

В. В. К о р о в и н, А. В. П о п о в,
В. И. У с ю к и н

ДИНАМИКА НЕУПРАВЛЯЕМОГО РАЗВЕРТЫВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СВЯЗКИ

Рассмотрено разворачивание на орбите космической тросовой связки путем отделения привязного спутника (зонда) от базового космического аппарата. Проанализирована возможность получения минимальной амплитуды маятниковых колебаний (либраций) связки по окончании переходного процесса.

E-mail: korovinvv@mail.ru; bbee-popov@yandex.ru

Ключевые слова: космическая тросовая связка, динамика неуправляемого разворачивания, амплитуда либраций.

Задача исследования динамики космических тросовых связок (КТС), разворачиваемых в неуправляемом режиме, актуальна в связи с предполагаемым проведением тросовых экспериментов в космосе и освоением технологии практического использования связанных космических объектов. Разворачивание КТС рассматривается, например, в известных монографиях [1 и 2], работе [3], где использованы аналитические и численно-аналитические подходы, дающие качественную картину исследуемых процессов. В настоящей статье приведены результаты ряда численных расчетов с учетом следующих допущений: концевые тела моделируются материальными точками; связь концевых тел — невесомая вязкоупругая гибкая нить; орбита центра масс полагается круговой; разворачивание происходит в неуправляемом режиме; привязной спутник осуществляет свободное движение до выхода на связь, а при выходе на связь происходит удар с частичным поглощением энергии. Последующая серия отскоков приводит к гашению радиальной составляющей скорости и переходу связки в режим либраций. В другом варианте концевые тела связки оснащаются демпферами, гасящими радиальную составляющую скорости при первом выходе на связь без отскока.

Математическая модель движения космической тросовой связки строится с использованием уравнений движения материальной точки, в правых частях которых добавляются реакции нити. Уравнения движения материальной точки могут быть записаны в геоцентрической (инерциальной) или орбитальной (неинерциальной) системах отсчета. В геоцентрической прямоугольной системе уравнения движения имеют следующий вид:

$$\ddot{x} = -\frac{\mu x}{r^3}; \quad \ddot{y} = -\frac{\mu y}{r^3}; \quad \ddot{z} = -\frac{\mu z}{r^3}, \quad (1)$$

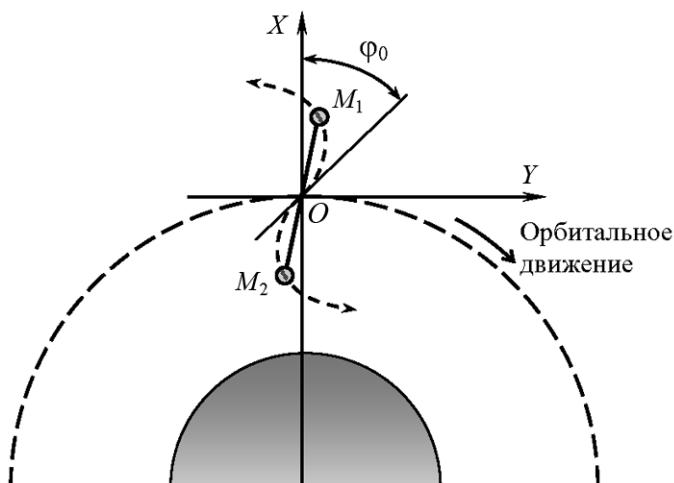


Рис. 1. Схема развертывания тросовой связки

где $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – геоцентрический радиус-вектор материальной точки; $\mu = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ – гравитационная постоянная Земли.

Орбитальную систему координат (ОСК) $OXYZ$ определим следующим образом (рис. 1). Начало O ОСК движется по круговой орбите радиусом R_0 с постоянной угловой скоростью:

$$\omega = \sqrt{\frac{\mu}{R_0^3}}.$$

Ось X ОСК направлена по нормали к опорной орбите – вверх по местной вертикали. Ось Y направлена по трансверсали к опорной орбите – вперед по направлению полета. Ось Z дополняет систему до правой – она направлена по вектору угловой орбитальной скорости. Поскольку ОСК является неинерциальной, при математическом описании движения в ней учитываются не только гравитационные и другие внешние силы, но также центробежные и кориолисовы силы инерции:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= 2\omega\dot{y} + \omega^2(R_0 + x) - \frac{\mu(R_0 + x)}{((R_0 + x)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}; \\ \ddot{y} &= -2\omega\dot{x} + \omega^2y - \frac{\mu y}{((R_0 + x)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}; \\ \ddot{z} &= -\frac{\mu z}{((R_0 + x)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где x, y, z – координаты точки в ОСК.

В правых частях первых двух уравнений (2) первые слагаемые – ускорения от силы Кориолиса, затем идут слагаемые, связанные с центробежными и гравитационными силами.

Уравнения (2) при $x, y, z \ll R_0$ можно линеаризовать, что приводит к уравнениям Клохесси–Уилтшайра, используемым при расчете взаимного маневрирования двух КА на орбите:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= 3\omega^2 x + 2\omega \dot{y}; \\ \ddot{y} &= -2\omega \dot{x}; \\ \ddot{z} &= -\omega^2 z.\end{aligned}\tag{3}$$

Уравнения в форме (3) можно применять, когда длина тросовой связки хотя бы на два порядка меньше геоцентрического радиуса ОСК. Для низких околоземных орбит это дает допустимый размер 70 км, что охватывает почти все предлагаемые к реализации проекты КТС.

Сравнивая уравнения движения в форме (1)–(3), можно указать следующее. Уравнения (1) более простые по форме, но требуют выполнения численных расчетов с максимально возможной точностью, так как здесь геоцентрические радиусы-векторы точек КТС близки по значению, что может привести к влиянию погрешностей округления на результаты численного моделирования.

Если на материальную точку, помимо гравитационного притяжения Земли, действуют другие силы (например, сила аэродинамического сопротивления) или реакции связей (например, сила натяжения троса), соответствующие возмущающие ускорения учитываются в правых частях уравнений. Применительно к системе (3) это дает следующие уравнения движения концевой массы в составе КТС:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= 3\omega^2 x + 2\omega \dot{y} + \frac{N_x}{M}; \\ \ddot{y} &= -2\omega \dot{x} + \frac{N_y}{M}; \\ \ddot{z} &= -\omega^2 z + \frac{N_z}{M},\end{aligned}$$

где N_x, N_y, N_z – проекции силы натяжения троса, действующей на концевую массу M тросовой связки, на оси ОСК.

Проекции силы натяжения троса на оси любой системы координат в общем случае определяются через ее абсолютное значение N и координаты концевых масс КТС в этой системе отсчета:

$$\begin{aligned}N_x &= N \frac{x_{T2} - x_{T1}}{\sqrt{(x_{T2} - x_{T1})^2 + (y_{T2} - y_{T1})^2 + (z_{T2} - z_{T1})^2}}; \\ N_y &= N \frac{y_{T2} - y_{T1}}{\sqrt{(x_{T2} - x_{T1})^2 + (y_{T2} - y_{T1})^2 + (z_{T2} - z_{T1})^2}};\end{aligned}$$

$$N_z = N \frac{z_{T2} - z_{T1}}{\sqrt{(x_{T2} - x_{T1})^2 + (y_{T2} - y_{T1})^2 + (z_{T2} - z_{T1})^2}},$$

где x_{T1}, y_{T1}, z_{T1} и x_{T2}, y_{T2}, z_{T2} — текущие координаты верхней и нижней конечных масс соответственно в используемой системе отсчета. Тогда

$\sqrt{(x_{T2} - x_{T1})^2 + (y_{T2} - y_{T1})^2 + (z_{T2} - z_{T1})^2} = l$ — текущая длина троса.

Натяжение троса N определяется с помощью его физической модели. В случае упругого троса имеем

$$N = \begin{cases} EF\varepsilon = EF \frac{l - l_0}{l_0} & \text{при } \varepsilon > 0; \\ 0 & \text{при } \varepsilon \leq 0, \end{cases}$$

где l и l_0 — текущая длина троса с учетом деформации и в недеформированном состоянии; EF — жесткость троса на растяжение.

В модели вязкоупругого троса положительная сила натяжения определяется формулой

$$N = EF(\varepsilon + \alpha \dot{\varepsilon});$$

здесь α — коэффициент вязкого сопротивления троса; $\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{l}l_0 - l\dot{l}_0}{l_0^2}$ — скорость деформации.

Развертывание связки начинается с сообщения начальных импульсов конечным массам. Вследствие действия в орбитальной системе отсчета кориолисовой силы, траектории движения конечных масс в ОСК представляют собой участки эллипсов (см. рис. 1). Номинальное движение КТС происходит в плоскости орбиты. В случае, если трение при сматывании троса со шпули не учитывается, получаем участок свободного движения конечных масс до выхода на связь, когда расстояние между массами равно полной длине троса. Далее происходит отскок конечных масс и их переход в несвязанное движение. Характер отскока и последующего движения зависит от начальных условий развертывания и упруго-диссипативных свойств троса. По окончании переходного процесса, вследствие рассеяния энергии при натяжениях троса, отскоки конечных тел прекращаются. Космическая тросовая связка фактически превращается в жесткий маятник, совершающий либрационные колебания относительно центра масс в плоскости орбиты.

Одним из существенных факторов, определяющих характер развертывания, является угол начального импульса φ_0 , отсчитываемый от местной вертикали (см. рис. 1). Приводимые далее результаты показывают, что рациональные значения углов φ_0 лежат в диапазоне $0^\circ \dots 45^\circ$. В этом случае достигаются минимальные амплитуды установившихся колебаний по окончании переходного процесса. Вне указанного диа-

пазона амплитуда маятниковых колебаний связки нарастает и может происходить переворот развертываемой КТС.

На рис. 2–5 приведены результаты численного моделирования развертывания связок при следующих исходных данных: длина троса $l = 5000$ м, жесткость при растяжении $EF = 4500$ Н, верхняя конечная масса $M_1 = 6000$ кг, нижняя конечная масса $M_2 = 25$ кг, начальная относительная скорость конечных масс $v_0 = 6$ м/с. Типичная картина движения нижней конечной массы развертываемой связки при $\varphi_0 = 35^\circ$ приведена на рис. 2, а. Здесь коэффициент вязкого сопротивления троса α принят равным 0,05, что соответствует характеристикам ряда реальных образцов. Характерной особенностью процесса

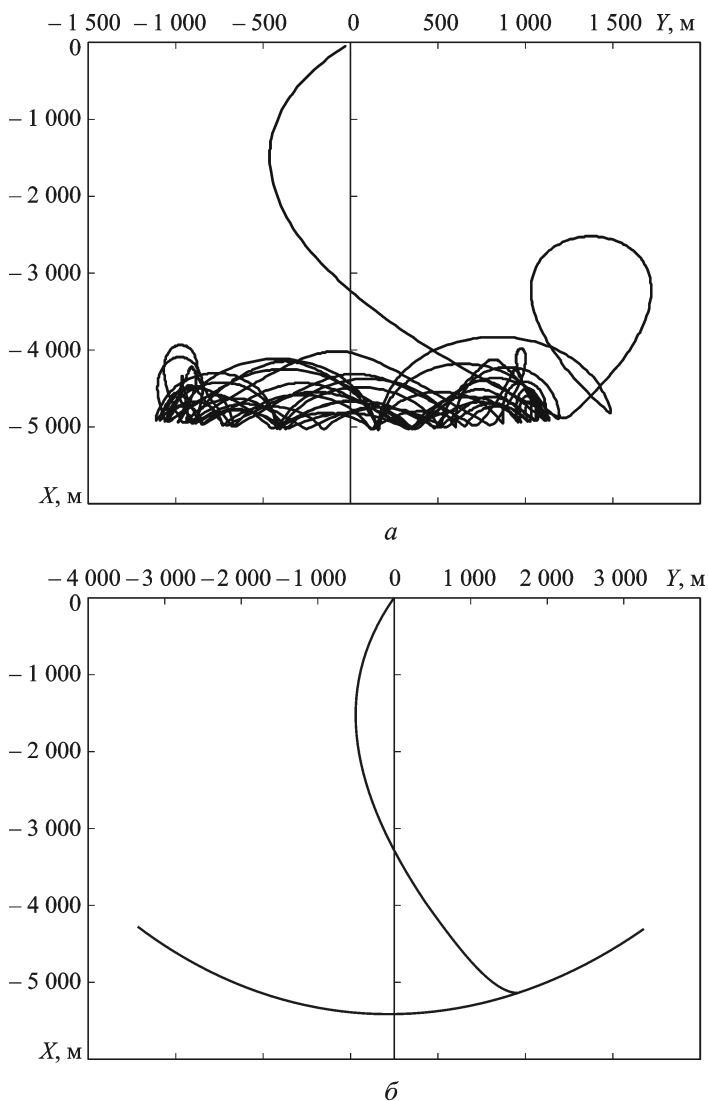


Рис. 2. Движение нижней конечной массы при развертывании связки без демпферов (а) и с демпферами (б)

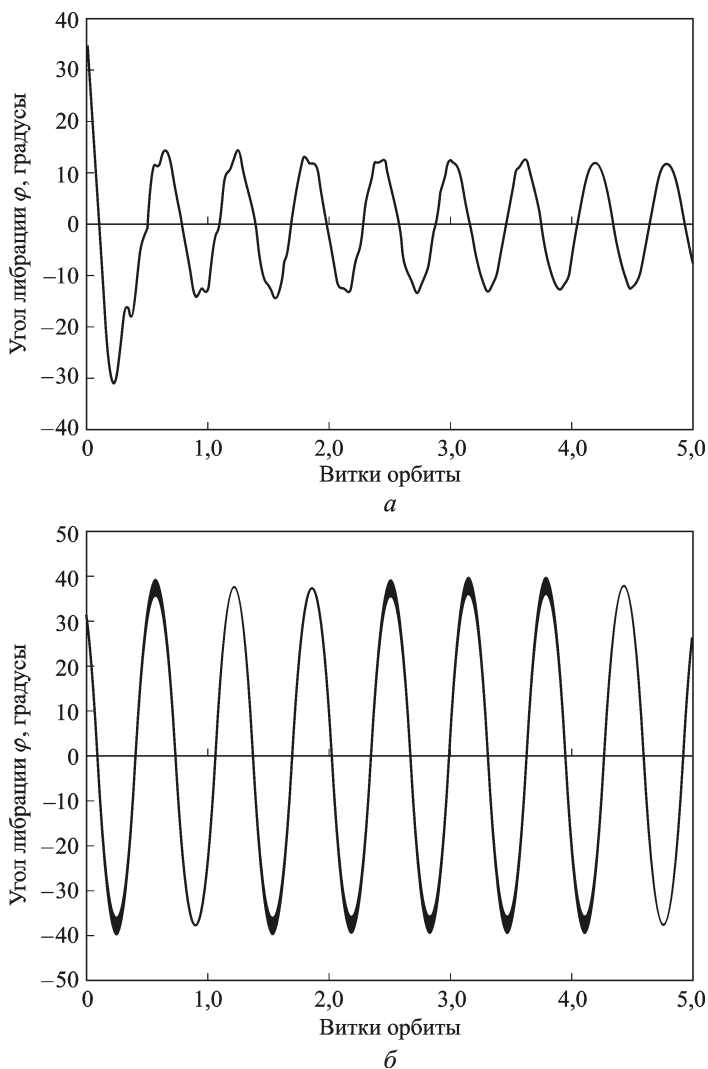


Рис. 3. Угловое движение связки без демпферов (*a*) и с демпферами (*б*)

является заметный отскок концевой массы. Амплитуда установившихся колебаний связки существенно меньше максимального значения при отскоке (рис. 3, *a*).

Для предотвращения отскока концевые массы тросовой связки могут быть снабжены демпферами, обеспечивающими гашение радиальной составляющей скорости за счет выпуска дополнительных участков троса с заданным сопротивлением по закону сухого трения. Таким образом, отскок концевых масс при выходе на связь и последующие продольные колебания связки могут быть предотвращены (рис. 3, *б*). Однако вследствие сохранения трансверсальной составляющей скорости амплитуда установившихся либраций связки оказывается большей, чем в предыдущем случае (см. рис. 3, *б*). Очевидно, что действие кориолисовых сил, вызывающих либрационное движение связки при

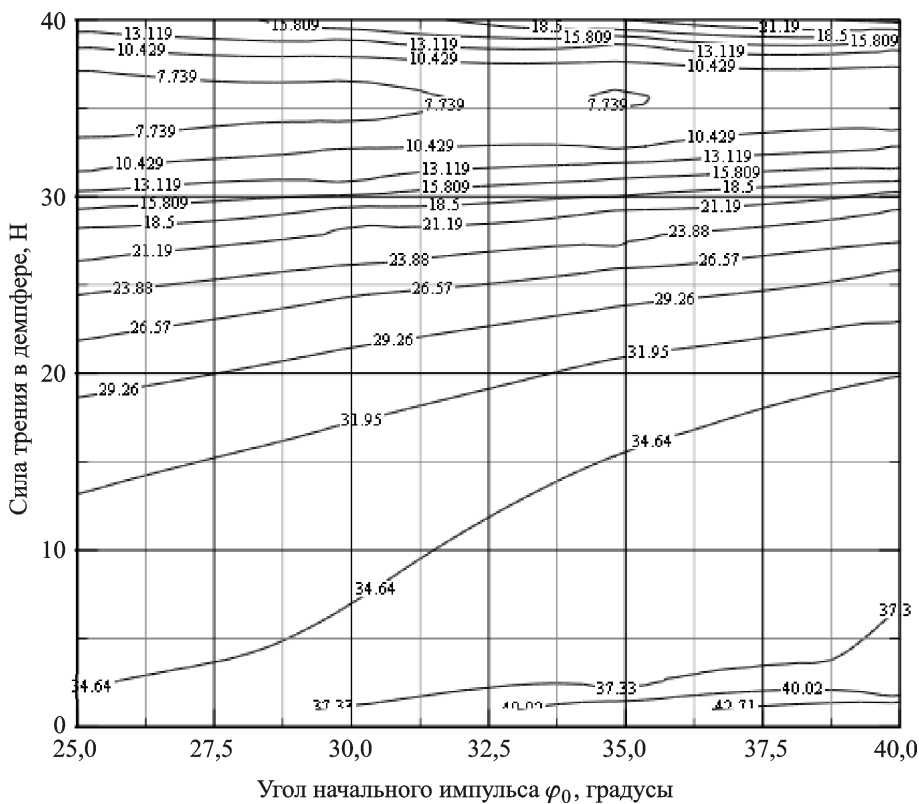


Рис. 4. Значения амплитуды установившихся колебаний после развертывания тросовой связки

развертывании, уменьшает амплитуду колебаний при обратном движении после отскока.

В результате анализа влияния начального угла развертывания КТС и силы трения в демпферах выявили сочетания параметров, обеспечивающих малые амплитуды колебаний связки после развертывания (см. рис. 4). Достижимые минимальные амплитуды не превышают 5° , что сравнимо с амплитудой колебаний, вызываемых возмущающими факторами космического полета.

На рис.5 приведены максимальные значения угла отклонения связки от вертикали при развертывании. Видна область, в которой $\varphi_{\max} = 180^\circ$, что означает переворот КТС. Переворот связки может произойти при неправильном выборе начальных условий. Прежде всего это значения угла φ_0 вне указанного диапазона, нерациональное соотношение начальной скорости и длины троса, а также близкий к нулю коэффициент вязкого сопротивления троса α .

Полученные результаты подтверждают возможность развертывания КТС в неуправляемом режиме и применения таких тросовых связок для решения ряда практических задач в космосе. Более обоснованный выбор условий развертывания и анализ целесообразности

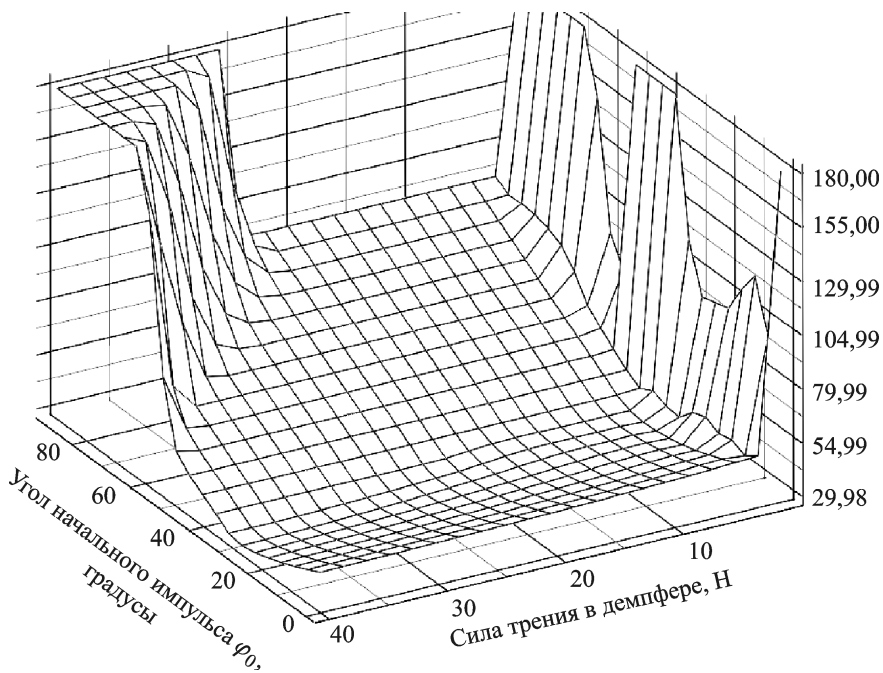


Рис. 5. Максимальный угол отклонения связки от вертикали при развертывании

использования концевых демпферов должен выполняться с учетом характера углового движения концевых тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецкий В. В. Очерки о движении космических тел. – М.: Наука, 1977.
2. Белецкий В. В., Левин Е. М. Динамика космических тросовых систем. – М.: Наука, 1990.
3. Шаргоровский С. А., Темнов А. Н. Траектории неуправляемого зонда с демпфирующим тросом // ИФЖ. – 2000. – Т. 73. – № 1. – С. 86–89.

Статья поступила в редакцию 15.05.2012