

На правах рукописи

Назарова Анастасия Александровна

**УПРАВЛЕНИЕ РАЗВЁРТЫВАНИЕМ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ
ТРОСОВЫХ ГРУППИРОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет) на кафедре программных систем.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Заболотнов Юрий Михайлович**.

Официальные оппоненты:

Трушляков Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» кафедра «Авиа- и ракетостроение», профессор кафедры;

Притыкин Дмитрий Аркадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, ООО «Бюро 1440», руководитель отдела алгоритмического обеспечения.

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)**», г. Москва.

Защита состоится 19.12.2025 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.379.03, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»:

https://ssau.ru/storage/pages/6820/file_68e89ba5d45845.27793885.pdf

Автореферат разослан «__»_____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Крамлих Андрей Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В работе рассматриваются управление развёртыванием многоэлементных тросовых группировок космических аппаратов различных геометрических конфигураций: кольцевых в виде правильных многоугольников и структур типа «ступица-спицы» (Hub-Spoke) с центральным базовым космическим аппаратом (КА).

Актуальность работы.

Тросовые группировки космических аппаратов (ТГКА) являются одним из наиболее перспективных направлений в области аэрокосмической деятельности. Благодаря своей большой протяженности ТГКА имеют многочисленные возможные применения, включая многоточечные измерения гравитационных и магнитных полей Земли и её ионосферы, космическую интерферометрию, а также распределенные системы наблюдения и сканирования земной поверхности с базой в несколько километров. Кроме того, они могут быть использованы для транспортных операций в космосе и для создания искусственной гравитации во время межпланетных полётов. В связи с этим во многих странах в последнее время появляется большое количество проектов ТГКА различной геометрической конфигурации.

Особое внимание уделяется проектам, которые используют ТГКА с дополнительными механическими связями между КА. Эти связи позволяют поддерживать геометрическую конфигурацию группировки при определённых условиях, что способствует снижению энергетических затрат.

Группировкам КА, использующим тросовые соединения, посвящено многочисленное работы отечественных и зарубежных специалистов. В настоящее время наиболее подробно исследованы линейные ТГКА. Здесь следует отметить пионерские работы Белецкого В.В., Левина Е.М., Алпатова А.П., Драновского В.И., Иванова В.А., Сазонова В.В. и др., а также зарубежных ученых Bekey I., Misra A.K., Williams P., Colombo G., Lorenzini E.C., Zhu Z.H., Kruijff M., Iñarte M. и др. Значительный вклад в исследование линейных ТГКА внесли специалисты Самарского университета Асланов В.С., Ишков С.А., Заболотнов Ю.М., Ледков А.С. и многочисленные их ученики, защитившие диссертации по рассматриваемой тематике. В последнее время появилось большое количество работ, в которых рассматриваются системы более сложной структуры, причем основное внимание уделяется треугольным конфигурациям ТГКА и структурам «ступица-спицы» с центральным КА и, как правило, с тремя концевыми КА. Этому направлению посвящены работы Misra A.K., Williams P., Pizarro-Chong A., Cai Z., Huang B., Huang P., Zhang F., Заболотнова Ю.М., Chen S., Li A., Wang C., Liu C. и др. Необходимо отметить, что имеют отдельные работы, где рассматриваются пространственные ТГКА в виде пирамиды или двойной пирамиды авторов Bekey I., Williams P., Pizarro-Chong A., Misra A.K., Alary D., Сидоренко В.В., Притыкин Д.А. и др.

Анализ существующих исследований показывает, что большинство работ сосредоточено на плоских конфигурациях ТГКА треугольных и вида «ступица-

спицы», причем КА представляются как материальные точки. Однако вопросы развёртывания систем плоских многоугольных конфигураций, начиная с квадрата, остаются недостаточно исследованными. Особенностью представляемой работы является рассмотрение КА, входящих в состав ТГКА, как твердых тел конечных размеров, то есть задачи развёртывания ТГКА рассматриваемых конфигураций исследуются в более полной постановке.

Из вышесказанного следует актуальность диссертационного исследования.

Проведенные исследования и публикации по теме диссертационной работы составили важную часть отчетов по гранту «Динамический анализ и управление движением тросовой группировки микро-спутников» (РФФИ, №21-51-53002 ГФЕН_а, 2021-2022 г., рук. Заболотнов Ю.М.).

Объект исследования: многоэлементная тросовая группировка космических аппаратов.

Предмет исследования: законы и программы управления развёртыванием ТГКА.

Цель работы: разработка законов и программ управления развёртыванием многоэлементных ТГКА, стабилизация их движения при действии возмущений.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математические модели движения ТГКА в виде правильных многоугольников и структуры «ступица-спицы» для построения номинальных законов и программ управления при их развёртывании.

2. Разработать номинальные законы и программы управления движением ТГКА рассматриваемых конфигураций при их развёртывании, обеспечивающие заданные их конечные состояния.

3. Разработать математические модели движения многоугольных ТГКА и конфигурации «ступица-спицы» для проверки возможности реализации предлагаемых законов и программ управления с учетом растяжимости тросов, движения КА относительно своих центров масс и других возмущений.

4. Провести численное моделирование управляемого движения ТГКА рассматриваемых конфигураций при их развёртывании с учётом действующих возмущений, подтверждающее возможность использования разработанных законов и программ управления.

5. Разработать дополнительные способы стабилизации движения ТГКА рассматриваемых конфигураций в процессе их формирования.

Методы решения. Для решения перечисленных задач применяются классические методы математики и теоретической механики, динамики полёта, теории управления и вычислительной математики.

Область исследования.

Соответствие паспорту специальности. Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов по пунктам: п. 5 «Создание методов анализа и проектирования траекторий одиночных летательных аппаратов, а также группы ЛА»; п. 6 «Разработка алгоритмов автономного и

дистанционного управления траекторией ЛА, а также однородных и разнородных группировок ЛА».

Научная новизна результатов.

1. С использованием уравнений Лагранжа разработаны упрощенные математические модели движения ТГКА рассматриваемых конфигураций и показано, что они могут быть использованы для построения номинальных законов и программ управления, предназначенных для формирования многоугольных ТГКА и структур «ступица-спицы».

2. Для ТГКА многоугольной конфигурации впервые получен общий параметрический закон управления натяжением тросов, который обеспечивает приведение ТГКА в заданное конечное состояние. Закон апробирован при формировании кольцевых структур, начиная с квадрата и кончая правильным семиугольником.

3. Впервые предложено и обосновано использование проводящих ток тросов для управления при развёртывании ТГКА конфигурации «ступица-спицы», что позволяет снизить требования к точности стабилизации концевых КА относительно своих центров масс.

4. Для исследования вопросов реализации предлагаемых номинальных законов и программ управления разработаны модели движения рассматриваемых конфигураций ТГКА при действии возмущений, отличительной особенностью которых является учёт движения КА вокруг своих центров масс, что позволяет оценить влияние колебаний КА относительно тросов на качество предложенного управления.

5. В качестве дополнительного способа стабилизации квадратной ТГКА предложено и обосновано использование центрального вспомогательного груза, соединенного тросами с концевыми КА.

Практическая ценность работы.

Разработаны программы моделирования движения ТГКА рассматриваемых конфигураций в процессе их формирования и дальнейшего движения по орбите с учётом движения КА вокруг центров масс и при действии возмущений. Для каждой приведенной конфигурации определен принципиальный состав необходимых управляющих воздействий, необходимых для их развёртывания и переводе системы в заданное состояние. Построены законы и программы управления движением рассматриваемых ТГКА, которые реализованы с использованием достаточно простых алгоритмов управления, что важно в практическом отношении. Результаты работы могут быть использованы при проектировании перспективных многоэлементных ТГКА.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математические модели движения многоугольной кольцевой ТГКА и структуры «ступица-спица», предназначенные для построения номинального управления при их развёртывании.

2. Номинальные законы и программы формирования рассматриваемых многоэлементных ТГКА для их перевода в заданное конечное состояние, включая общий параметрический закон управления натяжением тросов при

развёртывании ТГКА в виде правильных многоугольников, применимый для многоугольников с числом вершин больше трёх.

3. Математические модели пространственного движения рассматриваемых конфигураций ТГКА с учётом растяжимости тросов и углового движения КА, предназначенные для оценки возможности применимости разработанных номинальных законов и программ развёртывания ТГКА при действующих возмущениях.

4. Результаты численного моделирования движения рассматриваемых структур ТГКА в процессе их развёртывания при действии возмущений, и сформулированные выводы на основании проведенных исследований.

5. Способ развёртывания ТГКА «ступица-спицы» с использованием проводящих ток тросов, взаимодействующих с магнитным полем Земли.

6. Метод стабилизации движения квадратной ТГКА, основанный на использовании центрального вспомогательного груза, соединенного тросами с концевыми спутниками.

Достоверность и апробация результатов.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях: Международная молодёжная научная конференция, посвящённая 60-летию полёта в космос Ю.А. Гагарина «XVI Королёвские чтения» (г. Самара, 2021 г.), V Российский симпозиум по наноспутникам с международным участием «RusNanoSat-2023» (г. Самара, 2023 г.), XXVI конференция молодых учёных «Навигация и управление движением» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.), XXVII Всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов (г. Самара, 2024 г.)

Исследования, проведенные в работе, основываются на корректном применении основных положений теоретической механики, динамики полёта КА, высшей и вычислительной математики, и подтверждаются численным моделированием движения ТГКА по моделям при действии возмущений с учётом движений КА вокруг своих центров масс и растяжимости тросов. Полученные результаты не противоречат известным результатам исследования динамики ТГКА другими авторами.

Личный вклад автора.

Все научные результаты и результаты, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Автором самостоятельно разработаны законы и программы управления развёртываем рассматриваемых ТГКА, проведены численные расчёты.

Публикации.

По теме работы опубликовано 11 работ. Из них 3 статьи опубликовано в журналах РАН (индексируемых в RSCI), переводные версии которых входят в базы SCOPUS и Web of Science.

Структура и объём работы.

Работа состоит из введения, четырёх глав, списка основных сокращений и обозначений, заключения и списка литературы. Объём работы – 106 страниц, диссертация содержит 39 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 71 источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, описываются: научные новизна результатов, практическая ценность, положения, выносимые на защиту, апробация и степень достоверности проведенных исследований.

В **первой главе** проводится аналитический обзор известных работ, соответствующих теме работы. Последовательно анализируются методы управления движением линейных, плоских и пространственных космических тросовых систем (КТС). Основное внимание уделяется способам развёртывания КТС, включая ТГКА. Описываются особенности управления движением электродинамических космических тросовых систем (ЭДКТС). На основе проведенного анализа формулируется цель работы и перечисляются задачи, которые необходимо решить в работе. Приводится схема исследований и основные этапы разработки законов и программ управления развёртыванием многоэлементных ТГКА. Некоторые геометрические структуры ТГКА, рассмотренные в работе, представлены на рисунке 1. Для каждой рассматриваемой конфигурации ТГКА формулируется постановка задачи. В начальный момент структура ТГКА повторяет её геометрию в конечном состоянии и вращается в плоскости орбиты центра масс системы (в номинальном случае) как твердое тело с некоторой угловой скоростью, которая выбирается в процессе решения задачи. После освобождения механических связей (тросов) начинается процесс развёртывания ТГКА. Необходимо определить управления (исполнительные органы) и соответствующие управляющие воздействия на ТГКА (законы и программы управления), переводящие ТГКА в заданное конечное состояние. Для кольцевых ТГКА – это правильные многоугольники, для конфигурации «ступица-спицы» – это симметричная относительно центра масс «звёздная» структура, в которой три «спицы» составляют между собой 120 град. Все рассматриваемые конфигурации ТГКА в конечном итоге должны иметь необходимые размеры и вращаться относительно центра симметрии с заданной угловой скоростью.

Во **второй главе** разрабатываются математические модели движения ТГКА рассматриваемых конфигураций, используемые для построения номинальных законов и программ управления при их развёртывании, и более сложные модели с учётом действующих возмущений. При построении упрощенных моделей, применяемых для построения номинального управления, используются уравнения Лагранжа, и вводится ряд допущений, таких как: КА – материальные точки, сохранение симметрии системы при ее формировании и другие.

Для управления развёртыванием многоугольной ТГКА используются: 1) реактивные силы (рис. 1а-г), приложенные к каждому КА (для создания необходимого вращающего момента относительно центра масс всей системы); 2) механизмы выпуска тросов, также расположенные на всех КА, и обеспечивающие программное изменение сил натяжения тросов.

Для многоугольной ТГКА были получены следующие упрощенные уравнения, описывающие развёртывание ТГКА

$$\ddot{l} - l\dot{\theta}^2 = Q_l f(n)/m, \quad \ddot{\theta} + \frac{2l\dot{\theta}}{l} = Q_\theta f(n)/m, \quad (1)$$

где $f(n) = 4 \sin^2(\psi_n/2)/n$, l и θ – длина тросов и угол ориентации многоугольника относительно вертикали, n – число вершин многоугольника, $\psi_n = 2\pi/n$ – центральный угол многоугольника, m – масса КА, Q_l, Q_θ – обобщенные силы.

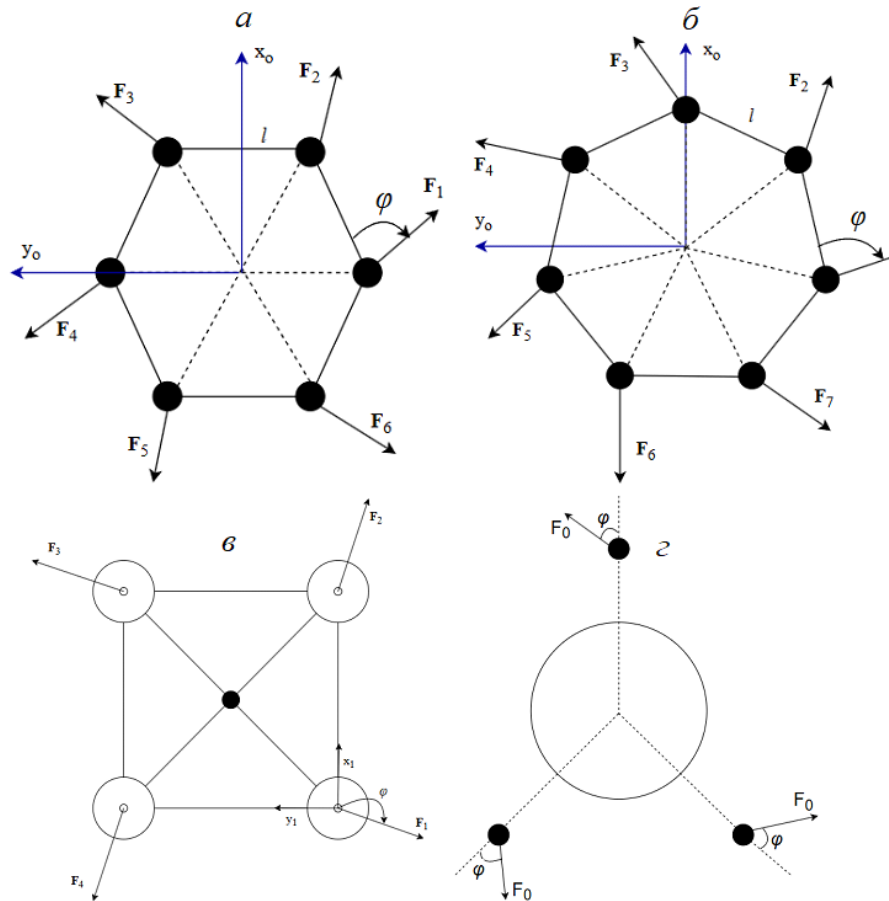


Рисунок 1 – Геометрические структуры ТГКА (x_0, y_0 – направление осей орбитальной системы координат)

Обобщенные силы, зависящие от реактивных сил, вычисляются как $Q_l^{(F)} = nF \sin(\varphi - \psi_n/2) / 2\sin(\psi_n/2)$, $Q_\theta = nFl \cos(\varphi - \psi_n/2) / 2\sin(\psi_n/2)$, (2) где F – модуль реактивных сил, φ – угол, который определяет направление действия реактивных сил относительно тросов (рисунок 2). Суммарная обобщенная сила Q_l будет иметь вид $Q_l = Q_l^{(F)} - nT$, где T – номинальная сила натяжения тросов.

Для управления развёртыванием ТГКА «ступица-спицы» применяются: 1) реактивные (рисунок 1г) или электромагнитные силы, приложенные к каждому тросу как распределенные нагрузки; 2) три механизма выпуска тросов, расположенные на центральном КА. Предполагается, что масса центрального КА много больше масс концевых спутников.

Упрощенные уравнения движения ТГКА «ступица-спицы», используемые для построения номинальных программ при её развёртывании с применением электромагнитных сил для создания необходимого вращающего момента относительно центра масс всей системы, имеют вид

$$\ddot{\theta}_t = Q_{\theta_t}/3l^2m - 2\dot{l}\dot{\theta}_t/l, \ddot{l} = Q_l/3m + l\dot{\theta}_t^2, \quad (3)$$

где l, θ_t – длина и угол вращения тросов, $Q_{\theta_t} = 3Fl/2$, $Q_l = -3T$, $F = B_o I$ – сила Ампера, T – сила натяжения троса, B_o – модуль вектора индукции магнитного поля на экваторе, I – сила тока.

Проверка реализуемости номинального управления осуществляется по уравнениям движения ТГКА в пространственном случае, в которых тросы рассматриваются как растяжимые односторонние механические связи (при растяжении используется закон Гука), то есть допускается их ослабление, и учитывается ряд других возмущений. В виду большого объёма, ниже приводятся уравнения движения ТГКА кольцевой конфигурации. Для ТГКА «ступица-спицы» модель строится аналогичным образом.

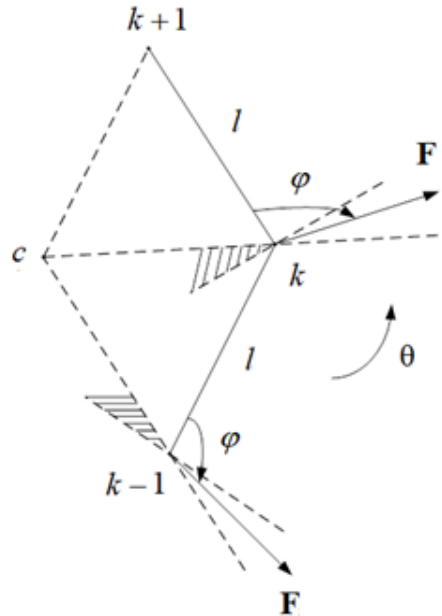


Рисунок 2 – Фрагмент ТГКА в виде многоугольника с обобщенными координатами

Для записи уравнений движения многоугольной ТГКА с учётом возмущений используется геоцентрическая неподвижная система координат, которая принимается за инерциальную. Уравнения движения центров масс КА имеют вид

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{\mathbf{R}}_1 &= \mathbf{G}_1 + \mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_n + \mathbf{F}_1, \\ m_k \ddot{\mathbf{R}}_k &= \mathbf{G}_k + \mathbf{T}_k - \mathbf{T}_{k-1} + \mathbf{F}_k \quad (k = 2, \dots, n-1), \\ m_n \ddot{\mathbf{R}}_n &= \mathbf{G}_n + \mathbf{T}_n - \mathbf{T}_1 + \mathbf{F}_n, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{R}_k (k=1, \dots, n)$ – радиусы-векторы центров масс КА, $\mathbf{F}_k$ – реактивные силы, $\mathbf{G}_k = -\mu m_k \mathbf{R}_k / R_k^3$ – гравитационные силы, μ – гравитационная постоянная,

T_k – силы натяжения тросов, приложенные к k -й точке и направленные к следующей точке.

Динамические уравнения Эйлера для КА записываются как

$$\dot{\omega}_k = J_k^{-1}(\mathbf{M}_k - \omega_k \times J_k \omega_k), k = 1, \dots, n, \quad (5)$$

где ω_k , J_k и $\mathbf{M}_k$ – векторы угловых скоростей, тензоры инерции и векторы моментов, действующих на k -й КА

Кинематические уравнения Эйлера–Пуассона:

$$\dot{e}_{xk} = \omega_k \times e_{xk}, \dot{e}_{yk} = \omega_y \times e_{yk}, \dot{e}_{zk} = \omega_k \times e_{zk}, \quad (6)$$

где e_{xk}, e_{yk}, e_{zk} ($k = 1, \dots, n$) – орты главных связанных систем координат.

Динамические уравнения механизмов управления для выпуска тросов:

$$m_{in} \ddot{L}_k = T_k - U_k, \quad (7)$$

где U_k – управляющие силы, тормозящие тросы; m_{in} – параметр, учитывающий инерционность механизмов управления, T_k – силы натяжения тросов, L_k – нерастяннутая длина тросов.

Управляющие силы определяются следующим образом

$$U_k = K_l(L_k - l) + K_v(\dot{L}_k - \dot{l}), \quad (8)$$

где, K_l, K_v – коэффициенты обратной связи, $l, \dot{l}$ – номинальные значения длины и скорости тросов. Так как управляющие механизмы работают только на торможение, поэтому если $\dot{L}_k \leq 0$ или $T_k \leq 0$, то $\dot{L}_k = \ddot{L}_k = 0$.

Силы натяжения тросов T_k определяются по закону Гука с учетом односторонности механических связей между КА

$$T_k = T_k \Delta r_k / \Delta r_k, \quad (9)$$

$$T_k = \begin{cases} C \frac{\Delta r_k - L_k}{L_k} & , \text{if } \Delta r_k - L_k \geq 0, \\ 0 & , \text{if } \Delta r_k - L_k < 0 \end{cases}$$

где $k = 1, \dots, n$, $C = ES$, где E – модуль упругости Юнга, S – площадь поперечного сечения тросов, Δr_k – вектор, соединяющий точки крепления троса у соседних КА в многоугольнике с учётом их размеров.

Уравнения (4) и (5), (6) интегрируются совместно, то есть силы натяжения и направления реактивных сил зависят от движения КА относительно своих центров масс.

В третьей главе рассматривается управление движением при развёртывании многоугольных ТГКА с использованием двигателей малой тяги, расположенных на каждом КА, и механизмов выпуска тросов, работающих только на их торможение.

Была построена релейная параметрическая номинальная программа управления тягой реактивных двигателей, которая включает в себя 3 этапа: два активных этапа и средний – пассивный. На первом этапе двигатели малой тяги включаются сразу после разделения КА. На втором (пассивном) этапе ($F = 0$) с помощью управляющих механизмов регулируется сила натяжения тросов так,

чтобы по окончании выпуска тросов выполнились следующие условия: $l \rightarrow l_{\text{end}}$, $\dot{l} \rightarrow 0$ с учетом ограничений $l < l_{\text{end}}$, $\dot{l} > 0$. На последнем этапе двигатели вновь включаются для доведения угловой скорости вращения системы до заданной величины. На активных участках тяга двигателей постоянна. Для выполнения конечных условий движения многоугольной ТГКА на пассивном участке был разработан номинальный параметрический закон управления силами натяжения тросов

$$T(n) = m[l\dot{\theta}^2 + k_l(l - l_{\text{end}}) + k_v\dot{l}]/nf(n), \quad (10)$$

где k_l, k_v – параметры, которые выбираются исходя из выполнения конечных граничных условий, приведенных выше.

После этого была проведена оценка влияния на процесс формирования ТГКА возмущений, приводящих к сложному пространственному движению всей системы и отдельных КА. Для этого были введены следующие возмущения: вектор начальной угловой скорости ТГКА (до разделения КА) не ортогонален плоскости орбиты центра масс системы (45 град), неравные массы КА (10%), статическая и динамическая асимметрия КА как твёрдых тел (10%), и другие. Моделирование возмущенного движения проводилось с использованием модели (4–9) с учётом растяжимости тросов и односторонности механических связей.

На рисунке 3 приводится пример влияния возмущений на процесс развертывания ТГКА для шестиугольника ($\tau = t\Omega_o$ – безразмерное время, Ω_o – угловая скорость центра масс по начальной круговой орбите). На рисунке 3а показаны угловые скорости: номинальная (сплошная линия) и одного из тросов. На рисунке 3б – силы натяжения того же троса (номинальная – жирная линия). На рисунке 3в показано как изменяется угол α_1 – угол между направлением троса и продольной осью первого КА ($\alpha_1 = 0$ – невозмущенный случай). Несколько положений шестиугольника при его развёртывании приводится на рисунке 3г, где точка (0,0) – центр масс системы. Здесь следует отметить, что при отсутствии возмущений (за исключением учёта растяжимости троса) совпадение номинальных характеристик движения ТГКА и характеристик, определенных по модели (4–9), почти идеальное. В начальном момент орбита движения центра масс ТГКА круговая: высотой 500 км.

Исходные данные: массы КА – 20 кг, длина описанной окружности – 0.5 км, тяга двигателей – 6 Н, модуль начальной угловой скорости системы – $0,1 \text{ с}^{-1}$, угол $\varphi = 95$ град. (рисунок 1), длина первого активного участка – 150 с, длина пассивного участка – 650 с, длина второго активного участка – 150 с, линейная плотность тросов – 0,2 кг/км, диаметр троса – 0,6 мм, материал троса – Dyneema.

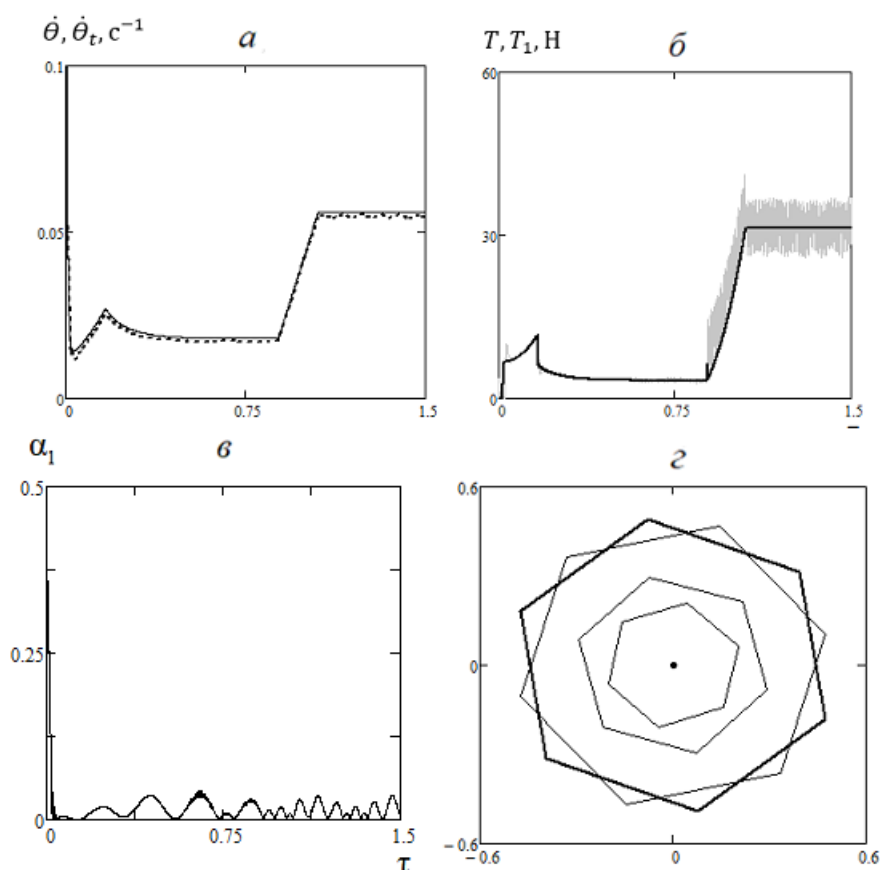


Рисунок 3 – Характерные зависимости для возмущённого движения КА ($n = 6$)

Было установлено, что при одном и том же уровне возмущений наиболее неустойчивой геометрической структурой являлся квадрат: он деформировался в ромб. В связи с этим была предложена схема с вспомогательным центральным грузом (рисунок 1) и были проведены дополнительные исследования, которые показали, что в этом случае структурная устойчивость квадратной ТГКА (свойство сохранения геометрической конфигурации системы) сохранялась. Очевидно, что этот способ повышения структурной устойчивости ТГКА может быть применен и для других многоугольников.

В **четвертой главе** рассматривается управление движением ТГКА «ступица-спицы» при её развёртывании с использованием реактивных или электромагнитных сил (для создания необходимого вращающего момента относительно центра масс всей системы).

Как показал анализ, использование реактивных сил на концевых КА для создания необходимого вращающего момента для перевода всей системы во вращение требует наличия системы стабилизации на этих КА (для обеспечения заданного направления действия реактивных сил), что существенно усложняет систему управления развертыванием ТГКА. Поэтому был предложен подход, заключающийся в том, что необходимый вращающий момент создается электромагнитными силами. Если использовать проводящие ток тросы, взаимодействующие с магнитным полем Земли, то сила Ампера всегда направлена перпендикулярно каждому участку троса, что обеспечивает

вращающий момент заданного направления. В этом случае требования к стабилизации движения концевых КА снижаются.

Для конфигурации с использованием электромагнитных сил номинальная программа включает в себя один активный участок: ток включается сразу после развертывания и отключается при достижении заданного значения угловой скорости тросов $\dot{\theta}_t$. Для обеспечения условий асимптотической устойчивости решения системы, соответствующего конечному положению тросов $l = l_{end}$, $\dot{l} = 0$, номинальное изменение сил натяжения тросов задается аналогично (10)

$$T = m l \dot{\theta}_t^2 + k_v \dot{l} + k_l (l - l_{end}), \quad (11)$$

где k_v, k_l – параметры, выбором которых обеспечиваются граничные условия движения тросов по окончании их выпуска.

Для проверки реализуемости предлагаемого способа управления движением ТГКА «ступица-спицы» при действии возмущений была построена более сложная модель движения ТГКА в геоцентрической неподвижной системе координат, аналогичная описанной выше (4–9). Однако для более точного моделирования действия распределённой нагрузки трос был представлен как множество материальных точек, связанных между собой упругими и односторонними связями. Процесс развертывания ТГКА «ступица-спицы» иллюстрируется на рисунке 5. Использовалась та же совокупность возмущений как для ТГКА «многоугольник». Для согласования угловых скоростей тросов и центрального КА было введено дополнительное управление угловым движением центрального КА с использованием его системы стабилизации. Моделирование процесса развёртывания ТГКА проводилось для экваториальной орбиты и для орбиты с наклоном 30 град.

Исходные данные: масса центрального КА 500 кг, массы концевых КА 20 кг, начальная высота круговой орбиты 500 км, конечная длина тросов 1 км, величина тока $I = 6$ А, начальная угловая скорость вращения системы в плоскости орбиты до разделения $\omega_0 = 0,1 \text{ с}^{-1}$, относительная скорость разделения центрального КА и спутников $V_r = 1,6 \text{ м/с}$, линейная плотность троса 2,8 кг/км, диаметр троса 1,2 мм, материал троса – алюминий с изоляцией. При этом время развёртывания системы при конечной угловой скорости $0,04 \text{ с}^{-1}$ составляет 12500 с.

После развёртывания системы из-за действия возмущений возникали незатухающие колебания тросов относительно их номинальных положений (тросы должны составлять между собой угол 120 град.). В связи с этим было предложено ввести дополнительное управление величиной тока на заключительном этапе развёртывания системы, когда $l_{1,2,3} / l_{end} > 0,8$. Управление предлагается осуществлять в соответствии текущей угловой скоростью тросов, которая определяется по относительному движению крайних точек тросов. Введение такого управления позволило обеспечить монотонное уменьшение амплитуд колебаний тросов относительно своих номинальных положений.

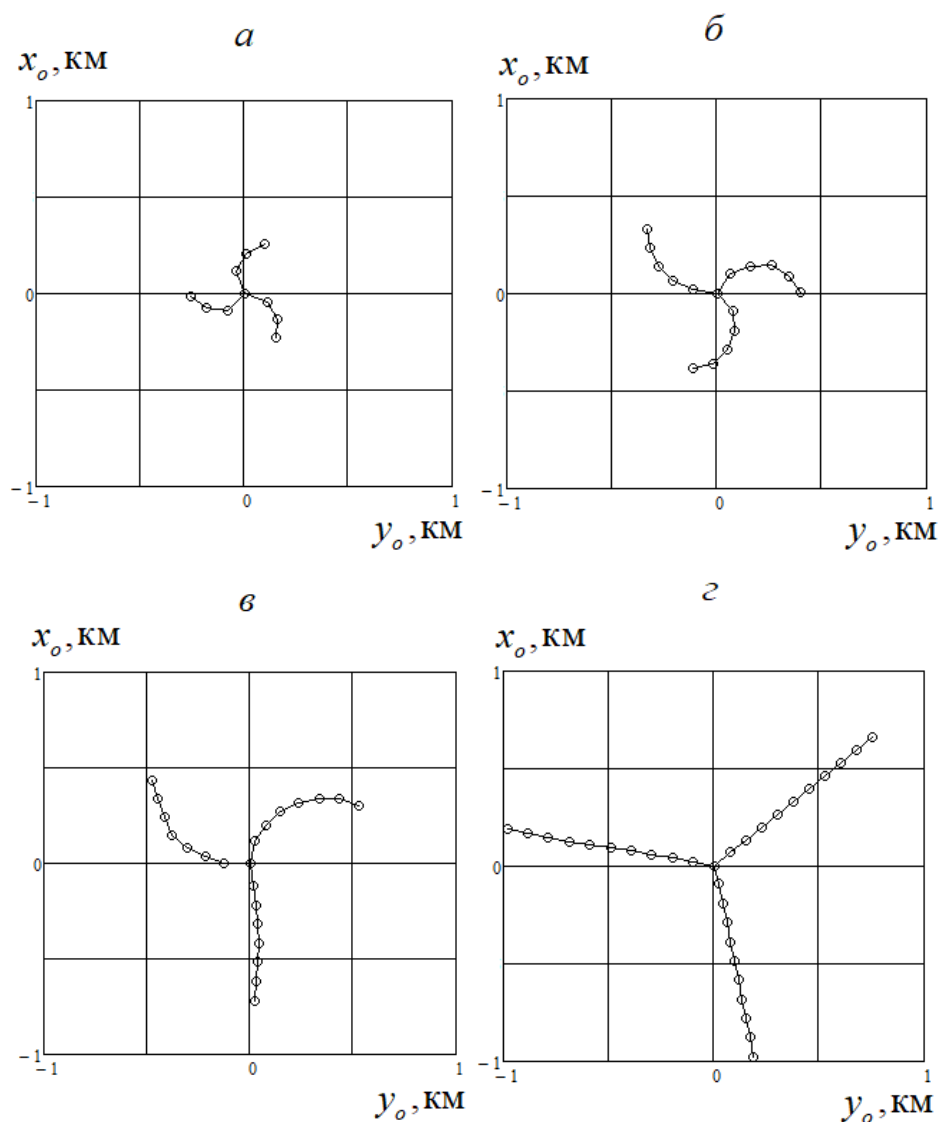


Рисунок 5 – Процесс развёртывания ТГКА «ступица-спицы»

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. С использованием уравнений Лагранжа разработаны математические модели рассматриваемых конфигураций ТГКА для построения номинального управления при их развёртывании.

2. Построены номинальные законы и программы управления развёртыванием ТГКА конфигураций «многоугольник» и «ступица-спицы», обеспечивающие заданные их конечные состояния. Разработанное номинальное управление многоугольной ТГКА универсально и в работе применяется для всех многоугольников с числом вершин от четырёх до семи.

3. Разработаны математические модели движения ТГКА рассматриваемых конфигураций для проверки возможности реализации предлагаемых номинальных законов и программ управления с учетом растяжимости тросов, движения КА относительно своих центров масс и других возмущений

4. Для выбранной совокупности действующих возмущений методом математического моделирования доказана возможность реализации построенных номинальных законов и программ управления развёртыванием ТГКА «многоугольник» и «ступица-спицы».

5. Разработаны дополнительные способы стабилизации движения ТГКА рассматриваемых конфигураций в процессе их развёртывания: введение центрального груза для квадратной ТГКА, алгоритма стабилизации для центрального КА конфигурации «ступица-спицы» с помощью реактивных двигателей, алгоритма стабилизации движения тросов с помощью изменение величины тока при использовании для управления ТГКА электромагнитных сил.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Основное содержание работы опубликовано в журналах РАН, индексируемых в RSCI, переводные версии которых входят в базы SCOPUS и Web of Science:

1. Заболотнов, Ю.М. Динамика формирования тросовой группировки космических аппаратов в виде треугольного «созвездия» / Ю.М. Заболотнов, **А.А. Назарова**, Ч. Ван, А. Ли // Космические исследования, 2022. – Т. 60. № 5. – С. 413-425 (Zabolotnov, Y.M. The Dynamics of Arranging a Spacecraft Tether Group as a Triangular Constellation / Y.M. Zabolotnov, A.A. Nazarova, C. Wang, A. Li // Cosmic Research, 2022. — Vol. 60. Issue 5. № 5. — P. 375-386).
2. Заболотнов, Ю.М. Метод формирования треугольной вращающейся тросовой группировки космических аппаратов с использованием электромагнитных сил / Ю.М. Заболотнов, **А.А. Назарова** // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления, 2022. – №4. – С.160-176 (Zabolotnov, Y.M. Method of Forming a Triangular Rotating Tethered Constellation of Spacecraft Using Electromagnetic Forces / Y.M. Zabolotnov, **A.A. Nazarova** // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2022. – Vol. 61. Issue 4. № 4. — P. 677-692).
3. Заболотнов, Ю.М. Анализ динамики и управление при развёртывании кольцевой тросовой группировки космических аппаратов/Ю.М. Заболотнов, **А.А. Назарова**, Чанцин Ван// Известия РАН. Механика твёрдого тела, 2023. – № 4. – С. 110-124 (Zabolotnov, Y.M. Analysis of Dynamics and Control During the Deployment of an Annular Tether Group of Spacecraft/ Yu.M. Zabolotnov, **A.A. Nazarova**, Changqing Wang // Mechanics of Solids, 2023. – Vol. 58. – P. 1137–1148).

в прочих изданиях:

4. **Назарова, А.А.** Метод формирования тросовой группировки космических аппаратов в виде лучевой конфигурации «ступица-спицы» / А.А. Назарова, Ю.М. Заболотнов // Advances in Science and Technology: сборник статей

- XLV международной научно-практической конференции. – Москва, 2022. – С. 85-86.
5. Заболотнов, Ю.М. Управление при развертывании тросовой группировки космических аппаратов конфигурации «квадрат» с дополнительными связями/ Ю.М. Заболотнов, **А.А. Назарова** // V Российский симпозиум по наноспутникам с международным участием «RusNanoSat-2023». — 2023. — С. 96-99.
 6. **Назарова А.А.** управление при формировании вращающейся тросовой группировки космических аппаратов конфигурации «квадрат»/ А.А. Назарова // Навигация и управление движением: материалы XXVI конференции молодых ученых с международным участием. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 364-366.
 7. Заболотнов, Ю.М. Метод формирования тросовой системы конфигурации «ступица-спицы» с использованием электромагнитных сил / Ю.М. Заболотнов, **Назарова А.А.** // Управление движением и навигация летательных аппаратов: сборник трудов XXVII Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара, 2024. – С. 15-19.
 8. **Назарова, А.А.** Комбинированный метод формирования вращающейся электродинамической космической тросовой системы / А.А. Назарова, Ю.М. Заболотнов // XVI Королёвские чтения: сборник материалов международной молодёжной научной конференции, посвящённой 60-летию полёта в космос Ю.А. Гагарина. – Самара, 2021. – С. 108-109.