

Коровин Виктор Валерьевич

**ДИНАМИКА ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ
КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2001

Диссертация выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Усюкин В.И.

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор Светлицкий В.А.

к.т.н., доцент Викуленков В.П.

С.П. Королева



1572663

Коровин В.В.

Динамика орбитальной
тросовой системы при
2001 0.00

03.2007

в 14.30 часов на заседании

Московском государственном

по адресу:

5.

отеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Дронг В.И.

04.2001.

1572663

Объектом исследования является орбитальная тросовая система (ОТС) в составе двух концевых тел и упругого весомого соединительного троса, находящаяся в развернутом, вертикальном положении на круговой околоземной орбите.

Предметом исследования является упругое движение ОТС относительно центра масс (внутренняя динамика) при воздействии возмущающих факторов космического полета.

Актуальность темы. Орбитальные тросовые системы являются перспективным классом крупногабаритных космических конструкций. Применение ОТС в ближайшей перспективе позволит эффективно решать широкий спектр задач в космосе. К числу таких задач можно отнести выполнение орбитальных маневров, в том числе спуск грузов с орбиты на Землю (и другие планеты); применение электромагнитных тросовых систем в генераторном режиме для получения электроэнергии на борту КА и/или в двигательном режиме для поддержания орбиты и выполнения маневров практически без расхода рабочего тела; получение с помощью тросов заданного, в том числе переменного, уровня микрогравитации на борту КА; зондирование при помощи привязных спутников верхних слоев атмосферы и наблюдение за поверхностью Земли с высот, недоступных обычным КА (110–200 км); создание систем связи в диапазонах длинных и сверхдлинных волн путем развертывания на орбите антенн с характерными размерами от сотен метров до десятков километров; оснащение орбитальных станций (ОС) стыковочными узлами на тросе, соединение отдельных блоков ОС тросами и многое другое.

В настоящее время работы по освоению технологии ОТС достигли стадии создания опытных образцов и проведения летных экспериментов. Разработки в этом направлении ведутся примерно в 10 странах мира, включая США, Канаду, Италию, Германию, Францию, Японию и Россию. Проведено около 15 космических экспериментов с тросами.

ОТС, как протяженные и нежесткие объекты, характеризуются низкими собственными частотами колебаний. Вследствие этого, незначительные по амплитуде возмущающие факторы космического полета могут существенно воздействовать на движение ОТС относительно центра масс. Тросы и кабели, применяемые в составе ОТС, являются термически тонкими телами. Их температура быстро изменяется при переходе от теневого участка орбиты к освещенному и наоборот (пересечение линии терминатора). В сочетании с низкими собственными частотами это требует рассмотрения температурного деформирования тросов в динамической постановке, т.е. с учетом сил инерции, действующих на трос и концевые тела. Необходимость учета термоупругого возмущения, связанного с температурными деформациями троса, является особенностью тросовых систем. Предварительные оценки показыва-

ют, что температурные деформации могут иметь порядок 0,1%, или 1 метр на километр длины троса. Порождаемые при этом продольные колебания тросовой системы через силы Кориолиса связаны с поперечными в плоскости орбиты. Результатом является сложное продольно-маятниковое движение.

Для разработчиков ОТС важно обеспечение прочности троса на разрыв и неотрицательности его натяжения в орбитальном полете, определение сил и моментов, действующих со стороны троса на концевые тела по амплитуде и частотным свойствам, определение амплитуд перемещений и углов поворота концевых тел, возникающих при этом уровней микрогравитации. Информация о скорости концевых тел в относительном движении необходима для баллистического расчета движения элементов ОТС после ее разделения. Математическая модель внутренней динамики ОТС при воздействии возмущающих факторов космического полета является составной частью более сложных моделей тросовых систем при учете электродинамических сил, анализе развертывания и свертывания ОТС и т.д.

Несмотря на обширную литературу по механике тросов в космосе, внутренняя динамика ОТС в орбитальном полете остается малоизученным вопросом, чем и определяется актуальность настоящей работы.

Целью работы являлось создание моделей внутренней динамики орбитальной тросовой системы и воздействующих на нее возмущений, анализ возможности силового и параметрического возбуждения колебаний, компьютерное моделирование и выработка рекомендаций для проектантов ОТС.

Методы исследования. Разработанная математическая модель является физически и геометрически линейной, с переменными коэффициентами. Динамическая реакция объекта на внешнее воздействие определяется разложением в ряд по формам собственных колебаний. Упругие и диссипативные характеристики троса определялись экспериментально.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов и выводов обеспечивается использованием физически корректных математических моделей, опробированных численных методов и алгоритмов. В необходимых случаях проведено сравнение численных результатов с аналитическими решениями тестовых задач.

На защиту выносятся математическая модель с компьютерной реализацией для описания внутренней динамики орбитальной тросовой системы и результаты исследования динамических процессов, в том числе:

- математические модели для анализа собственных динамических характеристик ОТС;
- результаты экспериментального исследования механических характеристик троса;

– математические модели для определения температурного состояния троса, термоупругого и гравитационного возмущающих воздействий, исследование частотных свойств внешних возмущений;

– результаты численного моделирования внутренней динамики ОТС при различных соотношениях между частотными свойствами исследуемого объекта и возмущающих воздействий, позволяющие указать условия резонансного возбуждения продольных и поперечных форм колебаний ОТС.

Научная новизна определяется новыми результатами, полученными при выполнении работы:

– предложен вариант метода динамической жесткости для анализа собственных поперечных колебаний ОТС с концевыми телами;

– разработаны математические модели для описания термоупругого и гравитационного возмущающих воздействий на ОТС и исследованы частотные свойства возмущающих воздействий;

– установлена возможность резонансного возбуждения как продольных, так и поперечных форм колебаний ОТС при температурном воздействии на трос. Сформулированы требования к составу динамической модели ОТС.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и отдельные законченные этапы докладывались и обсуждались на 5 университетских и 7 Всероссийских и международных научно – технических конференциях, научных семинарах кафедры «Космические аппараты и ракетно-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Выпущен ряд научно-технических отчетов.

Практическая ценность. Работа выполнена в ходе совместных разработок с РКК «Энергия» в рамках подготовки космических экспериментов «Трос-1», «Трос-2», российско-американского эксперимента с электродинамической тросовой системой («ЭДТС») на орбитальной станции «Мир».

Результаты работы должны найти применение при создании новых объектов космической техники с использованием технологии тросовых систем.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 7 тезисов докладов на Всероссийских и международных научно – технических конференциях, 1 статья находится в печати.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение и приложение, изложенные на 162 с. машинописного текста. В работу включены 79 рис., 6 табл., список литературы из 59 наименований.

Содержание работы

Во введении сформулированы объект и предмет исследования, сделан краткий обзор публикаций по теме диссертации, обоснована актуальность темы, приведена структура работы.

Первая глава посвящена постановке задачи динамики относительного движения ОТС в плоскости орбиты. Сформулированы основные допущения. Движение относительно центра масс считается не связанным с движением центра масс. Предполагается, что центр масс ОТС движется по круговой орбите. Продольные и маятниковые движения ОТС в плоскости орбиты связаны между собой силами Кориолиса. Маятниковые колебания из плоскости орбиты не связаны с движением в плоскости орбиты и в настоящей работе не рассматриваются. Движение ОТС относительно центра масс рассматривается в орбитальной системе координат (ОСК). В качестве инерциальной принята геоцентрическая экваториальная система координат (ГЭСК).

Записаны уравнения статического равновесия ОТС в ОСК, получены соотношения для определения орбитальной скорости ОТС и силы натяжения троса при заданном радиусе орбиты центра масс.

С использованием уравнений Лагранжа выполнен анализ уравнений движения в орбитальной системе координат на примере материальной точки. Проанализированы переносные силы инерции. Объяснено возникновение натяжения троса, как результат действия гравитационно-центробежных сил.

По результатам проведенного анализа предложена математическая модель внутренней динамики ОТС. Исследование ведется в рамках физически и геометрически линейной модели. Вынужденное движение представляется в виде суперпозиции продольного (вдоль линии троса, совпадающей с местной вертикалью) и поперечного (вдоль трансверсали орбитальной системы координат) движений. Динамическая реакция вдоль каждой из осей, в свою очередь, разложена в ряд по формам собственных колебаний ОТС:

$$\begin{cases} \ddot{q}_j + 2n_j \dot{q}_j + p_j^2 q_j = f_j(t) \\ \ddot{s}_k + p_k^2 s_k = f_k(t) \end{cases}, \quad (1)$$

где q_j и s_k – обобщенные координаты смещения системы по формам продольных и поперечных колебаний соответственно, $f_{j,k}$ – обобщенные силы.

Особенностью предложенной математической модели является присутствие сил Кориолиса в правых частях уравнений для обобщенных координат, которые и связывают уравнения в систему. Получены соотношения, необходимые для приведения кориолисовых сил к обобщенным силам для гармоник. Уравнения относительно q_j включают вязкое сопротивление, чем учитываются диссипативные свойства троса. В уравнениях относительно s_k демпфирования нет, т.к. для описания поперечного движения ОТС используется модель гибкой нерастяжимой нити. Аналитические решения для координат q_j и s_k имеют вид:

$$q_j(t) = e^{-nt} \left[q_{j0} \cos p_{jd} t + \frac{\dot{q}_{j0} + n q_{j0}}{p_{jd}} \sin p_{jd} t + \frac{1}{p_{jd}} \int_0^t e^{n\tau} f_j \sin p_{jd} (t - \tau) d\tau \right];$$

$$s_k(t) = s_{k0} \cos p_k t + \frac{\dot{s}_{k0}}{p_k} \sin p_k t + \frac{1}{p_k} \int_0^t f_k \sin p_k (t - \tau) d\tau.$$

Предложен численный алгоритм. Указано на возможность параметрических взаимодействий между продольными и поперечными формами движения. Такой вид взаимодействия учитывается переменными коэффициентами в уравнениях для обобщенных координат (1).

Вторая глава посвящена анализу собственных продольных и поперечных колебаний ОТС.

Собственные продольные колебания ОТС исследовались с помощью модели прямолинейного стержня с присоединенными по концам массами. Корректность представления троса стержневой моделью обоснована тем, что в ОТС рассматриваемого типа трос должен быть постоянно натянут силой гравитационно-центробежного градиента, его "провисание" является нештатной ситуацией и в данной работе не рассматривается. Поперечные прогибы троса остаются ничтожно малыми при всех исследуемых здесь динамических явлениях. Предложенная модель анализируется матричным методом начальных параметров (МНП). Результатом расчета являются собственные частоты p_j , формы собственных колебаний X_j , приведенные массы $M_{прj}$ и приведенные коэффициенты жесткости $K_{прj}$ при колебаниях по j -му тону. Последние две величины зависят от способа нормировки собственных функций X_j .

Анализ собственных поперечных колебаний тросовой системы проводился с использованием двух математических моделей: гибкая нить с концевыми массами и гибкая нить с концевыми телами. Предварительно, из условий статического равновесия ОТС, определяется сила натяжения. Уравнение поперечных колебаний нити по своему виду совпадает с уравнением продольных колебаний стержня. В случае концевых масс метод решения и алгоритм расчета те же, что и при анализе продольных колебаний.

Для анализа углового движения концевых тел и крутящего момента, действующего на концевое тело со стороны троса, предложена модель "гибкая нить-концевые тела". Концевое тело имеет две степени свободы: поперечное смещение и поворот в плоскости орбиты. Применение МНП в этом случае невозможно, т.к. вектор состояния троса имеет размерность 2 (смещение, поперечная сила), а вектор состояния концевого тела включает 4 независимых переменных (смещение, угол поворота, момент, поперечная сила). Здесь применен вариант метода динамической жесткости. Матрицы динамической жесткости концевых тел получены из уравнений движения. Матрица нити формируется преобразованием переходной матрицы нити МНП. Из условия динамического равновесия конструкции формируется час-

тотный определитель. Значение частотного определителя вычисляется приведением матрицы к верхнему треугольному виду методом Гаусса. Для устойчивой работы алгоритма необходимо использовать процедуру с полным выбором ведущего элемента. Поиск собственной частоты, как и в МНП, ведется методом половинного деления интервала.

Для численного моделирования приняты характеристики ОТС в космических экспериментах «Трос-1», «Трос-2». Разрабатываемая тросовая система состоит из верхнего концевой тела массой более 100 тонн, нижнего концевой тела массой 6 тонн и соединительного троса длиной 20 километров. Центр масс ОТС движется по круговой орбите высотой 400 км. Статическая сила натяжения троса, в этом случае, около 440 Н.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования механических характеристик троса, предполагаемого к использованию в составе ОТС «Трос-2». Трос изготовлен из высокомодульного органоволокна и имеет сложную структуру из оплетки и неплетеных внутренних волокон.

Задача исчерпывающего математического описания и детального анализа физической природы диссипативных свойств не ставилась. Необходимо было определить эквивалентные характеристики троса в рамках линейной вязкоупругой модели (Фогта). Продольное усилие при деформации троса, в этом случае, определяется выражением:

$$N = EF(\epsilon + \alpha \dot{\epsilon}), \quad (2)$$

где EF – жесткость троса, ϵ – деформация, α – коэффициент вязкого сопротивления.

Проведены два эксперимента. В первом осуществлялась запись свободных продольных колебаний отрезка троса длиной 1,0+3,5 метра с массой на конце. Возбуждение колебаний производилось путем отделения дополнительной массы. Анализируя записанный процесс затухания колебаний, можно определить характеристики троса EF и α . Для эксперимента использовался комплект виброизмерительной аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер» (Дания). Датчик–акселерометр устанавливался на концевую массу и регистрировал переходный процесс $\ddot{x}(t)$, который отличается от переходного процесса $x(t)$ постоянным множителем и фазой. Результаты эксперимента позволяют с требуемой достоверностью назначить эквивалентные характеристики неупругого сопротивления в рамках вязкоупругой модели в диапазоне частот 5–10 Гц. Исследованный диапазон лежит существенно выше частот продольных колебаний ($f_{1\text{ прод}} = 0,0042\text{ Гц}$, $f_{2\text{ прод}} = 0,12\text{ Гц}$ для рассматриваемой ОТС). Подробное исследование зависимости коэффициента вязкого сопротивления от амплитуды деформаций при данной схеме испытаний также затруднено.

Более информативным оказался эксперимент, в котором записывалась петля гистерезиса $N(\epsilon)$ при циклическом нагружении образцов в испытательной машине (рис. 1.). Возможности испытательной машины позволяют варьировать деформацией образца ϵ , скоростью деформации $\dot{\epsilon}$ и натяжением N в широких пределах, включая диапазон параметров, соответствующий реальным условиям эксплуатации ОТС. Результаты испытаний показали наличие у троса предварительной вытяжки, занимающей один цикл нагружения, при которой его деформация нелинейна, после чего диаграмма растяжения становится линейной во всем диапазоне нагрузок. Тросы для ОТС должны проходить предварительную вытяжку на Земле. Следовательно, использование физически линейной модели троса правомерно.

Для того, чтобы охарактеризовать диссипативные свойства троса вязким трением, эквивалентным выявленному в экспериментах с энергетической точки зрения, определялся коэффициент поглощения энергии или относительный гистерезис Ψ , равный отношению рассеиваемой за цикл деформирования образца энергии W к потенциальной энергии цикла U : $\Psi = \frac{W}{U}$. По

результатам определения Ψ в обоих проведенных экспериментах построена зависимость коэффициента поглощения от частоты колебаний $\Psi(f)$ (рис. 2.). При известной скорости деформации $\dot{\epsilon}$ зависимость $\Psi(f)$ можно перестроить в $\alpha(f)$ (рис. 3.).

Приведенный коэффициент вязкого сопротивления j -й обобщенной координаты продольного движения q_j на основании (2) связан с приведенным коэффициентом жесткости данного тона колебаний соотношением $C_{прj} = \alpha_j K_{прj}$, где α_j – значение α на частоте j -го тона. Уравнение движения для координаты q_j принимает вид: $\ddot{q}_j + \alpha_j p_j^2 \dot{q}_j + p_j^2 q_j = f_j(t)$.

В четвертой главе рассмотрены возмущающие воздействия. Они носят, как правило, периодический характер. С точки зрения внутренней динамики важно определить величину (амплитуду) возмущения и его частотный спектр. Для ОТС могут представлять опасность составляющие воздействий с частотой выше орбитальной частоты обращения. С учетом этого, для численного моделирования и анализа выбраны возмущения, связанные с гармониками потенциала тяготения Земли и с температурным воздействием на трос.

Разработана математическая модель и численный алгоритм расчета температурного состояния троса при орбитальном движении ОТС. Температура считается одинаковой во всех точках по длине и поперечному сечению, т.е. принята ноль-мерная постановка. Нестационарное температурное состояние определяется балансом тепловых потоков при теплообмене излучением:

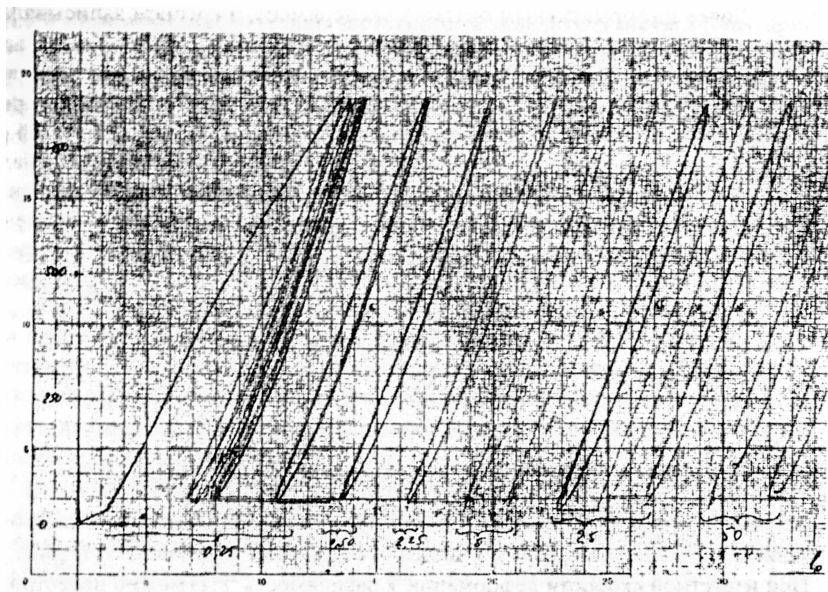


Рис. 1. Петли гистерезиса троса $N(\epsilon)$

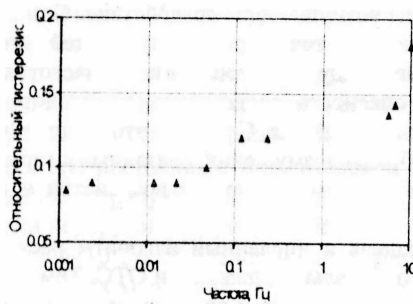


Рис. 2. Относительный гистерезис троса ψ

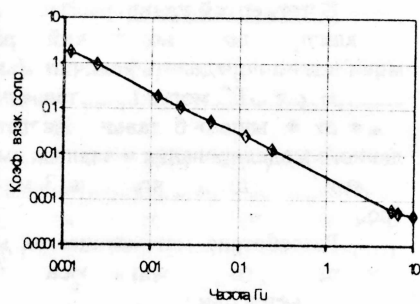


Рис. 3. Эквивалентный коэффициент вязкого сопротивления α

$$cm \frac{dT}{dt} = A_s(Q_1 + Q_2) + \epsilon Q_3 - Q_{изл},$$

где c – удельная теплоемкость троса; m – погонная масса; Q_i – падающие на трос тепловые потоки, приведенные к единице длины, A_s – коэффициент поглощения светового излучения, ϵ – степень черноты поверхности троса.

Тепловые потоки определяются при заданных текущих координатах центра масс ОТС и известном угле между линией троса и направлением на Солнце. Трос рассматривается как круговой цилиндр. Результаты численного моделирования для одной из орбит высотой 400 км показаны на рис. 4. Кривая $T(t)$ имеет два максимума, соответствующих положениям тросовой системы по нормали к направлению на Солнце на освещенном участке орбиты. Теневой участок орбиты занимает около 40% витка, где температура троса резко понижается. Второй локальный минимум температуры троса имеет место на освещенном участке, при положении ОТС вдоль линии визирования на Солнце (Солнце находится в плоскости орбиты).

При пересечениях ОТС линии терминатора скорость изменения температуры троса достигает 0,65K в секунду, т.к. продолжительность полутени здесь менее 15с. Температурное деформирование троса рассмотрено в динамической постановке. Полное смещение поперечного сечения u представлено суммой теплового и упругого: $u = u_T + u_{упр}$. Тогда :

$$\ddot{u}_{упр} - a^2 u_{упр} = -\ddot{u}_T,$$

где $\ddot{u}_T(x, t) = \ddot{\alpha} \ddot{T}(t)x$, $a^2 = EF/m$, x – координата, отсчитываемая от центра масс ОТС. Обобщенная сила в уравнении движения относительно j -обобщенной координаты при температурном воздействии на ОТС выглядит следующим образом:

$$Q_j^{ТЕРМ}(t) = -\frac{\alpha}{M_{прj}} \left[m \int_L \ddot{T} x X_j(x) dx + M_1 \ddot{T} x_1 X_j(x_1) + M_2 \ddot{T} x_2 X_j(x_2) \right].$$

Здесь L – длина тросовой системы, $M_{1,2}$ – концевые массы.

Таким образом, характер термоупругого возмущения ОТС определяется второй производной от температуры троса $\ddot{T}(t)$. На графике функции $\ddot{T}(t)$ для одного витка орбиты (рис. 5.) присутствуют два импульса с разными знаками, соответствующие пересечениям линии терминатора. В течение остального времени $\ddot{T}(t) \approx 0$ в масштабе графика. Проведенный анализ показал, что для периодов времени порядка одних суток термоупругое возмущение можно считать периодическим. При этом игнорируются прецессия плоскости орбиты и изменение угловых координат Солнца в инерциальном пространстве. Частотные свойства возмущения выявляются при разложении функции $\ddot{T}(t)$ в ряд Фурье:

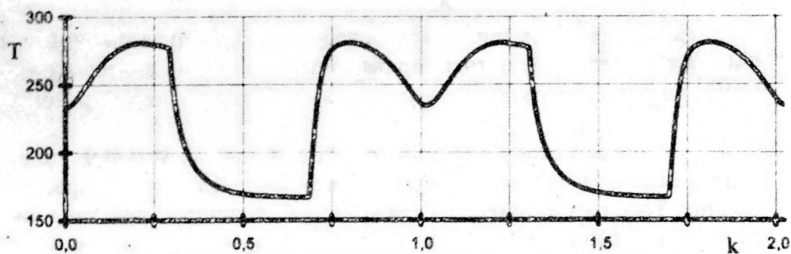


Рис. 4. Изменение температуры троса за 2 витка орбиты
 T, K – температура троса; k – число витков орбиты

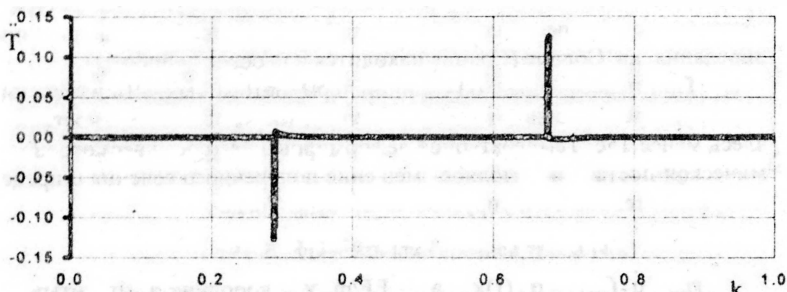


Рис. 5. Вторая производная температуры троса по времени
 $\ddot{T}, K/c^2$; k – число витков орбиты

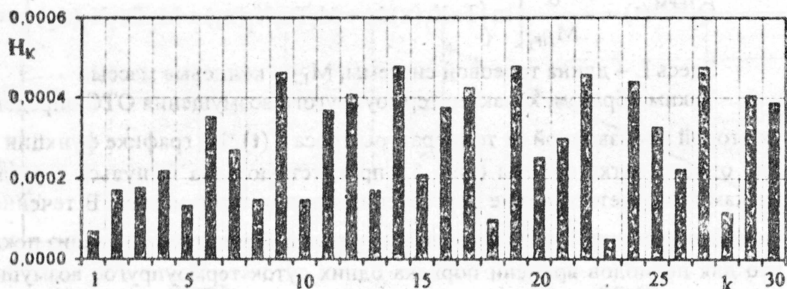


Рис. 6. Первые тридцать гармоник амплитудного спектра H_k
 $H_k, K/c^2$ – амплитуды гармоник; k – номер гармоники

$$\ddot{T}(t) = H_0 + \sum_k H_k \cos(k\omega t + \varphi_k),$$

где H_k – амплитудный спектр; φ_k – фазовый спектр.

Частотный спектр $\ddot{T}(t)$ содержит бесконечное число гармоник, каждая из которых кратна частоте орбитального обращения Ω . Амплитуды первых 30 гармоник показаны на рис. 6.

Воздействие гармоник потенциала тяготения Земли моделировалось приложением распределенных по ОТС возмущающих сил гравитационной природы. В численной модели учитывались гармоники до 6-го порядка включительно как нормальной части геопотенциала (зональные гармоники), так и аномальной (секториальные и тессеральные гармоники). В литературе по космической баллистике имеются необходимые аналитические соотношения для определения проекций возмущающего ускорения в заданной точке на оси орбитальной системы координат. Для расчетов необходимо определять на каждом шаге по времени взаимное положение ГЭСК, ОСК и гринвичской систем координат. В Приложении приведены формулы вычисления полиномов Лежандра до 6-го порядка включительно $P_n(\sin\varphi)$, их первых производных $P'_n(\sin\varphi)$, присоединенных полиномов $P_{nm}(\sin\varphi)$ до 6-го порядка и их первых производных $P'_{nm}(\sin\varphi)$. Эти функции необходимы при определении проекций возмущающего ускорения на оси ОСК.

Проведенный анализ показал, что секториальные и тессеральные гармоники порождают непериодическое возмущение. Периодический характер имеют возмущения от зональных гармоник геопотенциала, причем их частотный спектр ограничен. В спектре возмущения от i -ой зональной гармоники нет компонент с круговой частотой выше $i\Omega$, где Ω – круговая частота орбитального обращения.

Пятая глава диссертации посвящена численному моделированию внутренней динамики ОТС, анализу полученных результатов, выводам.

Резонансное возбуждение колебаний ОТС возможно при совпадении какой-либо собственной частоты с одной из гармоник внешнего воздействия. Термоупругое возмущение имеет бесконечный частотный спектр. Потенциал тяготения Земли характеризуется ограниченным числом гармоник (в настоящее время известны около 20). Их частотные составляющие, как правило, ниже собственных частот ОТС рассматриваемого типа.

Среди тонов собственных колебаний ОТС только основной тон поперечных (маятниковых) колебаний не кратен орбитальному периоду обращения при любых параметрах тросовой системы и, следовательно, не может резонансно возбуждаться.

Численное моделирование при отсутствии резонансных соотношений между собственными частотами ОТС и гармоническими составляющими

внешних воздействий позволил сделать вывод о неопасности возмущающих факторов космического полета для ОТС. Коэффициент динамичности силы натяжения троса около 10%. Воздействие гармоник геопотенциала порождает, в основном, маятниковое движение ОТС, а температурное воздействие – продольное.

При совпадении частоты основного тона продольных колебаний с гармоникой температурного воздействия возникает резонанс. На рис. 7. и 8. приведены результаты моделирования резонанса от 24-й гармоники термоупругого возмущения для случаев $\Psi=0.0$ и $\Psi=0.09$ соответственно. В консервативной модели ОТС полное ослабление троса при колебаниях достигается через 8 витков орбиты. Этот результат подтверждается аналитическим расчетом по упрощенной модели. Варьированием жесткости соединительного троса построена частотная характеристика коэффициента динамичности силы натяжения троса (рис. 9.). Значение $\Psi=0.09$ следует считать экстремально высоким для тросов и кабелей, предполагаемых к использованию в составе ОТС.

Исследование поперечных (маятниковых) колебаний ОТС показало во всех случаях один и тот же характер движения: концевые тела поворачиваются в противофазе с тросом, амплитуды углов поворота примерно равны между собой и не превышают 1° (рис. 10). Температурное воздействие на трос, в силу кориолисовой связи между продольными и поперечными формами движения, может вызвать резонансное возбуждение поперечных форм колебаний. На рис. 11. показан график крутящего момента на верхнем концевом теле при резонансном возбуждении второго тона собственных поперечных колебаний ОТС от 14-й гармоники термоупругого возмущения.

Полученные в пятой главе результаты дают подробное представление о внутренней динамике ОТС в орбитальном полете. Сделан вывод о необходимом составе динамической модели ОТС. Она должна включать один продольный тон собственных колебаний и четыре поперечных. Четыре тона из указанных пяти могут возбуждаться при температурном воздействии на трос и не должны быть кратны орбитальному периоду обращения.

Заключение

Диссертационная работа посвящена изучению внутренней динамики перспективного средства космической техники – орбитальной тросовой системы. Рассматривается ОТС в составе двух концевых тел и соединительного троса, совершающая полет по круговой околоземной орбите в развернутом состоянии. Исследуется влияние возмущающих воздействий на движение ОТС относительно центра масс в плоскости орбиты. В работе получены следующие основные результаты:

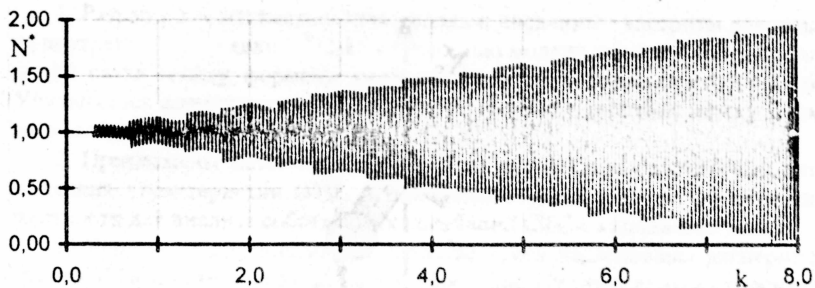


Рис. 7. Натяжение троса при резонансе ($p_1 = 24\Omega$) без учета его диссипативных свойств; N^* - безразмерное натяжение; k - число витков орбиты

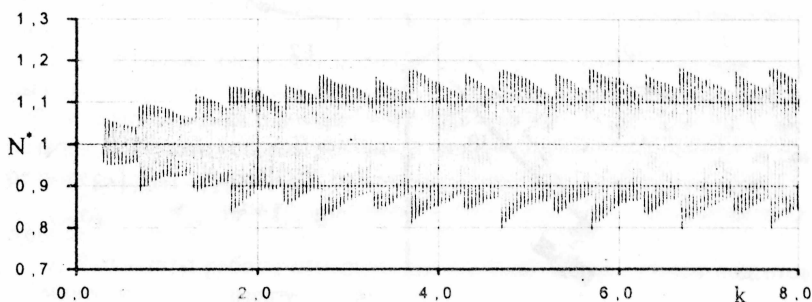


Рис. 8. Натяжение троса при резонансе ($p_1 = 24\Omega$) с учетом диссипативных свойств ($\Psi=0.09$); N^* - безразмерное натяжение; k - число витков орбиты

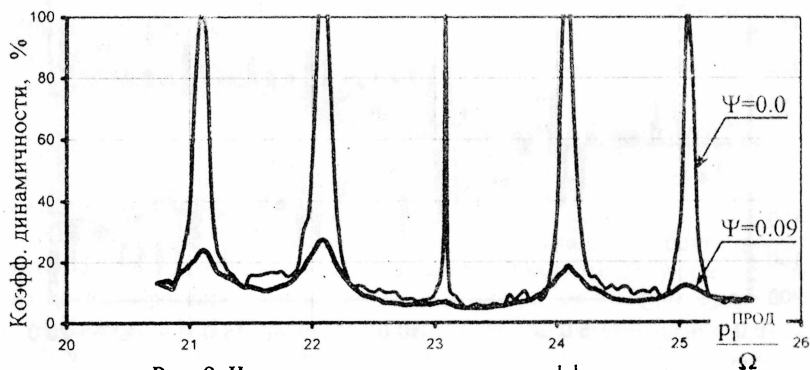


Рис. 9. Частотная характеристика коэффициента динамичности силы натяжения троса

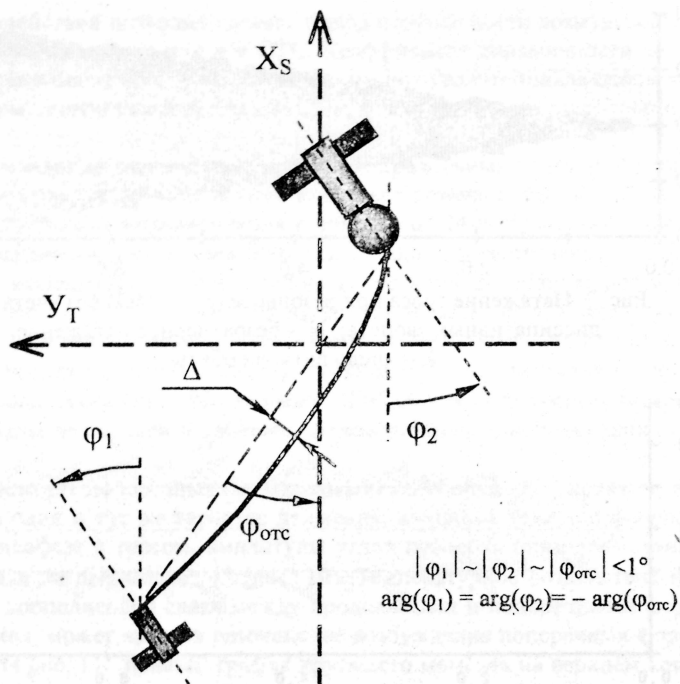


Рис. 10. Характер движения ОТС и концевых тел при маятниковых колебаниях

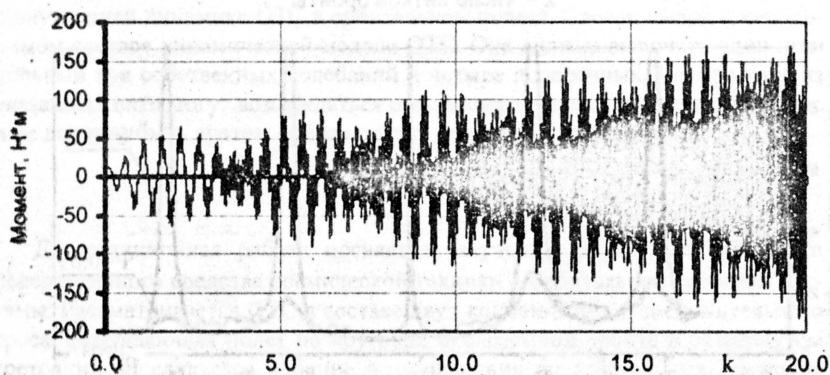


Рис. 11. Момент на верхнем концевом теле при резонансе $p_2^{\text{попер}} = 14\Omega$; k – витки орбиты

1. Разработана математическая модель и численный алгоритм для анализа внутренней динамики ОТС. Особенностью модели является учет кориолисовой связи между формами радиального и трансверсального движений. Учитывается возможность параметрического взаимодействия между формами колебаний.

2. Предложены математические модели для анализа собственных динамических характеристик ОТС, в том числе вариант метода динамической жесткости для анализа собственных колебаний ОТС с концевыми телами.

3. Упругие и диссипативные свойства троса исследованы экспериментально. В заданном диапазоне частот трос обладает постоянным относительным гистерезисом.

4. Проанализированы возмущающие воздействия. Разработаны математические модели для определения температурного состояния троса, термоупругого и гравитационного возмущений. Исследованы частотные свойства возмущений.

5. Выполнено численное моделирование. Исследовано влияние частотных свойств объекта на его динамику. Результаты моделирования дают подробное представление о внутренней динамике ОТС в орбитальном полете и позволяют указать условия резонансного возбуждения продольных и поперечных форм колебаний ОТС при температурном воздействии на трос.

6. Сформулированы рекомендации к составу динамической модели ОТС в орбитальном полете.

7. Результаты работы использовались в РКК «Энергия» при подготовке космических экспериментов серии «Трос».

Публикации по теме диссертации

1. Экспериментальные исследования термовязкоупругих свойств тросов, применяемых в космосе / В.Г. Осипов, Н.Л. Шошунов, В.В. Коровин и др. // Крупногабаритные космические конструкции.: Тез. докл. Международной научно-техн. конф. – Новгород, 1993. – С.37.

2. Коровин В.В., Сдобников А.Н., Усюкин В.И. Динамика орбитальной тросовой системы при гравитационных и термоупругих возмущениях // Крупногабаритные космические конструкции.: Тез. докл. Международн. семинара. – М., 1997. – С.7.

3. Коровин В.В. Резонансные явления при орбитальном полете тросовой системы // Фундаментальные исследования в технических университетах.: Тез. докл. Всероссийск. научно-техн. конф. – СПб., 1997. – С.301-302.

4. Шошунов Н.Л., Коровин В.В. Компьютерное моделирование космического эксперимента с тросовой системой // Ракетно-космическая техника: фундаментальные проблемы механики и теплообмена.: Тез. докл. междунаrodn. научн. конф. – М., 1998. – С.16.

5. Коровин В.В., Сдобников А.Н. Исследование влияния возмущающих факторов на движение тросовой системы относительно центра масс // Ракетно-космическая техника: фундаментальные проблемы механики и теплообмена.: Тез. докл. международн. научн. конф. –М., 1998. – С.55.

6. Коровин В.В., Сдобников А.Н., Темнов А.Н. Термоупругие свойства тросов и кабелей и динамика орбитальных тросовых систем // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий.: Тез. докл. международн. научн. конф. –Киев, 2000.–С.354.

7. Коровин В.В., Сдобников А.Н., Усюкин В.И. Влияние возмущающих факторов космического полета на внутреннюю динамику орбитальной тросовой системы // Прикладные проблемы механики ракетно – космических систем.: Тез. докл. Всероссийск. конф. – М., 2000. – С.23.

Вел