УДК 621.854:62-5

УПРАВЛЕНИЕ СВЕРТЫВАНИЕМ ДВУХМОДУЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

Л.М. Калашников, Г.В. Малышев, А.П. Свотин

Московский авиационный институт (государственный технический университет), г. Москва

Рассмотрена задача свертывания космической тросовой системы путем управления натяжением троса в предположении, что система движется по круговой орбите, состоит из двух модулей, связанных невесомым и неупругим тросом и находится в состоянии либрации либо вертикального устойчивого равновесия. Предложена программа управления натяжением, предусматривающая наличие опорной траектории и многопараметрического управления относительно нее.

ВВЕДЕНИЕ

В отечественной и мировой космонавтике существуют проблемы, остающиеся втуне и якобы не влияющие на общий уровень техники, однако не менее существенные, чем, например, повышение удельной тяги двигателей или миниатюризация электронных устройств.

К таковым относится разработка космических тросовых систем (КТС), теоретические основы которых заложены около двадцати лет назад, в чем заслуга и российских механиков[1].

Управление динамикой развертывания и свертывания, разделением связанной системы двух и более тел на орбите с переменными начальными условиями по-новому решает энергетические проблемы движения каждого тела в пространстве и относительно центра масс. Использование электромагнитодинамических свойств троса-кабеля в гравитационном и магнитном полях позволяет создавать космические электрогенераторы и движители нового типа.

Обогащая арсенал конструктора, повышая энергетический потенциал систем процентов на десять и более без расхода рабочего тела и электроэнергии, тросовые технологии безусловно перспективны. Достаточно сказать, что станция «Мир», обслуживаемая 105-ю челночными аппаратами типа «Союз» и «Прогресс» и четырьмя аппаратами типа «Шаттл» могла бы существовать бесконечно долго без расхода топлива и тенденции снижения орбиты, если бы применялась соответствующая тросовая технология спуска в атмосферу возвращаемых аппаратов. Каждый космический аппарат, сопутствуемый отработавшей последней ступенью носителя, мог бы получать дополнительный импульс в несколько процентов от энергетики этой ступени.

Начиная с классических задач механики двойной связанной системы в гравитационном поле, разработаны прикладные тросовые технологии (развертывание и свертывание без потери натяжения связи, либрационные и ротационные режимы, орбитальные переходы концевых масс при разделении системы, способы их стабилизации при изменении точек подвеса), ориентированные на инженеров-механиков и конструкторов перспективных космических систем.

Наибольший интерес, с точки зрения реализации большинства перспективных проектов КТС, представляют задачи управления их развертыванием и свертыванием. Первые из них проработаны достаточно хорошо, о чем свидетельствуют свыше двадцати реализованных проектов. Вторые исследованы недостаточно и решение большинства из них основано на применении двигателей, установленных на одном из модулей, и информации о фазовых координатах модулей. Однако для простоты реализации и, как следствие, более высокой надежности предпочтительно управлять натяжением троса, используя информацию о длине, скорости движения и минимум информации о фазовых координатах модулей.

[1] *Белецкий В.В., Левин Е.М.* Динамика космических тросовых систем. — М.: Наука, 1990.

ЗАКОН УПРАВЛЕНИЯ СВЕРТЫВАНИЕМ

Исходная система уравнений, описывающая поведение невесомой неупругой тросовой системы с двумя концевыми массами, центр масс которой расположен на круговой орбите (рис. 1), имеет вид:

$$\ddot l = l(\dot\alpha^2 + 2\omega\dot\alpha + 3\omega^2\sin^2\alpha) - N$$

$$\ddot\alpha = -2\frac{\dot l}{l}(\omega + \dot\alpha) + 3\omega^2\sin\alpha\cos\alpha,$$

где l — длина троса, α — угловое положение троса, m_1 и m_2 — массы модулей, $m^* = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ — приведенная масса системы, $N = \frac{F}{m^*}$, F — сила натяжения троса, ω — угловая скорость движения центра масс по орбите.

Линеаризованная система дифференциальных уравнений относительно произвольной программной траектории свертывания (развертывания) представляется в виде:

$$\Delta\ddot l = [\alpha^2_{пр} + 2\omega\dot\alpha_{пр} + 3\omega^2\sin^2\alpha_{пр}]\Delta l +$$

$$+ 3\omega^2\sin 2\alpha_{пр}\cdot l_{пр}\Delta\alpha + 2l_{пр}[\dot\alpha_{пр} + \omega]\Delta\dot\alpha - \Delta N$$

$$\Delta\alpha_{пр} = -2\left[\Delta\dot l - \frac{\dot l_{пр}}{l_{пр}}\Delta l\right](\omega + \dot\alpha_{пр}) - 2\frac{\dot l_{пр}}{l_{пр}}\Delta\dot\alpha +$$

$$+ 3\omega^2\cos 2\alpha_{пр}\cdot\Delta\alpha,$$

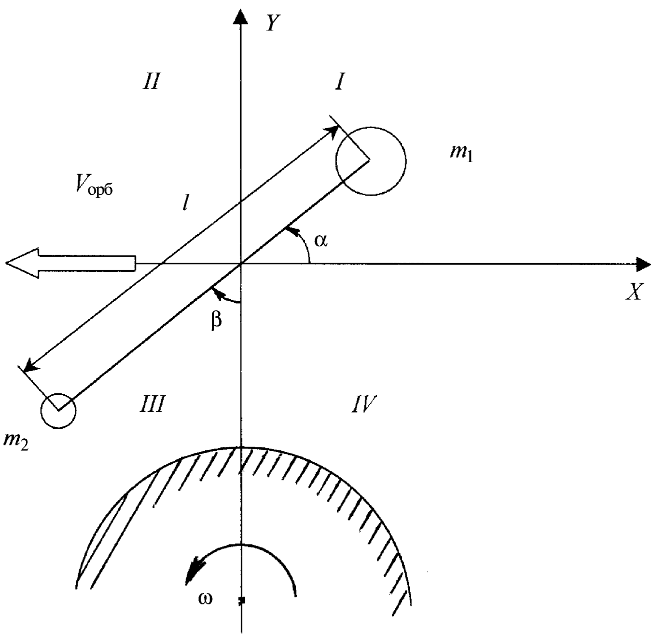

Рис. 1. Схема тросовой системы с двумя концевыми массами

где $\alpha_{пр}$ и $l_{пр}$ — координаты программной траектории, $\Delta l = l - l_{пр}$, $\Delta\alpha = \alpha - \Delta\alpha_{пр}$, $\Delta\dot l = \dot l - \dot l_{пр}$.

В ряде случаев вместо переменной $\Delta\alpha$ удобнее пользоваться параметром $\Delta x = l_{пр}\Delta\alpha$. Тогда связь производных $\Delta\dot x$ и $\Delta\dot\alpha$ записывается как

$$\Delta\dot\alpha = \frac{1}{l_{пр}}\left(\Delta\dot x - \frac{\dot l_{пр}}{l_{пр}}\Delta x\right),$$

а уравнения принимают вид:

$$\Delta\ddot l = [\dot\alpha^2_{пр} + 2\omega\dot\alpha_{пр} + 3\omega^2\sin^2\alpha_{пр}]\Delta l +$$

$$+ 3\omega^2\sin 2\alpha_{пр}\Delta x + 2(\dot\alpha_{пр} + \omega)\left(\Delta\dot x - \frac{\dot l_{пр}}{l_{пр}}\Delta x\right) - \Delta N$$

$$\Delta\ddot x = -2\left(\Delta\dot l - \frac{\dot l_{пр}}{l_{пр}}\Delta l\right)(\omega + \dot\alpha_{пр}) +$$

$$+ \left[\left(\frac{\dot l_{пр}}{l_{пр}}\right)^2 + \frac{d}{dt}\left(\frac{\dot l_{пр}}{l_{пр}}\right) + 3\omega^2\cos 2\alpha_{пр}\right]\Delta x.$$

Для выбора управления натяжением троса, обеспечивающего устойчивый переходный процесс свертывания связки, предлагается программная траектория стягивания, представляющая собой прямолинейное движение концевых масс в начало координат. Данная траектория обеспечивается выполнением следующих условий:

$$\frac{\dot l_{пр}}{l_{пр}} = \frac{3}{4}\omega\sin 2\alpha_{пр},$$

$$\dot\alpha_{пр} = 0,$$

$$N_{пр} = 3\omega^2 l_{пр}\left(\sin^2\alpha_{пр} - \frac{3}{16}\sin^2 2\alpha_{пр}\right),$$

где $N_{пр}$ — программное ускорение, вызванное силой натяжения.

В зависимости от знака отношения $\dot l_{пр}/l_{пр}$, когда осуществляется программное развертывание системы, угол $\alpha_{пр}$ лежит в *I* или *III* квадрантах (см. рис. 1). В случае программного свертывания угол $\alpha_{пр}$ находится во *II* или *IV* квадрантах.

В случае свертывания закон управления, удовлетворяющий условию устойчивого переходного процесса, должен содержать не менее трех параметров (l, $\dot l$ и α), в отличие от процесса развертывания, когда можно обойтись двумя параметрами l и $\dot l$.

Программа натяжения троса: $N = N_{пр} + \Delta N$; $\Delta N = \omega^2 a\Delta l + \omega b\Delta l + \omega^2 c\Delta x$, где a, b и c — коэффициенты усиления, $a = N_{пр}/l_{пр}$. Коэффициенты b и c выбираются из условия устойчивости переходного процесса.

Для произвольного процесса свертывания система уравнений относительно невязок Δl и Δx окончательно записывается в виде:

$$\Delta \ddot{l} = A\Delta l + B\Delta \dot{l} + C\Delta x + D\Delta \dot{x}$$
$$\Delta \ddot{x} = E\Delta l + F\Delta \dot{l} + G\Delta x,$$

где

$$A = -\frac{9}{16}\omega^2\sin^2 2\alpha_{пр}, \quad B = -b\omega,$$
$$C = -\left(c - \frac{3}{2}\sin 2\alpha_{пр}\right)\omega^2,$$
$$D = 2\omega,\ E = \frac{3}{2}\omega^2\sin 2\alpha_{пр},\ F = -2\omega,$$
$$G = \omega^2\left(3\cos 2\alpha_{пр} + \frac{9}{16}\sin^2 2\alpha_{пр}\right).$$

Характеристическое уравнение данной системы дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\lambda^4 - B\lambda^3 - \lambda^2[G + FD + A] - \lambda[FC - GB + DE] - (EC - AG) = 0.$$

Для устойчивости ее решения необходимы одинаковые знаки коэффициентов при степенях λ^n. Отсюда приходим к следующим условиям:

$$b > 0;\ 4 - \left(\frac{9}{8}\sin^2 2\alpha_{пр} + 3\cos 2\alpha_{пр}\right) > 0;$$
$$c + b\left(\frac{3}{2}\cos 2\alpha_{пр} + \frac{9}{32}\sin^2 2\alpha_{пр}\right) < 0;$$
$$c - \frac{3}{8}\sin 2\alpha_{пр}\left[4 - \left(3\cos 2\alpha_{пр} + \frac{9}{16}\sin^2 2\alpha_{пр}\right)\right] < 0.$$

Второе из этих условий выполняется для произвольных $\alpha_{пр}$. Наиболее подходящим в смысле быстродействия является значение $\alpha_{пр} = -\pi/4 + k\pi$, где $k = 0$ при свертывании в *IV* квадранте, $k = 1$ при свертывании во *II* квадранте.

При этом $\dot{l} = -\frac{3}{4}\omega l$; $N_{пр} = \frac{15}{16}\omega^2$.

В данном случае сила управления натяжением, отнесенная к единице приведенной массы, имеет вид:

$$N = \frac{15}{16}\omega^2 + b\left(\dot{l} + \frac{3}{4}\omega l\right) + c\left(\frac{\pi}{4} + \alpha - k\pi\right).$$

Коэффициенты b и c выбираются из условий $b > 0$, $c < -0{,}281b$, $c < -1{,}289$.

Расчеты показывают, что для обеспечения устойчивости $b \approx 4$, $c = -2...-3$.

Однако полученный закон управления при начальных фазовых состояниях, лежащих вдали от программной траектории, не всегда обеспечивает устойчивый переход в начало координат (стягиваемые массы закручиваются вокруг начала координат).

По мере приближения к значению $|\alpha_{пр}| = \pi/2$ степень устойчивости возрастает, но резко увеличивается время сближения. Компромиссным вариантом является переход со значением $\alpha_{пр} = -\pi/3 + k\pi$. При этом $\dot{l} = -0{,}65l\omega$, $N_{пр} = 1{,}83\omega^2 l$, $b > 0$, $c < 0{,}54b$, $c < -1{,}65$.

Окончательное управление подчинено закону:

$$N = 1{,}83\omega^2 l + 4\omega(\dot{l} + 0{,}65\omega l) - 2{,}8\omega^2(\pi/3 + \alpha - k\pi)l.$$

Близким к предельному можно считать случай, когда $\alpha_{пр} = -5\pi/12 + k\pi$. При этом

$$\dot{l} = -0{,}37\omega l,\ N_{пр} = 2{,}66\omega^2 l,\ b > 0,\ c < -1{,}005,$$
$$N = 2{,}66\omega^2 l + 4\omega(\dot{l} + 0{,}37\omega l) - 2{,}8\omega^2(5\pi/12 + \alpha - k\pi)\omega^2 l.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Конструктивные параметры системы свертывания базируются на параметрическом анализе реальной связки двух концевых масс модулей, первоначально либрирующей относительно вертикали с заданными углами β ($0 \leqslant \beta \leqslant 65°$), центр масс которой движется по круговой орбите с угловой скоростью ω (см. рис. 1).

Интегрируются уравнения движения концевых модулей в системе координат, начало которой совпадает с центром масс. Варьируется угол либрации, опорный угол программы $45° \leqslant |\alpha_{пр}| \leqslant 75°$ и коэффициенты усиления в программе натяжения троса: $b = -4...-2$; $c = 2...4$. Этот диапазон получен при дальнейшем исследовании устойчивости системы по достаточному условию на базе критерия Рауса-Гурвица.

Анализируются динамические характеристики модельной задачи: субспутник массой $m_2 = 150$ кг отделяется от транспортного корабля «Прогресс» массой $m_1 = 7\,250$ кг на рабочей орбите (высотой ~350 км). Тросовая связка вертикализируется (например, по закону Раппа). Затем трос сматывается лебедкой транспортного корабля (рис. 2) при опорном угле программы $\alpha_{пр} = -60°$. Представлена траектория концевой массы — две полуволны в *IV* квадранте. Аналогичное по характеру движение осуществляет и тяжелый модуль во *II* квадранте с масштабом координат, равным соотношению масс $M = 1{:}(7250/150)$. Процесс продолжается около 8 000 с с практически монотонным убыванием усилия в тросе от 5,5 до 0 Н при монотонном убывании длины троса между сближающимися модулями. Последнее упрощает конструкцию лебедки, осуществляющей намотку без реверсивных режимов.

Рассмотрена динамика свертывания системы при начальном либрационном движении с амплитудой ±45° и ±65°:

- из крайнего левого положения (рис. 3) при амплитуде либрации ±65°;

- из положения $\alpha = -135°$ против хода орбитального движения (рис. 4) при меньшей амплитуде либрации ($\pm 45°$);
- при стягивании из крайнего правого положения (рис. 5).

С увеличением программного угла $\alpha_{пр}$ увеличивается время процесса стягивания, однако понижается тенденция ввода системы в ротацию на заключительном этапе.

Уменьшение угла либрации делает процесс более мягким (по амплитуде колебаний усилия в тросе и его длины).

Предпочтительно начинать стягивание, когда нижняя масса движется в *III* квадранте.

В большинстве случаев при начальном удалении масс около 5 000 м длина троса в процессе движения не превышает этого значения.

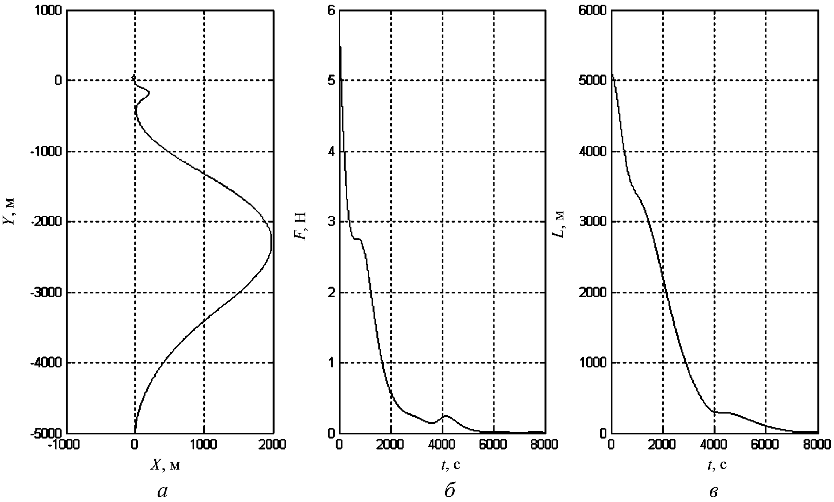

Рис. 2. Свертывание из положения вертикального равновесия:
а — траектория движения концевых масс; *б* — натяжение троса; *в* — длина троса

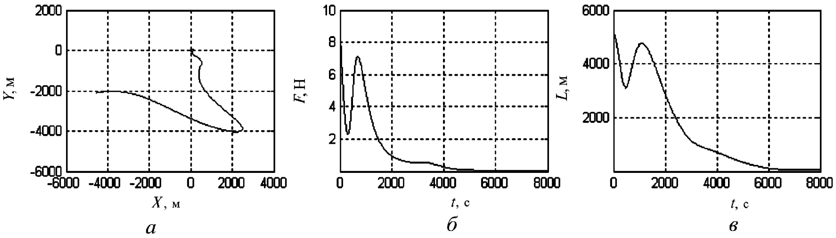

Рис. 3. Свертывание из крайнего левого положения при максимально возможном угле либрации:
а — траектория движения концевых масс; *б* — натяжение троса; *в* — длина троса

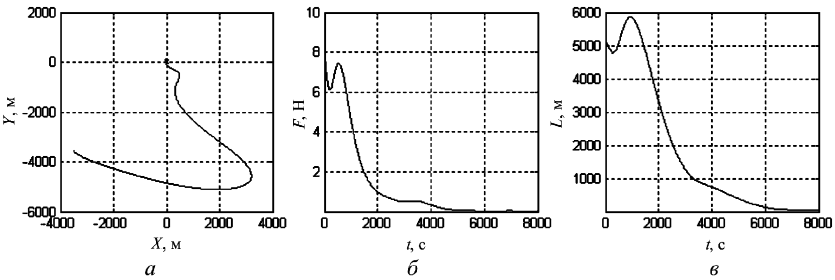

Рис. 4. Стягивание начинается в момент прохождения угла −135° против хода орбитального движения с максимальным углом либрации:
а — траектория движения концевых масс; *б* — натяжение троса; *в* — длина троса

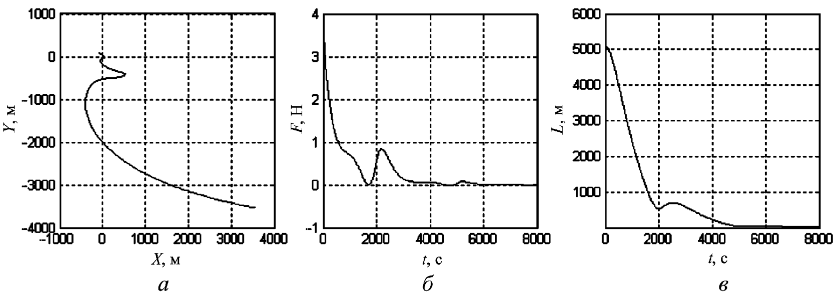

Рис. 5. Стягивание из крайнего правого положения при угле либрации 45°:
а — траектория движения концевых масс; *б* — натяжение троса; *в* — длина троса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен трехпараметрический закон управления свертыванием двухмодульной космической тросовой системой только за счет управления натяжением троса. Задача решалась в предположении, что центр масс системы движется по круговой орбите, трос невесомый и неупругий, система находится в состоянии либрации либо вертикального равновесия.

В качестве измеряемых параметров были приняты текущая длина, скорость смотки троса, а также угол между визирной линией, связывающей концевые массы, и вектором, обратным вектору скорости орбитального движения центра масс связки.

Результаты моделирования показали хорошую работу полученного закона управления натяжением в широком диапазоне углов либрации. В случае стягивания из состояния вертикального равновесия полностью отсутствует участок вытравливания троса, что позволяет значительно упростить весь механизм свертывания.

Стягивание за счет только управления натяжением троса позволяет значительно упростить и повысить надежность систем развертывания (свертывания) двухмодульных тросовых систем, расширяя тем самым области их возможного применения.

☎ *(095) 158-42-61*
E-mail: malyshevg@mail.ru ❑