

На правах рукописи

Наумов Сергей Анатольевич

**УПРАВЛЕНИЕ РАЗВЕРТЫВАНИЕМ ОРБИТАЛЬНОЙ
ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СПУСКА МАЛОЙ КАПСУЛЫ**

Специальность 05.07.09 – динамика, баллистика, управление движением
летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара, 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ишков Сергей Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Заболотнов Юрий Михайлович

кандидат технических наук, Елкин
Константин Сергеевич

Ведущее предприятие: ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ - Прогресс" (г.
Самара)

Защита состоится «15» декабря 2006 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.04 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, корпус 3А

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ

Автореферат разослан «14» ноября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета кандидат технических наук,
доцент



Прохоров А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное состояние космонавтики требует повышения эффективности созданной и разрабатываемой космической техники. Одним из возможных путей решения этой задачи является использование для космических маневров и транспортных операций орбитальных тросовых систем (ОТС). В диссертации под ОТС понимается связка базового космического аппарата (КА), находящегося на околоземной орбите, и соединенного с ним при помощи троса субспутника (спускаемой капсулы - СК). С помощью таких систем можно решать широкий спектр задач в космосе. Например, использование троса для доставки грузов с международной космической станции заметно расширило бы ее возможности в плане оперативного получения результатов научных экспериментов или доставки продуктов производства (сверхчистых материалов и т.д.).

Вопросы динамики размотки тросовых систем и принципы их развертывания рассмотрены в работах таких отечественных и зарубежных авторов, как Белецкий В.В., Левин Е.М., Rupp С.С. и др. Широкое применение ОТС в космических транспортных операциях требует разработки эффективных способов и законов управления при развертывании и спуске, в том числе с учетом возмущений, действующих на связку тел, соединенных тросом. Важным является получение оптимальных законов развертывания, позволяющих оценить возможности и границы применения ОТС с целью спуска СК.

Из возможных областей использования ОТС в диссертации рассматривается задача управления на этапе отделения субспутника и развертывания до отрезания троса и начала спуска СК с орбиты.

Рассматривается ОТС с непроводящим электрический ток тросом и механизмом развертывания, позволяющим лишь уменьшать или увеличивать натяжение в тросе. Использование механизма смотки (уменьшения длины выпущенного участка троса) не предполагается. Измеряемыми параметрами движения ОТС являются длина размотанного троса, скорость его размотки и натяжение.

Инструментом решения задачи оптимального управления в диссертации является принцип максимума Понтрягина в сочетании с численными методами решения краевых задач. Их использование приводит к необходимости построения сложных вычислительных процедур. Возникающие вычислительные трудности ограничивают возможность прямого применения получаемых в результате оптимизации результатов для решения задачи управления развертыванием ОТС. В то же время оптимальные решения не всегда могут быть реализованы из-за технических ограничений, накладываемых на ОТС. В связи с этим важным является параметризация задачи на основе частных оптимальных решений. Это позволяет упростить вычислительные процедуры, разработать эффективные методы их решения и учесть ограничения.

Для решения поставленной задачи в диссертации получены оптимальные программы управления развертыванием, проведена их параметризация с учетом

технических ограничений, а также линеаризация модели движения и построение контура обратной связи в соответствии с теорией автоматического управления.

Цель работы. Диссертация посвящена синтезу управления развертыванием орбитальной тросовой системы, на этапе, предшествующем спуску малой капсулы на поверхность Земли.

Научная новизна представленных в диссертации результатов заключается в следующем:

1. Получена оптимальная программа развертывания, обеспечивающая максимальное значение угла отклонения связки от вертикали и максимальный угол входа капсулы в атмосферу.
2. Разработаны и исследованы параметрические законы развертывания ОТС с целью спуска малой капсулы на поверхность Земли, обеспечивающие необходимые условия ее входа в атмосферу.
3. Разработаны и исследованы законы управления относительно номинального движения при действии внешних возмущений и ошибок начальных условий.

Практическая ценность исследования. Тема диссертации выбрана с учетом высокой потребности в исследованиях данного характера, обусловленной, в частности, предстоящим осуществлением эксперимента YES2, проводимого Европейским космическим агентством совместно с ГНПРКЦ «ЦСКБ – Прогресс» (г. Самара). Проект YES2 предусматривает спуск малой капсулы массой 12 кг на тросе длиной 30 км (масса троса около 6 кг) с КА «ФОТОН-М».

Полученные в диссертации результаты позволяют осуществлять оценку альтернативных проектных решений.

Разработанное программное обеспечение позволяет оценивать различные законы управления и моделировать возникновение нештатных ситуаций в процессе размотки.

Результаты исследования были использованы для независимой оценки программы развертывания ОТС по проекту YES2.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оптимальная программа развертывания ОТС, обеспечивающая максимизацию значения угла отклонения субспутника от вертикали.
2. Методика подбора начальных значений сопряженных множителей при решении краевой задачи, связанной с оптимизацией по принципу максимума Понтрягина.
3. Параметрические законы управления натяжением при развертывании ОТС на различных стадиях.
4. Законы развертывания в виде обратной связи для управления натяжением троса при действии возмущений.
5. Рекомендации по выбору проектных параметров ОТС для реализации задачи спуска малой капсулы на поверхность Земли.

Апробация результатов исследования. Основные научные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на российско-европейской летней аэрокосмической школе (г. Самара, 2003, 2004г), XII всероссийском научном семинаре по управлению движением и навигации летательных аппаратов (г. Самара, 2005г), международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, 2006г.).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 4 печатных работах, в том числе одна в журнале, рекомендованном ВАК.

Структура, объем и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 96 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика задачи, ее актуальность и новизна; формулируется цель работы; описывается содержание глав диссертации и основные результаты.

Первая глава посвящена оценке современного состояния и перспектив применения тросовых систем. Приведен обзор существующих проектов и экспериментов, проводимых в космосе с использованием тросов. Описаны американско-итальянские проекты TSS – 1, TSS – 2 и TSS – R; европейский проект YES2; отечественные проекты ТРОС – 1, ТРОС – 1А, ТРОС – 2.

Дана классификация известных законов управления развертыванием ОТС. Описаны принципы разделения законов развертывания на кинематические и динамические. Приведены математические формулировки этих законов с оценкой их достоинств и недостатков и возможной областью применения.

Приведено описание процесса размотки троса по трем стадиям (рис. 1).

I. Отбрасывание субспутника вниз в направлении линии местной вертикали, движение субспутника в окрестности базового КА, выход субспутника на направление местной вертикали и его стабилизация (участок $O - A$).

II. Отклонение субспутника на максимальный угол от местной вертикали в направлении орбитального движения системы (участок $A - B$).

III. Пассивное маятниковое движение, отрезание троса при прохождении субспутником линии местной вертикали (участок $B - C$).

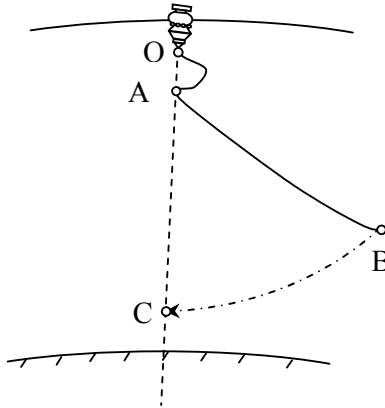


Рисунок 1 – Траектория разворачивания ОТС

Во второй главе рассмотрены математические модели разворачивания ОТС с учетом и без учета массы троса. Приведена модель, позволяющая определять растяжение троса при использовании динамических законов размотки, в которых управление осуществляется изменением величины натяжения троса. В используемой модели существуют следующие допущения: центр масс системы совпадает с центром масс КА; орбита КА круговая, невозмущенная; рассматривается плоская задача; трос аппроксимирован всегда натянутой прямой невесомой нитью. Модель имеет вид:

$$\dot{\theta} = V_{\theta},$$

$$\dot{V}_{\theta} = -\frac{2(V_{\theta} + \omega)V_r}{r} - 3\omega^2 \sin \theta \cos \theta,$$

$$\dot{r} = V_r,$$

$$\dot{V}_r = r[(V_{\theta} + \omega)^2 + \omega^2(3\cos^2 \theta - 1)] - \frac{T}{m_A},$$

$$r_* = V_{r_*},$$

$$\dot{V}_{r_*} = r_*[(V_{\theta} + \omega)^2 + \omega^2(3\cos^2 \theta - 1)] - \sigma^2(r_* - r) + 2\sigma\zeta V_{r_*},$$

где r - длина выпущенного участка троса; θ - угол отклонения субспутника от вертикали; ω - угловая скорость вращения орбитальной системы координат; r_*

- длина растянутого троса; $\sigma = \begin{cases} \sqrt{\frac{ES}{rM_2}}, \text{ при } r_* > r \\ 0, \text{ при } r_* \leq r \end{cases}$; $M_2 = \frac{M_S + m_A}{M_S m_A}$

приведенная масса; m_A - масса субспутника; M_S - масса базового КА; T - натяжение троса; E - модуль упругости троса; ζ - коэффициент демпфирования материала троса; S - площадь поперечного сечения троса.

Предложенная математическая модель позволяет учитывать растяжение троса, при этом становится известной длина нерастянутого троса в процессе размотки.

Приведена линеаризованная относительно номинального движения математическая модель, позволяющая строить систему программного регулирования с контуром обратной связи.

Осуществлена проверка наблюдаемости и управляемости полученной линейной системы. Сделан вывод о том, что система наблюдаема на всей траектории при разворачивании ОТС и существует такое значение длины троса r' , при котором система перестает быть управляемой. Показано, что величина r' зависит от параметров ОТС.

В третьей главе получены номинальные программы разворачивания для первой и второй стадий процесса размотки ОТС.

Требование непровисания троса является одним из важнейших, потому что механизм размотки троса не обеспечивает его смотку на катушку.

На основе известной программы управления натяжением для участка $O - A$ предложена параметризованная программа: $T = m_A \omega^2 (a r + b V_r \omega^{-1} - c r_{K_1})$, обеспечивающая непровисание троса на всей траектории первой стадии. Значения параметров a, b, c подбираются в ходе решения краевой задачи с начальными: $t = 0, r = r_{0_1}, \theta_0 = 0, V_r = V_{r_0}, V_\theta = V_{\theta_0}$ и конечными условиями: $t = t_K, r = r_{K_1}, \theta_K = 0, V_{r_K} = 0, V_{\theta_K} = 0$. Значения $\theta_K, V_{r_K}, V_{\theta_K}$ используются для подсчета невязок, условия $t = t_K, r = r_{K_1}$ выполняются автоматически при достижении тросом конечной длины. Краевая задача на этой стадии разворачивания должна быть решена с учетом ограничения $T > 0$, во избежание провисания троса и его неконтролируемого схода с катушки. Решение данной параметрической задачи имеет хорошую сходимость и не вызывает трудностей принципиального характера.

Из соображений технической реализуемости на скорость отделения наложено ограничение: $V_{r_0} > \frac{\omega}{b} (c r_{K_1} - a r_{0_1})$, которое так же следует из условия $T > 0$.

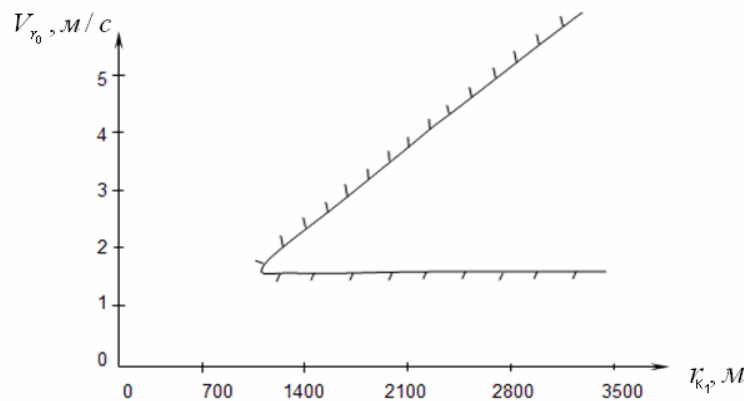


Рисунок 2 – Область параметров для подбора значений a, b, c

На рис. 2 показана полученная в пространстве V_{r_0}, r_{K_1} , область параметров тросовой системы, в которой обеспечивается условие отсутствия провисания и возможен подбор коэффициентов a, b, c .

Для второго участка $A - B$ (рис. 1) формулируется задача оптимизации: найти такой закон управления натяжением троса, при котором угол отклонения субспутника от местной вертикали будет максимальным (точка B). Для решения поставленной задачи использован принцип максимума Понтрягина. Функционал записан в виде: $|\theta_K| \rightarrow \max$ Гамильтониан системы имеет вид: $H = \psi_{V_\theta} \dot{V}_\theta + \psi_\theta \dot{\theta} + \psi_{V_r} \dot{V}_r + \psi_r \dot{r}$ или $H = H_0 - \psi_{V_r} T m_A^{-1}$, где $\psi_{V_\theta}, \psi_\theta, \psi_{V_r}, \psi_r$ - сопряженные множители соответствующих координат; в качестве H_0 обозначены члены, не зависящие от управления T . Из условия максимума H получено оптимальное управление в виде релейной функции:

$$T_{opt} = T_{\max} \left(\frac{\text{sign}(\psi_{V_r}) + 1}{2} \right), \quad (1)$$

где $T_{\max} > 0$ - наперед заданное максимальное значение натяжения, выбор которого определяется условием прочности материала троса. Управление будет характеризоваться двумя участками: «активным» $T = T_{\max}$ и «пассивным» $T = 0$.

Указанная оптимизационная задача сводится к краевой задаче определения начальных значений сопряженных множителей при следующих граничных условиях: $t = 0, V_{\theta_0} = 0, V_{r_0} = 0, \theta_0 = 0, r = r_{0_2}, \psi_{\theta_0}, \psi_{V_{r_0}}, \psi_{r_0}, \psi_{V_{\theta_0}};$ $t = t_K, \psi_\theta = 0, V_{\theta_K} = 0, V_{r_K} = 0, r = r_{K_2}$, где t_K - время развертывания на участке $A - B$. Подбор неизвестных начальных значений сопряженных множителей осуществляется с помощью метода «продолжения по параметру». Для подбора начальных значений предлагается следующая методика.

1. Произвести нормировку сопряженной системы по одному из сопряженных множителей, тем самым, снижая количество подбираемых параметров.
2. На основании известных свойств о свободном относительном движении двух тел по орбите для вырожденной задачи при $T = 0$, подобрать такое значение r_{0_2} , чтобы в течение одного витка расстояние между базовым КА и субспутником стало равным r_{K_2} .
3. Осуществить совместное интегрирование исходной и сопряженной системы от t_K к t_0 (обратное интегрирование). Определить начальные значения сопряженных множителей для вырожденной задачи
4. Реализовать процедуру «продолжения по параметру» (последовательное решение краевой задачи) для значений $r_{0_2}^{i+1} = r_{0_2}^i + \Delta r$, где $i = 0, \dots, n$,

$$\Delta r = \frac{r_{K_2} - r_{0_2}}{n}.$$

Моделирование показывает, что закон оптимального управления по критерию максимизации угла отклонения в плоскости орбиты для рассматриваемой области проектных параметров ОТС является релейным с одним переключением. Таким образом, управление будет характеризоваться двумя параметрами: величиной натяжения троса T и длиной троса при переключении r_n . Это обстоятельство позволяет редуцировать исходную оптимизационную задачу в параметрическую.

Решение задачи о максимуме угла отклонения от линии местной вертикали сопряжено со значительными трудностями вычислительного характера, поскольку не всегда удается подобрать соответствующие начальные значения сопряженных множителей.

На практике реализация закона (1) представляется проблематичной. Из-за трения троса о конструктивные узлы механизма размотки натяжение не будет нулевым на участке «пассивного» движения. Кроме того, необходимо обеспечить возможность изменения величины натяжения с целью управления при действии возмущений.

Предлагается в связи с этим на второй стадии использовать закон развертывания, учитывающий вышеуказанные ограничения:

$$T = T_1 \left(\frac{1 + \text{sign}(r_n - r)}{2} \right) + T_2 \left(\frac{1 + \text{sign}(r - r_n)}{2} \right), \quad (2)$$

где T_1 - натяжение троса до момента переключения, T_2 - натяжение после переключения. Значение T_1 выбирается с учетом ограничения: $T_1 \geq T_k$, где T_k - конструктивное натяжение, обусловленное трением троса о детали механизма размотки при развертывании.

Для закона (2) сформулирована и решена параметрическая краевая задача: для различных начальных длин троса подобрать такие значения T_2 и r_n , которые обеспечивали бы плавное гашение скорости в конце процесса развертывания и выполнение терминальных условий: $V_{r_k} = 0$, $V_{\theta_k} = 0$. Задача решена для следующих начальных: $t = t_0$, $\theta_H = 0$, $r = r_{0_2}$, $V_{r_H} = 0$, $V_{\theta_H} = 0$ и конечных условий: $t = t_k$, $r = r_{k_2}$, $V_{r_k} = 0$, $V_{\theta_k} = 0$, а конечное значение угла θ_k не фиксировано. Здесь r_{k_2} - полная длина троса, значение t_k обеспечивается при достижении длиной троса величины r_{k_2} .

Для полученных номинальных законов определены значения угла и скорости входа спускаемой капсулы в атмосферу. В момент отрезания троса за счет маятникового движения капсула будет иметь приращение скорости, направленное в сторону, противоположную орбитальному движению. При этом за счет связи с КА ее орбитальная скорость будет соответствовать орбитальной скорости КА, находящегося на более высокой орбите. Это вынуждает субспутник двигаться по орбите со скоростью меньшей, чем та, которую он имел бы при отсутствии связи с КА. Сумма разности орбитальных скоростей,

обусловленных связью, и скорости, обусловленной маятниковым движением, может быть принята в качестве аналога тормозного импульса.

Приведены зависимости значений угла и скорости входа в атмосферу на высоте 120 км (рис. 3 и 4). Расчеты проводились для различных начальных длин троса. Моделирование показало, что начальная длина троса на второй стадии его развертывания (как следствие максимальный угол отклонения субспутника от местной вертикали) не существенно влияет на параметры входа СК в атмосферу. Поэтому варьированием этой длины сложно добиться выполнения заданных условий входа. Более существенное влияние оказывает полная длина троса, а как следствие и высота, на которой находится субспутник в момент его отрыва от базового КА.

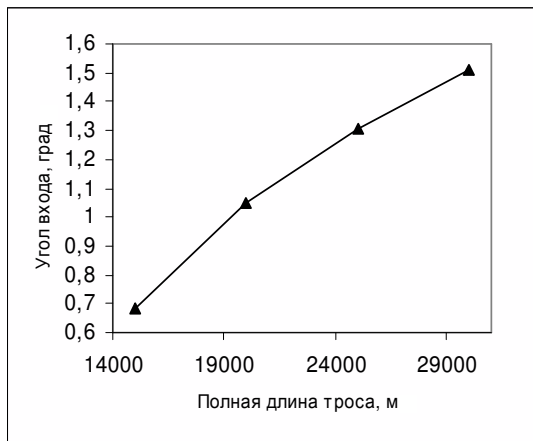


Рисунок 3 - Зависимость угла входа в атмосферу от длины троса

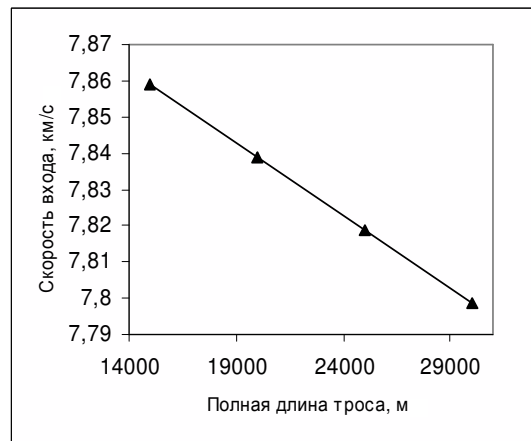


Рисунок 4 - Зависимость скорости входа в атмосферу от длины троса

В четвертой главе рассмотрены два вида систем программного регулирования процессом развертывания при действии внешних возмущений и ошибок начальных условий. Предлагается использовать программное регулирование только на второй стадии развертывания, так как ошибки выведения субспутника в окрестность линии местной вертикали на первой стадии могут быть скомпенсированы на второй.

Для построения системы программного регулирования используются «классический» и «современный» (матричный) методы. При использовании первого подхода программа управления имеет вид: $T(t) = T(t)_{ном} + \Delta T(t)$, $\Delta T(t) = K_1(r_{изм} - r_{ном}(t)) + K_2(V_{r_{изм}} - V_{r_{ном}}(t))$, где $T(t)$ - командное натяжение троса; $T(t)_{ном}$ - номинальное натяжение троса; K_1, K_2 - коэффициенты усиления в цепи обратной связи; $r_{изм}, V_{r_{изм}}$ - измеренная длина и скорость размотки троса, соответственно; $r_{ном}(t), V_{r_{ном}}(t)$ - номинальная длина и скорость размотки.

Решена задача подбора коэффициентов K_1 и K_2 , обеспечивающих заданное качество переходных процессов в системе.

В качестве командного (номинального) натяжения $T(t)$ используется закон развертывания (2). Структурная схема системы управления показана на рис. 5, где W_{op} - передаточная функция объекта регулирования (механизма размотки троса, обеспечивающего изменение значения натяжения по заданной программе) по выходному воздействию.

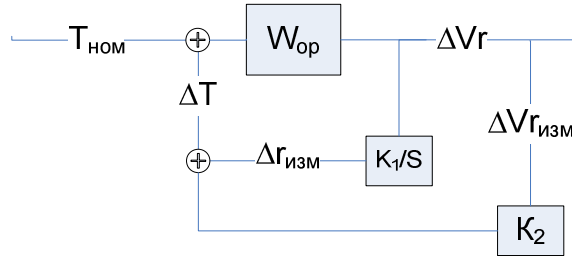


Рисунок 5 – Структурная схема системы программного регулирования

Для оценки качества управления построена переходная характеристика системы при единичном ступенчатом воздействии. С целью улучшения характеристик система программного регулирования оптимизирована по улучшенной интегральной квадратичной оценке $J = \int_0^{\infty} \left[\varepsilon^2(t) + \tau^2 \left(\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right)^2 \right] dt$, где $\varepsilon(t)$ - динамическая ошибка регулирования; τ - постоянная времени в желаемом апериодическом процессе.

Существенным отличием матричного метода от «классического» является то, что для управления используются все компоненты вектора состояния. Это означает возможность управления значениями r , V_r , θ и V_θ . Матричный подход может применяться, если исходная система полностью наблюдаема и управляема. Это условие позволяет поместить корни характеристического уравнения в любое заданное положение. Однако это возможно только на участке полной управляемости $r < r'$.

Предложена программа управления вида:

$$\Delta T = P_1(r_{изм} - r_{ном}(t)) + P_2(V_{r_{изм}} - V_{r_{ном}}(t)) + P_3(\theta_{изм} - \theta_{ном}(t)) + P_4(V_{\theta_{изм}} - V_{r_{ном}}(t)),$$

где P_1, \dots, P_4 - коэффициенты усиления в цепи обратной связи.

Коэффициенты P_1, \dots, P_4 , являются переменными.

Проведен анализ ошибок управления развертыванием при использовании системы программного регулирования на основе «классического» и матричного подходов. В таблице 1 показаны значения ошибок управления от возмущения начальных параметров при переходе от второй к третьей стадии развертывания.

Таким образом, при матричном и «классическом» подходах ошибки управления не превышают 5%. Матричный подход несколько лучше обеспечивает близость возмущенного движения к номинальной траектории. Однако следует учитывать потерю управляемости и принимать решение о его применении для конкретной ОТС.

Таблица 1 – Средняя относительная ошибка управления

Параметр	«Классический» подход	Матричный подход
θ	1,4%	0,6%
V_θ	4,6%	1,7%
r	0,1%	0,1%
V_r	2,1%	2,1%

ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Обосновано применение расширенной математической модели, позволяющей проводить моделирование с учетом растяжимости троса при использовании динамических законов.
2. Получен параметрический закон управления натяжением при разворачивании ОТС на этапе отвода субспутника от базового КА с учетом ограничения на непровисание троса в процессе размотки и определены значения коэффициентов закона для возможных проектных параметров ОТС.
3. Сформулирована оптимизационная задача для критерия максимума значения угла отклонения субспутника от местной вертикали и в результате ее решения принципом максимума Понтрягина получена оптимальная номинальная программа разворачивания ОТС.
4. Предложена методика подбора начальных значений сопряженных множителей при решении краевой задачи, использующая метод «продолжения по параметру».
5. На основе оптимальной программы получен параметрический закон управления разворачиванием, позволяющий учитывать технические ограничения, накладываемые на механизм размотки, и осуществлять управление натяжением при действии возмущений.
6. Получены законы в виде обратной связи для управления разворачиванием ОТС при действии внешних возмущений и определены их достоинства и недостатки.
7. Оценено влияние ошибок управления на параметры входа в атмосферу и установлено, что матричный подход несколько лучше обеспечивает близость возмущенного движения к номинальной траектории.
8. Проведен анализ возможности учета массы троса как внешнего возмущения и сделан вывод о необходимости использования математической модели, учитывающей массу троса, при формировании программ управления для систем, в которых масса субспутника и троса сопоставимы.

9. Проведено моделирование процесса развертывания ОТС с учетом растяжимости троса и обоснована возможность применения математической модели, не учитывающей его массу для синтеза законов управления.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Naumov S.A. Modelling of Possible Trajectories of an Orbital Tethered System During Deployment // Proceedings of the Russian-European Summer Space School 'Future Space Technologies and Experiments in Space'. 30 June – 11 July, State Aerospace University, Samara, Russia, WPP229, p. 161 – 163, 2003.
2. Ишков С.А., Наумов С.А. Орбитальная тросовая система. Управление транспортными операциями в космосе. // Проблемы и перспективы развития двигателестроения / Материалы докладов междунар. научн. - техн. конф. 21-23 июня 2006г. – Самара: СГАУ, 2006. – В 24. Ч. 2. – С. 175 – 176.
3. Ишков С.А., Шейников И.В., Наумов С.А. Вопросы безопасности и возможные пути их решения в орбитальных тросовых системах. // Проблемы и перспективы развития двигателестроения / Материалы докладов междунар. научн. - техн. конф. 21-23 июня 2006г. – Самара: СГАУ, 2006 – В 24. Ч. 2. – С. 78 – 79.
4. Ишков С.А., Наумов С.А. Управление развертыванием орбитальной тросовой системы // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени С.П. Королева. – Самара. – 2006. Вып – 1 (9). – С. 81 - 90.

Подписано в печать 03.11.2006. Формат 60×84/16

Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готовых оригинал-макетов СГАУ