF GUIDANCE, CONTROL, AND DYNAMICS
Vol. 40, No. 3, March 2017

Engineering Notes

Detumbling Space Debris Using Modified Yo-Yo Mechanism

Vadim Yudintsev[†] and Vladimir Aslanov[†]
Samara National Research University, 443086, Samara,
Russia

DOI: 10.2514/1.G000686

Nomenclature

A_d	=	matrix that transforms coordinates from $Dx_dY_dZ_d$ to $Cxyz$ frame
d	=	diameter of the reel, m
J_x, J_y, J_z	=	moments of inertia of the target, kg · m ²
\bar{K}	=	angular momentum vector of the target, (kg · m ²) / s
l_i	=	unwrapped length of i th wire, m
l_{max}	=	length of i th wire, m
m	=	mass of the target, kg
m_i	=	mass of the i th mass, kg
q	=	vector of the generalized coordinates
r_i	=	position vector of i th mass, m
T_i	=	tension of i th wire, N
v_i	=	velocity vector of i th mass, m/s
x, y, z	=	target coordinates, m
$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$	=	angles describing position of i th yo-yo mass, rad
θ	=	angle between longitudinal axis of the target and the tether, rad
ρ_d	=	position vector of $Dx_dY_dZ_d$ reference frame, m
ψ, θ, φ	=	Euler angles describing orientation of the target, rad

I. Introduction

In this note, we consider a method for detumbling a space debris object using a modified yo-yo mechanism that does not contribute to space debris. A mathematical model of the spatial motion of the

deorbit space debris. In this case, the upper stage can carry an autonomous module (ADR module), which performs ADR-specific tasks after the separation of the main payload. These tasks include the final approach, docking, and detumbling space debris (targets) [12]. The ability to capture and safely deorbit depends on the attitude motion of the debris. The attitude motion of a nonfunctional satellite is determined by the performance of its control systems at the end of life. Orbital stages are not controlled after the separation of payload, and so the attitude motion is determined by the work of the payload separation devices. Upper stages after the separation of the payload can start rotating around the longitudinal axis due to the redistribution of the angular momentum between the body of orbital stage and the rotating parts during the separation.

Docking can be performed before docking with the target using, for example, a brush-type contactor as the end effector of a robot arm [2,13] or repeated mechanical impulses [14]. The attitude motion of the ADR module can be synchronized to the target's so that the capturing operation can be conducted with small relative motion [15]. A probe-cone mechanism can be used for the docking with the tumbling target using the nozzle of the target as a "cone" part of the probe-cone mechanism [16,17]. For safe docking of the ADR module and docked debris with the space tug, the space debris should be detumbled. Several techniques can be used to do this. For example, energy dissipation can be used to change the motion of the debris [18]. The docking module can be equipped with rocket thrusters. The attitude motion of the target can be partially stabilized by using the tether, which connects the ADR module and the space tug [19–21]. The general rotational motion of space debris involves spin, nutation, and precession. If the tether attachment point is on the longitudinal axis of the debris, the spin rate around this axis cannot be eliminated using this tether.

Here, we propose to use a modified yo-yo mechanism to despin a space debris object. We assume that the ADR module docked with the target debris (the docking process with tumbling debris is a separate complex task, which is beyond the scope of this note). We imagine the following mission scenario using the modified yo-yo mechanism (Fig. 1). The yo-yo mechanism can be installed on the ADR module. During the final approach stage, the ADR module is separated from the upper stage.

Презентация подготовлена по материалам инженерной заметки “*Detumbling Space Debris Using Modified Yo-Yo Mechanism*” (Юдинцев В. Б., Асланов В. С.) Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 40, No. 3 (2017), pp. 714-721.

<https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.G000686>

История

Йо-Йо



440 г. до н.э.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Yo-yo>

Miller, Stephen G. (2004). Ancient Greek Athletics. Yale University Press. pp. 169–



“Наши дни”

Патент

April 17, 1962 W. C. PILKINGTON, JR., ET AL 3,030,049
SATELLITE SPIN CONTROL
Filed Dec. 11, 1959 4 Sheets-Sheet 2

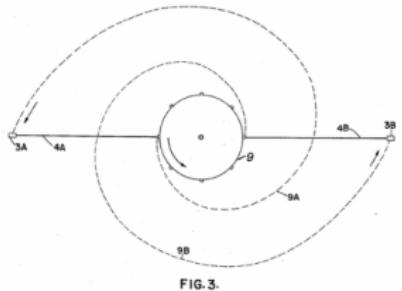


FIG. 3.

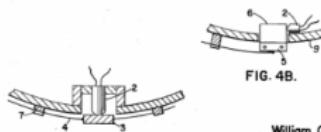
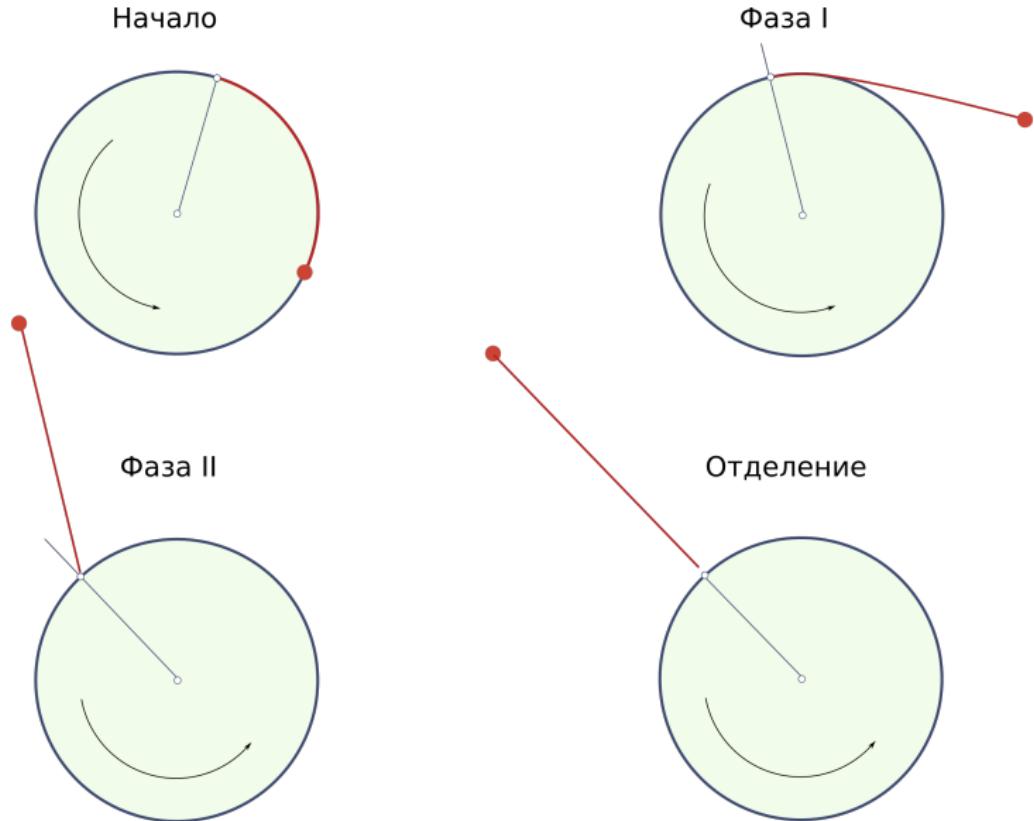


FIG. 4A.

William C. Pilkington,
William S. McDonald
Willard H. Wells,
INVENTORS
BY S. J. Rotondo,
A. T. Despart, and
Alvin E. Moore,
ATTORNEYS

- Механизм Йо-Йо изобретён в лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института (Caltech) в 1961 году.
- Патент US 3030049 A. Авторы: Jr William C. Pilkinson, William S. McDonald, Willard H. Wells.
- В патенте не используется термин Йо-Йо (Yo-Yo)

Фазы движения



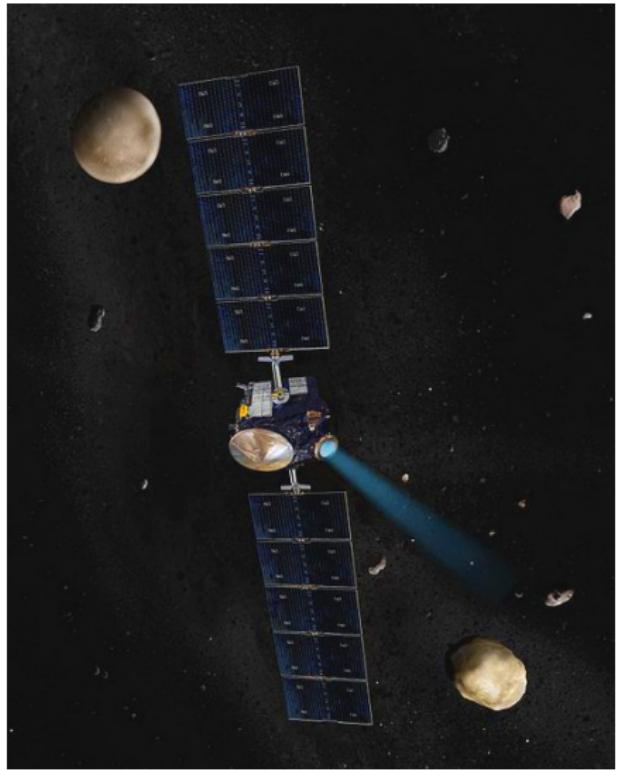
Работа механизма

Применение

Геофизическая ракета

<https://youtu.be/izfMNhaQ7SQ?t=1m28s>

КА DAWN (Рассвет): Земля-Веста-Церера



- АМС для исследования Весты и Цереры (2007 г.)
- Вторая космическая скорость сообщалась III ступенью РН Дельта-2
- III ступень стабилизировалась вращением: **46 оборотов в минуту**

КА DAWN (Рассвет): Земля-Веста-Церера

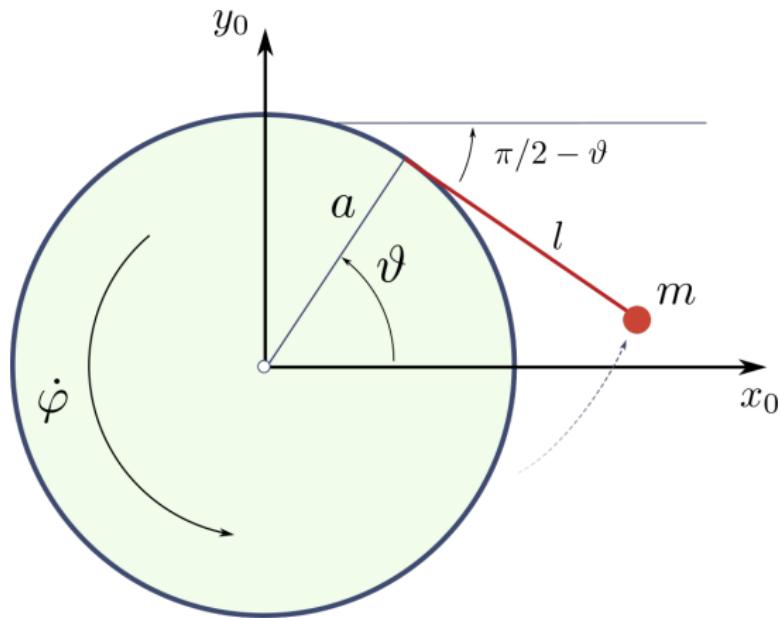


- За 5 секунд до отделения КА от III ступени срабатывал Йо-Йо механизм
- Длина троса: 12 метров
- Масса груза: 1.44 кг (массы грузов подбирались **с точностью до 1 грамма**)
- Время работы механизма 4 секунды

Модель классического варианта механизма

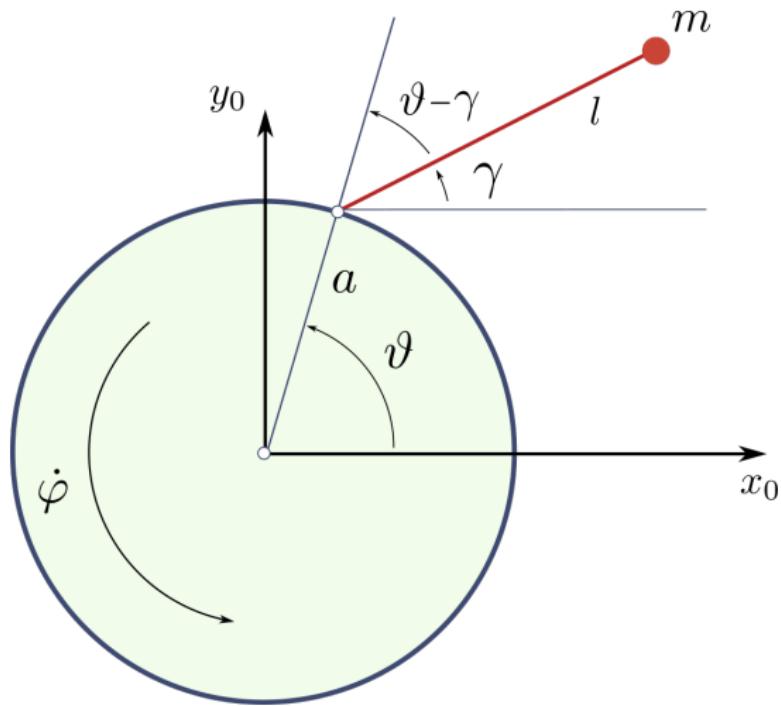
Две фазы движения

Фаза 1 - увеличение свободной длины троса



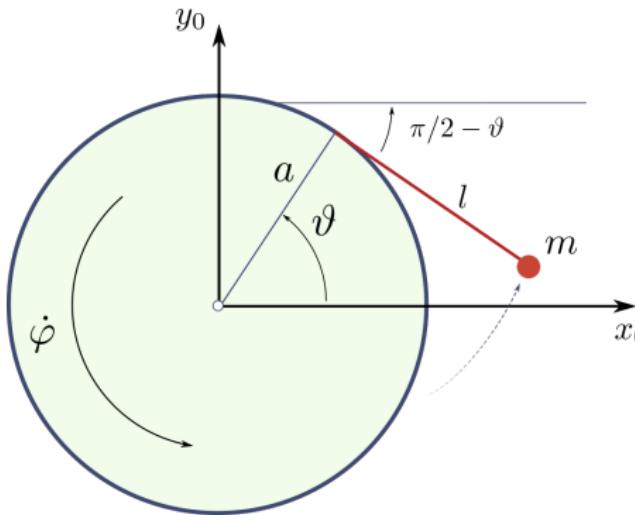
Две фазы движения

Фаза 2 - вращение троса вокруг точки закрепления



Кинетическая энергия

Фаза 1



$$2T = J\dot{\varphi}^2 + m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)$$

Координаты груза

$$x = a \cos \vartheta + l \sin \vartheta$$

$$y = a \sin \vartheta - l \cos \vartheta$$

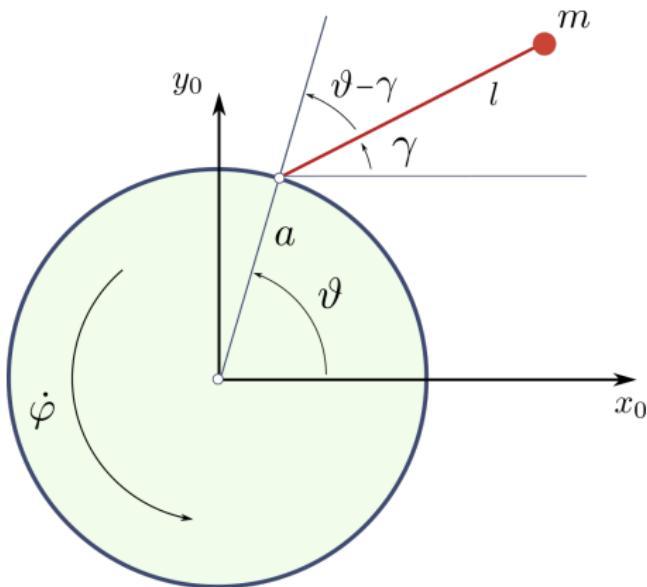
Длина троса

$$l = a(\vartheta - \varphi)$$

$$2T = J\dot{\varphi}^2 + m(l^2\dot{\vartheta}^2 + a^2\dot{\varphi}^2)$$

Кинетическая энергия

Фаза 2



Координаты груза

$$x = a \cos \vartheta + l \cos \gamma$$

$$y = a \sin \vartheta + l \sin \gamma$$

Длина троса $l = \text{const}$

$$\begin{aligned} 2T = & J\dot{\varphi}^2 + m[a^2\dot{\varphi}^2 + \\ & + 2al\cos(\vartheta - \gamma)\dot{\varphi}\dot{\gamma} + l^2\dot{\gamma}^2] \end{aligned}$$

Законы сохранения

Закон сохранения энергии:

$$2T_0 = \boxed{(J + ma^2)\omega_0^2} = 2T_k = \boxed{J\omega_k^2 + m(a\omega_k + l\dot{\gamma})^2} \quad (1)$$

Закон сохранения кинетического момента:

$$K_0 = \boxed{(J + ma^2)\omega_0} = K_k = \boxed{J\omega_0 + m(l + a)(a\omega_k + l\dot{\gamma})} \quad (2)$$

Исключая из двух уравнений $\dot{\gamma}$:

$$r = \frac{\omega_k}{\omega_0} = \frac{\left(\frac{G+1}{l/a+1}\right)^2 - (G+1)}{G}, \quad G = \frac{J(1-r)}{ma^2}$$

Упрощаем

Момент инерции объекта относительно оси вращения значительно больше начального момента инерции груза относительно той же оси:

$$J \gg ma^2 \quad \rightarrow \quad G = \frac{J(1 - r)}{ma^2} \gg 1$$

тогда:

$$\begin{aligned} r &= \frac{\omega_k}{\omega_0} = \frac{\left(\frac{G+1}{l/a+1}\right)^2 - (G+1)}{G} \approx \\ &\approx \frac{\left(\frac{G+1}{l/a+1}\right)^2 - (G+1)}{G + 1} = \boxed{\frac{G+1}{(l/a+1)^2} - 1} \end{aligned}$$

Упрощаем

$$r = \frac{G + 1}{(l/a + 1)^2} - 1 \leftarrow G = \frac{J(1 - r)}{ma^2} \Rightarrow$$

$$\frac{J}{m(l + a)^2} = \frac{1 + r - (l/a + 1)^{-2}}{1 - r}$$

Если длина троса больше длины окружности катушки

$$l/a > 2\pi$$

то

$$\frac{J}{m(a + l)^2} = \frac{1 + r - (l/a + 1)^{-2}}{1 - r} \approx \frac{1 + r}{1 - r}$$

Проектные параметры

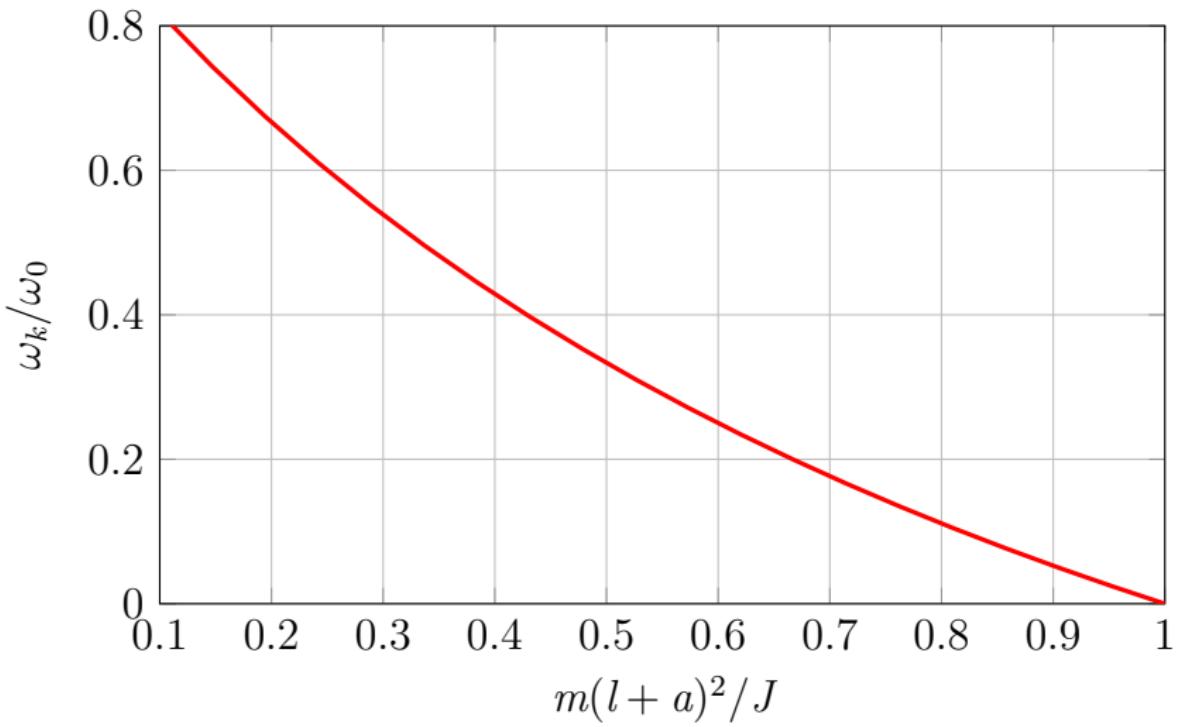
$$\frac{J}{m(a+l)^2} = \frac{1+r}{1-r}, \quad r = \frac{\omega_k}{\omega_0}$$

$$l = \sqrt{\left(\frac{1-r}{1+r}\right) \frac{J}{m}} - a$$

$$\omega_k = \omega_0 \frac{J - m(a+l)^2}{J + m(a+l)^2}$$

J. V. Fedor, Theory And Design Curves for a Yo-Yo De-spin Mechanism for Satellites, Greenbelit, 1961.

Проектные параметры



Пример

- Продольный момент инерции ступени РН: $1300 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
- Радиус ступени: 1 м
- Масса двух грузов: $m = 2 \cdot 6.5 \text{ кг}$
- Длина троса для полной остановки вращения ступени ($r = 0$):

$$l = \sqrt{J/m} - a = \sqrt{1.3 \cdot 10^3 / 13} - 1 \approx 9.0 \text{ м}$$

Погрешность по отношению к точной формуле: 0.6 %

Погрешности

Конечная угловая скорость:

$$\omega_k = \omega_0 \frac{J - m(a + l)^2}{J + m(a + l)^2}$$

Влияние погрешности начальной угловой скорости:

$$\Delta\omega_k \approx \frac{\partial\omega_k}{\partial\omega_0} \Delta\omega_0 = \frac{J - m(a + l)^2}{J + m(a + l)^2} \Delta\omega_0 = \frac{\omega_k}{\omega_0} \Delta\omega_0 = \omega_k \varepsilon_{\omega_0}$$

Относительная погрешность конечной угловой скорости равна относительной погрешности начальной угловой скорости:

$$\boxed{\varepsilon_{\omega_k} = \varepsilon_{\omega_0}}$$

Погрешности

Конечная угловая скорость:

$$\omega_k = \omega_0 \frac{J - m(a + l)^2}{J + m(a + l)^2}$$

Влияние погрешности определения момента инерции объекта:

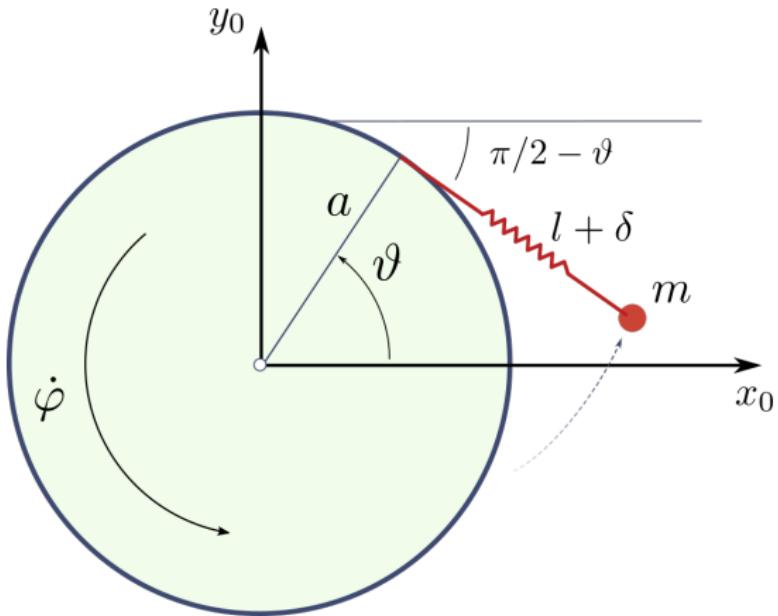
$$\Delta\omega_k \approx \frac{\partial\omega_k}{\partial J} \Delta J = \omega_0 \frac{2m(a + l)^2}{[m(a + l)^2 + J]^2} J \varepsilon_J = \frac{\varepsilon_J}{2} \omega_0$$

ε_J – относительная погрешность момента инерции.

Для $\omega_k = 0$

$$\boxed{\Delta\omega_k \approx \frac{\varepsilon_J}{2} \omega_0}$$

Йо-Йо с упругим тросом



Оптимальное значение жёсткости:

$$c^* = \arg \min_c \delta\omega_k(\delta\omega_0)$$

$$c^* = \frac{\omega_0^2(1 - r^2)J}{2r(l + a)(l + a + \delta)}$$

где $r = \omega_0/\omega_k$,

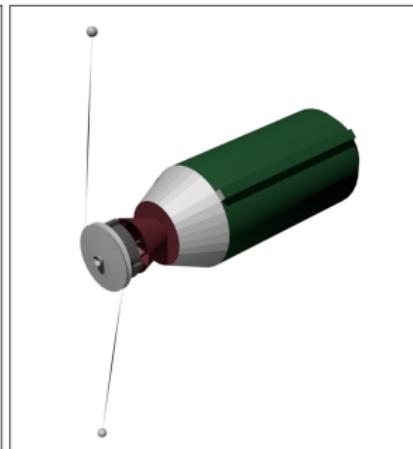
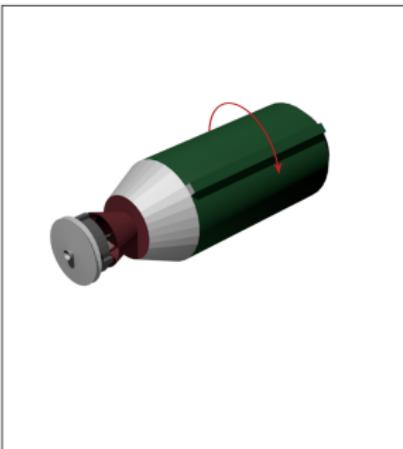
$$\delta = \frac{r(l_0 + a)}{1 - r}$$

Патент US 3229930 A

J. V. Fedor, Analytical Theory of the stretch Yo-Yo for de-spin of Satellites, Greenbelt, 1963, стр. 7-8.

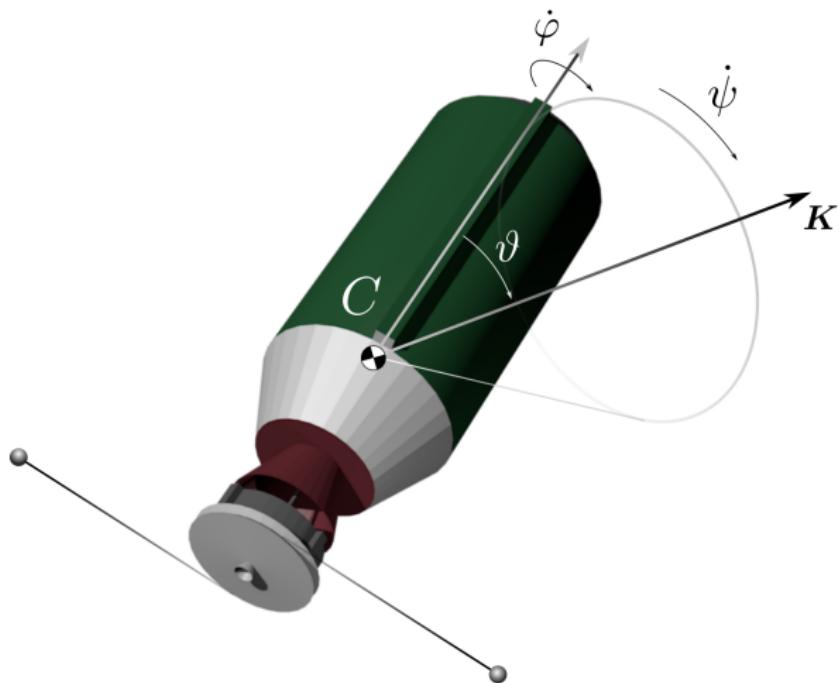
Механизм Йо-Йо и космический мусор

Стыковочный модуль



- Сближение стыковочного модуля с целью
- Стыковка или захват
- Гашение продольной угловой скорости

Проблемы



- Плоскость “катушки” расположена далеко от центра масс объекта
- Объект движется вокруг центра масс произвольным образом
- При работе механизма Йо-Йо образуется космический мусор

Йо-Йо и космический мусор

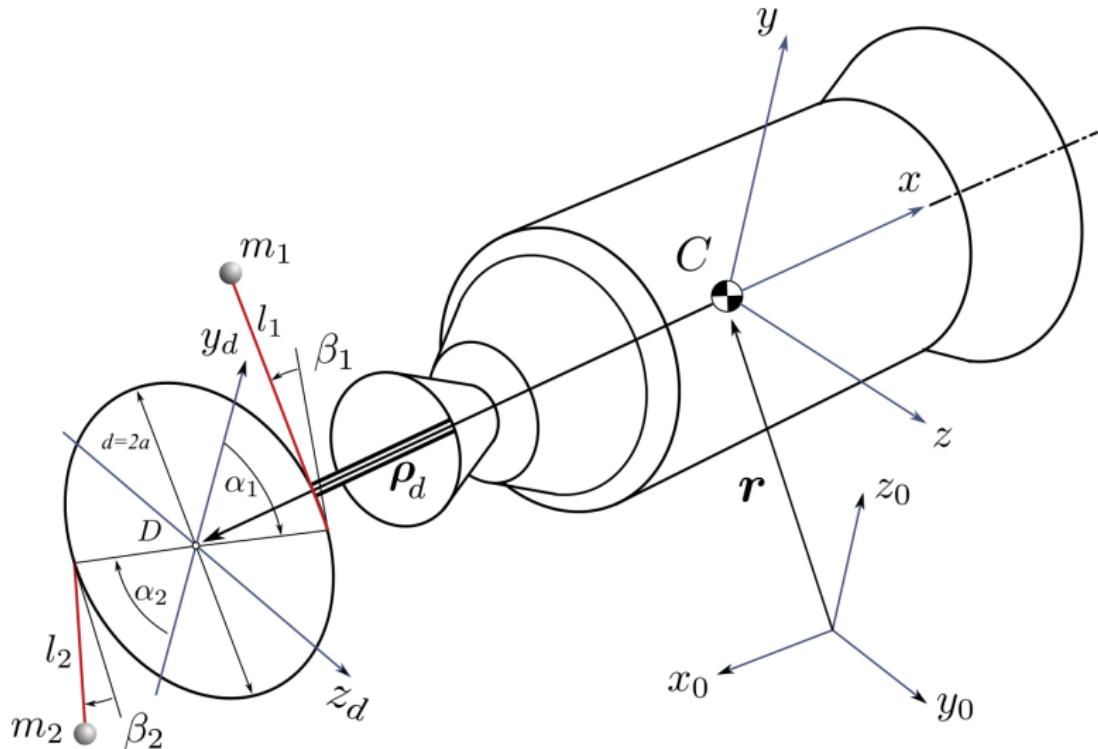


В 2003 вблизи станции пролетели фрагменты механизма Yo-Yo образовавшиеся в результате выведения РН

Модель пространственного движения

Схема системы

$$\mathbf{q} = (x, y, z, \psi, \theta, \varphi, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2)$$



Кинематические соотношения

Положение грузов

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r} + \mathbf{A}(\boldsymbol{\rho}_d + \mathbf{A}_d \boldsymbol{\rho}_i), \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

Абсолютная скорость грузов

$$\mathbf{v}_i = \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v} + \mathbf{A}\tilde{\boldsymbol{\omega}}(\boldsymbol{\rho}_d + \mathbf{A}_d \boldsymbol{\rho}_i) + \mathbf{A}\mathbf{A}_d \dot{\boldsymbol{\rho}}_i \quad (4)$$

Относительное движение. Фаза 1

Положение грузов относительно катушки:

$$\rho_i = \begin{bmatrix} -l_i \sin \beta_i \\ l_i \cos \beta_i \sin \alpha_i + d/2 \cos \alpha_i \\ d/2 \sin \alpha_i - l_i \cos \beta_i \cos \alpha_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

Скорость грузов относительно катушки:

$$\dot{\rho}_i = \frac{d}{2} \begin{bmatrix} -\sin \beta_i \\ (2l_i \cos \alpha_i / d + \sin \alpha_i) \cos \beta_i - \sin \alpha_i \\ (2l_i \sin \alpha_i / d - \cos \alpha_i) \cos \beta_i + \cos \alpha_i \end{bmatrix} \dot{\alpha}_i + \\ + l_i \begin{bmatrix} -\cos \beta_i \\ -\sin \beta_i \sin \alpha_i \\ \sin \beta_i \cos \alpha_i \end{bmatrix} \dot{\beta}_i \quad (6)$$

Относительное движение. Фаза 2

Положение грузов относительно катушки:

$$\rho_i = \begin{bmatrix} -l_i \sin \beta_i \\ d/2 \cos \alpha_i + l_i \cos \beta_i \sin(\alpha_i + \gamma_i) \\ d/2 \sin \alpha_i - l_i \cos \beta_i \cos(\alpha_i + \gamma_i) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Скорость грузов относительно катушки:

$$\dot{\rho}_i = l_i \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \beta_i \cos(\alpha_i + \gamma_i) \\ \cos \beta_i \sin(\alpha_i + \gamma_i) \end{bmatrix} \dot{\gamma}_i + l_i \begin{bmatrix} \cos \beta_i \\ -\sin \beta_i \sin(\alpha_i + \gamma_i) \\ \sin \beta_i \cos(\alpha_i + \gamma_i) \end{bmatrix} \dot{\beta}_i \quad (8)$$

Уравнения движения

Кинетическая энергия:

$$2T = m\mathbf{v}^2 + \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{J} \boldsymbol{\omega} + m_1 \mathbf{v}_1^2 + m_2 \mathbf{v}_2^2 \quad (9)$$

Уравнения движения:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

Обобщенные координаты для различных фаз движения

I,I $\mathbf{q} = (x, y, z, \psi, \theta, \varphi, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2)$

I,II $\mathbf{q} = (x, y, z, \psi, \theta, \varphi, \alpha_1, \beta_1, \gamma_2, \beta_2)$

II,II $\mathbf{q} = (x, y, z, \psi, \theta, \varphi, \gamma_1, \beta_1, \gamma_2, \beta_2)$

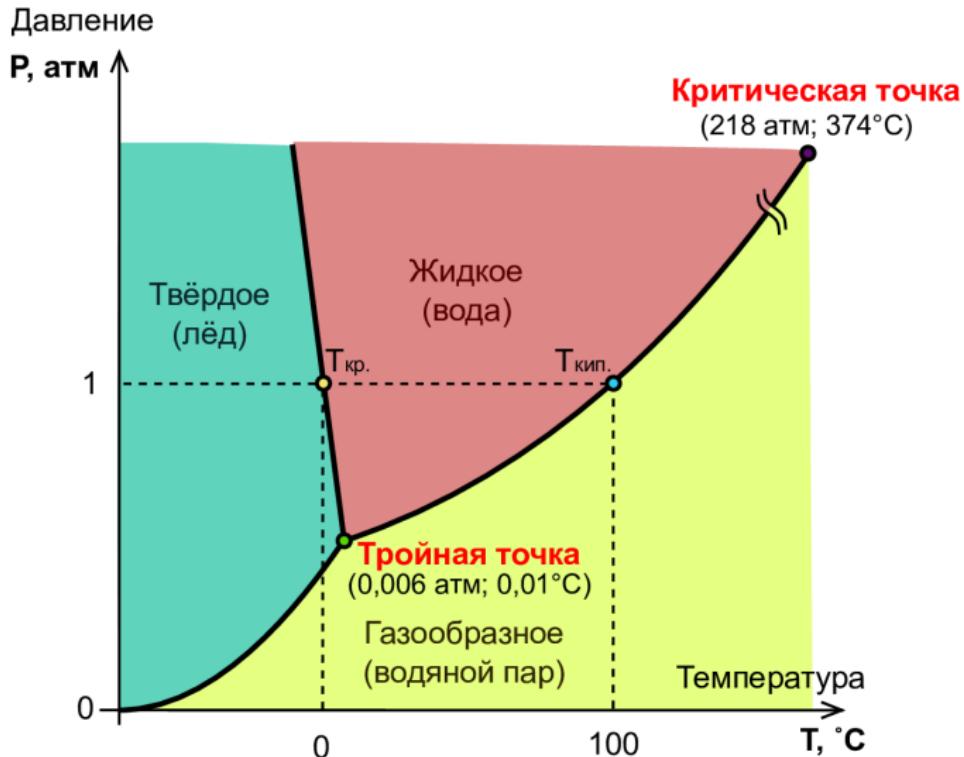
II,_ $\mathbf{q} = (x, y, z, \psi, \theta, \varphi, \gamma_1, \beta_1)$

Механизм без отделяющихся элементов

Идея

- Грузы – оболочки, заполненные жидкостью
- Оболочки раскрываются в момент отделения грузов
- ❄ Жидкость “закипает” и замерзает, превращаясь в кристаллики льда, рассеиваясь в пространстве

Фазовая диаграмма

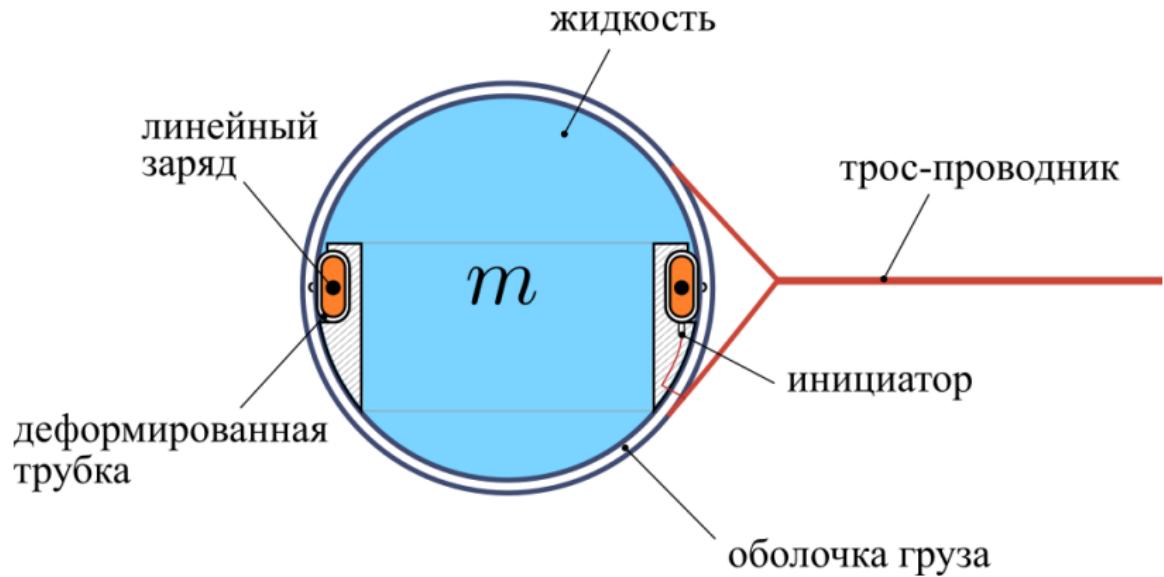


Эксперимент

RodStormTV

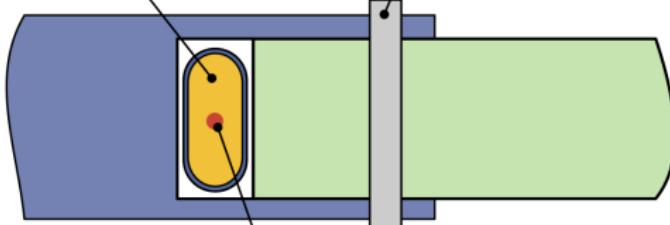
https://www.youtube.com/watch?v=1V6uE_h7UHE

Возможная конструкция груза

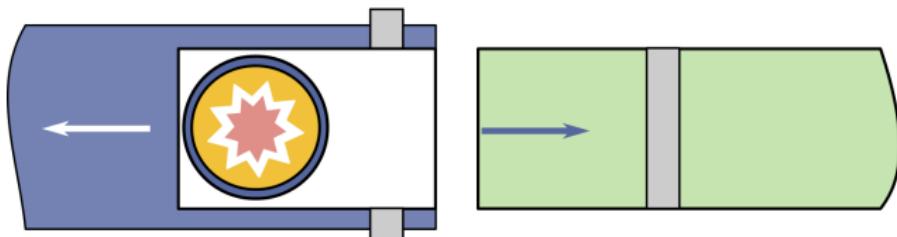


Механизм Super-ZIP

эластомерная оболочка
штифт

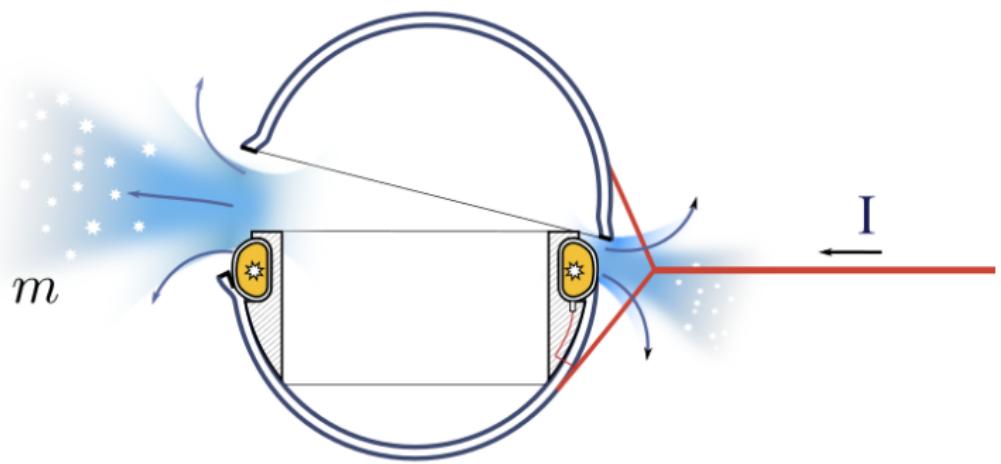


заряд



K. Y. Chang, "Pyrotechnic devices, shock levels, and their applications," in Proceedings of the Pyroshock Seminar, ICSV9, 2002.

Возможная конструкция груза



Габариты груза

- Продольный момент инерции ступени РН: $1300 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
- Радиус ступени: 1 м
- Масса двух грузов: $m = 2 \cdot 6.5 \text{ кг}$
- Длина троса для полной остановки вращения ступени ($r = 0$):

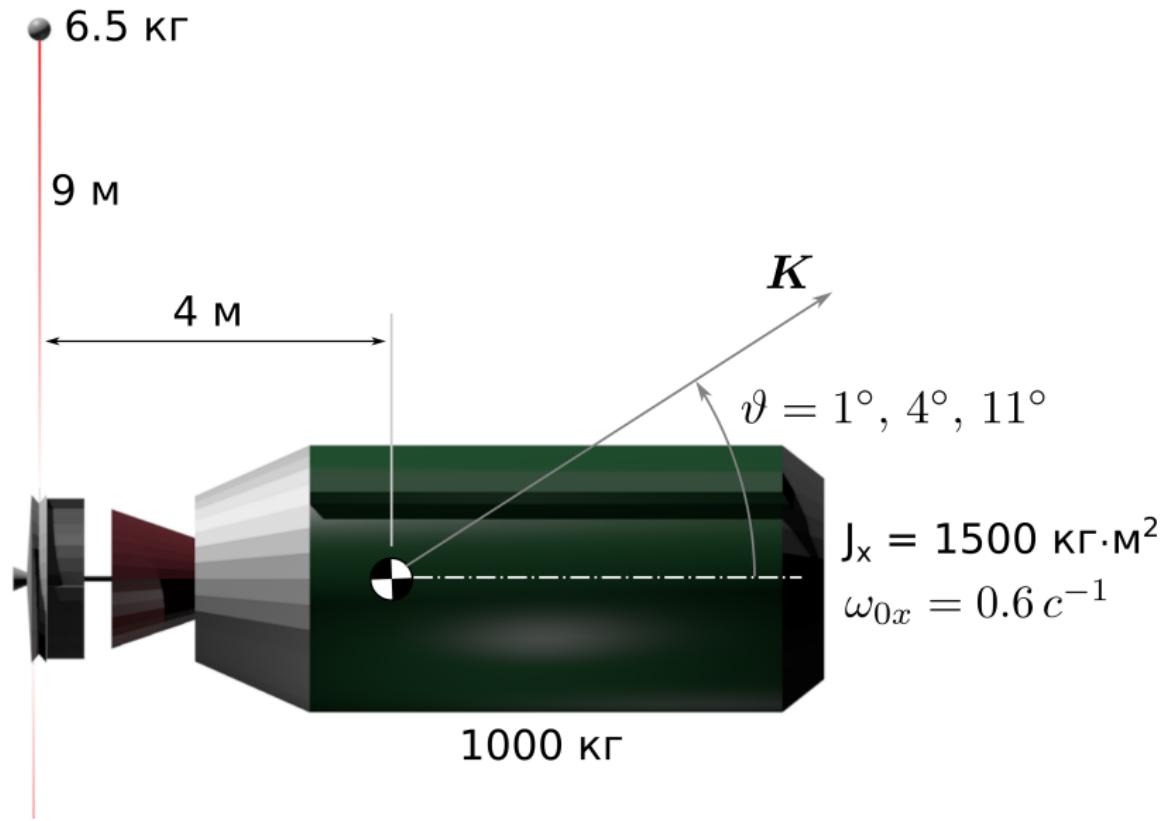
$$l = \sqrt{J/m} - a = \sqrt{1.3 \cdot 10^3 / 13} - 1 \approx 9.0 \text{ м}$$

- Необходимый диаметр полости для груза массы 6.5 кг, заполненного водой:

$$d_m = 2 \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} = 2 \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 6.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{4\pi}} \approx 23 \text{ см}$$

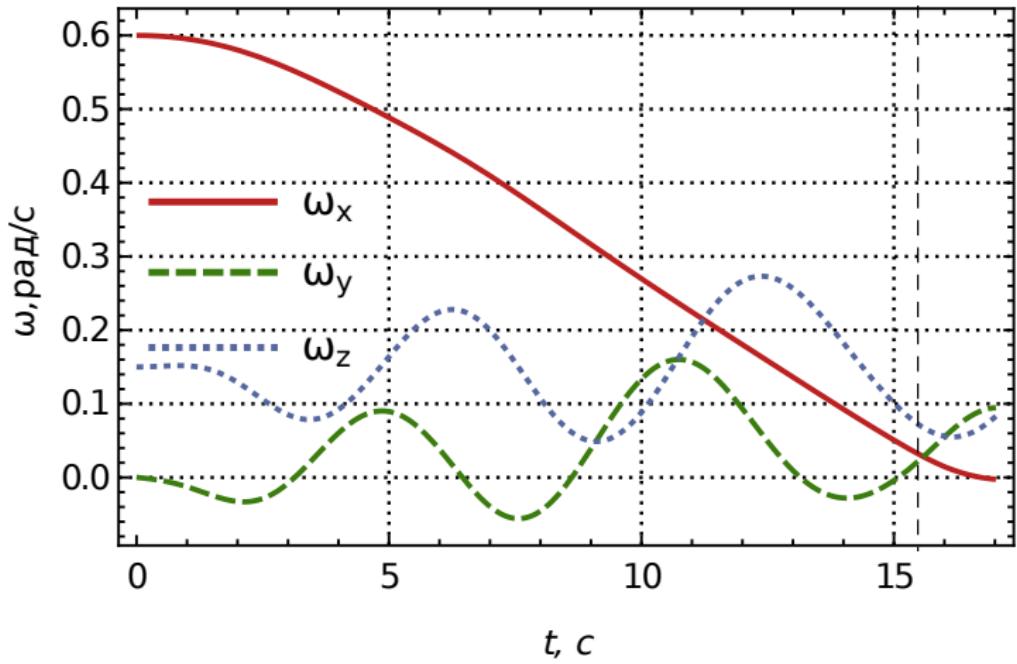
Результаты

Параметры



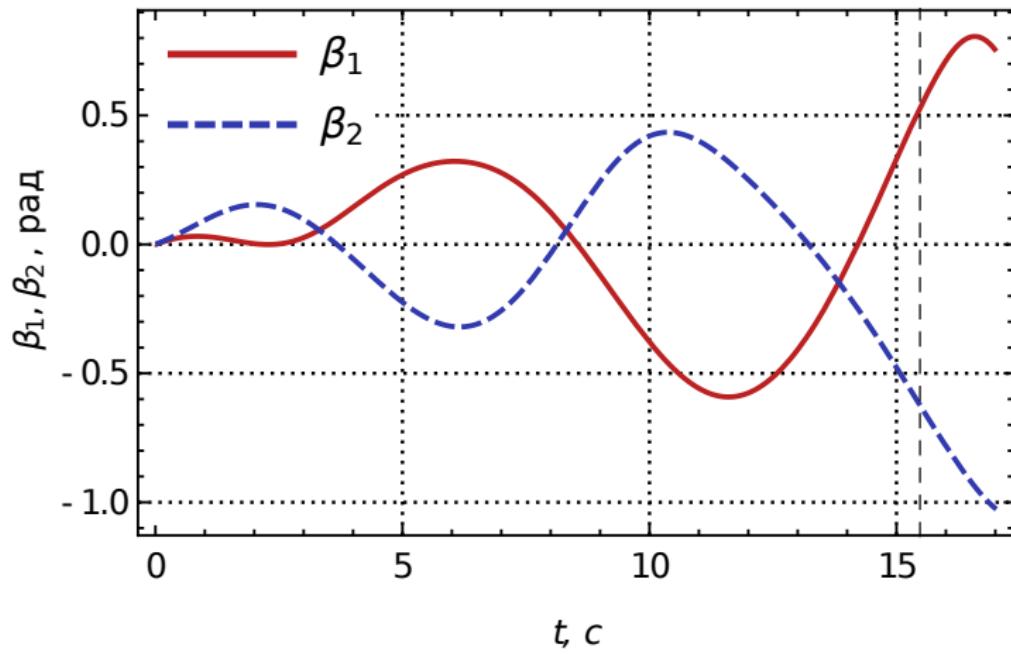
Угловая скорость

Начальный угол нутации объекта 11 градусов.



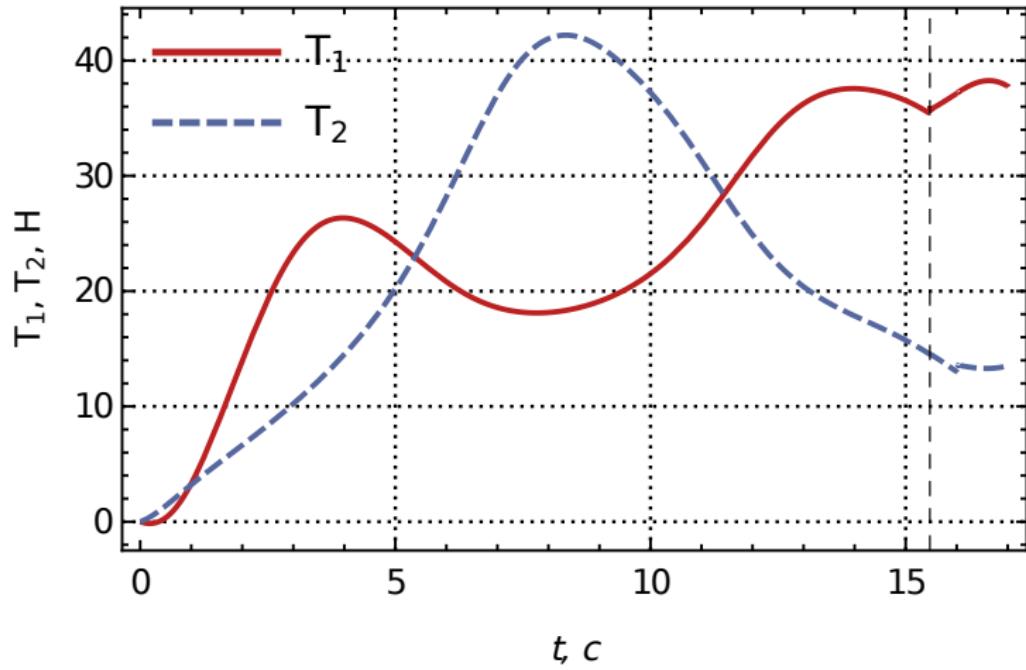
Угол выхода тросов из плоскости

Начальный угол нутации объекта 11 градусов.



Натяжение тросов

Начальный угол нутации объекта 11 градусов.



Движение

Выводы

- Предложена конструкция грузов, позволяющая исключить образование космического мусора при работе механизма Йо-Йо
- Разработана математическая модель пространственного движения механизма
- Показана возможность использования механизма Йо-Йо для гашения угловой скорости объектов космического мусора, вращающихся преимущественно вокруг продольной оси