

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по научной работе  
ФГБОУ ВО Московский авиационный  
институт (национальный  
исследовательский университет)  
д.т.н., профессор



Ю.А. Равикович

05 2023 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**  
**федерального государственного бюджетного образовательного**  
**учреждения высшего образования «Московский авиационный институт**  
**(национальный исследовательский университет)» (МАИ)**  
на диссертационную работу Чэнь Шумин  
«Разработка программ управления для развёртывания вращающихся тросовых  
группировок космических аппаратов», представленную на соискание ученой  
степени кандидата технических наук по специальности  
2.5.16 - Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

**Актуальность темы диссертационного исследования.**

Диссертация Чэнь Шумин посвящена исследованию динамики и управлению движением тросовых группировок космических аппаратов (ТГКА) на околоземной орбите. Подробно рассматриваются следующие конфигурации ТГКА: «треугольник» и «ступица – спицы». Основное внимание уделяется разработке программ управления при развертывании или формировании ТГКА. В своем конечном состоянии рассматриваемые ТГКА вращаются вокруг своего центра масс с некоторой угловой скоростью, которая выбирается в процессе решения задачи. Стабилизация вращением позволяет обеспечить сохранение геометрической структуры ТГКА, причем натяжение тросов обеспечивается возникающими центробежными силами инерции. Вращающиеся ТГКА могут существовать на орбите при сохранении некоторой заданной конфигурации практически без затрат топлива. В состав рассматриваемых тросовых группировок могут входить микро- или нано- спутники. Использование подобных тросовых технологий в космосе позволяет создавать на орбите протяженные и в тоже время легкие конструкции со сложной структурой, что невозможно с помощью традиционных космических средств. Такие ТГКА могут быть использованы как многоточечные распределенные измерительные космические системы для мониторинга параметров магнитного и гравитационных полей, ионосферы, как системы наблюдения за дальним и ближнем космосом, сканирования поверхности Земли с большой базой и т.д. Успешное полезное применение таких космических систем в будущем

естественно зависит от наличия надежных методов управления их движением, причем наиболее ответственным и сложным этапом с точки зрения управления является этап развертывания ТГКА. В связи с этим следует признать, что тема диссертационной работы Чэнь Шумин **актуальна.**

### **Структура диссертационной работы.**

Диссертационная работа состоит из четырех глав. **В первой главе** проводится аналитический обзор работ по ТГКА, отмечается, что рассматриваемое направление недостаточно изучено и требует дальнейшего развития, ставятся задачи исследования. **Во второй главе** разрабатываются математические модели движения рассматриваемых ТГКА с учётом действия управляющих сил. В качестве управлений используются двигатели малой тяги, расположенные на КА и силы натяжения тросов, которые регулируются с помощью специальных управляющих механизмов, обеспечивающих их выпуск. При этом используются наиболее простые механизмы, работающие только на торможение тросов. Для построения программ управления сначала используются упрощенные уравнения движения ТГКА, полученные с помощью метода Лагранжа для нерастяжимых тросов. Для проверки работоспособности построенных программ управления применяются более сложные уравнения движения ТГКА, записанные в геоцентрической неподвижной системе координат, учитывающие растяжимость тросов, односторонность механических связей (тросов), инерционность механизмов выпуска тросов и другие возмущения. **В третьей главе** разрабатываются методы управления движением ТГКА типа «треугольник» при её формировании на орбите. Предлагаются и исследуются две программы управления. Отличительной особенностью первой является релейный закон изменения реактивных сил. Во второй программе используется непрерывная программа изменения реактивных сил, позволяющая на этапе построения программы учесть некоторые ограничения на управляющие воздействия. **В четвертой главе** разрабатываются методы управления движением ТГКА типа «ступица-спицы» при её формировании. Тросовая группировка состоит из центрального КА, на который возлагаются основные функции управления, и двух периферийных микроспутников. Осуществляется построение двух программ управления: 1) на основе принципа динамического программирования Беллмана; 2) с использованием метода робастного управления. Показывается, что вторая программа является более предпочтительной, так как для нее доказывается свойство асимптотической устойчивости конечного состояния ТГКА при действии ограниченных возмущений.

### **Новизна проведенных исследований заключается в следующем.**

1. С помощью уравнений Лагранжа построены математические модели движения ТГКА конфигураций «треугольник» и «ступица – спицы», предназначенные для разработки номинальных программ развертывания

рассматриваемых космических систем, а также для получения аналитических оценок.

2. Получена номинальная программа управления силами натяжения тросов и реактивными силами (релейный закон) при развёртывании треугольной ТГКА. Найдено аналитическое решение уравнений, описывающих номинальное движение треугольной ТГКА в частном случае при отсутствии возмущений и реактивных сил.
3. Получены аналитические оценки для величины угловой скорости вращения треугольной ТГКА, необходимой для устойчивого вращения после формирования системы.
4. Разработана номинальная программа развёртывания треугольной ТГКА, основанная на движении системы по поверхности скольжения, и показано, что включение в контур управления вспомогательной динамической системы позволяет на этапе проектирования системы управления учесть заданные ограничения на управляющие воздействия.
5. Разработаны программы управления для формирования ТГКА «ступица-спицы», реализующие терминальный принцип управления по конечному состоянию системы. Нелинейный закон развёртывания ТГКА строится в соответствии с принципами робастного управления с учётом наличия ограниченных возмущений. Доказана асимптотическая устойчивость конечного состояния ТГКА в этом случае.

**Значимость результатов исследований** Чэнь Шумин для науки в основном заключается в детальном исследовании процессов формирования ТГКА конфигураций «треугольник» и «ступица – спицы» и в разработке и обосновании применения полученных программ развёртывания рассматриваемых ТГКА. Методы управления и программы моделирования движения ТГКА могут служить основой для разработки и проектирования будущих космических миссий, связанных с использованием тросовых систем в космосе, что определяет значимость диссертационного исследования для практики.

**Достоверность полученных результатов.** Научные результаты диссертации получены с помощью известных классических подходов и методов механики, математики, теории управления, численных методов и основываются на подробном параметрическом анализе предлагаемых методов управления. Полученные численные результаты не противоречат известным работам в этом направлении. Особенностью диссертационного исследования Чэнь Шумин является то, что в отличие от известных работ задачи решаются в более полной постановке, например, для треугольной группировки КА рассматриваются не как материальные точки, а как твёрдые тела конечных размеров, совершающие колебания относительно направления тросов, а для ТГКА «ступица-спицы» учитывается движение центрального КА относительно центра масс. Это повышает

достоверность проведенных исследований, сформулированных выводов и рекомендаций.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе Чэнь Шумин, прошли апробацию на всероссийских и международных научных конференциях, достаточно опубликованы в 11 работах, в том числе в 3-х статьях в журналах, входящих в список ВАК, и в 6-и статьях в изданиях, индексируемых в базах Scopus, Web of Science.

**Соответствие автореферата диссертационной работе.** Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, правильно отражает основные положения и выводы диссертационной работы.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. При проверке реализуемости предложенной номинальной программы развертывания треугольной ТГКА с использованием уравнений движения, записанных в неподвижной геоцентрической системе координат, не учитываются отличие гравитационного поля Земли от центрального и возможные ошибки реализации алгоритмов управления при регулировании сил натяжения тросов.

2. Не произведена оценка возможности допущения, что масса тросов мала и ее можно не учитывать.

3. При исследовании процесса развертывания ТГКА конфигурации «ступица – спицы» не рассмотрены возможные ошибки при разделении КА, которые могут привести к сложному пространственному движению ТГКА при ее формировании.

4. Не произведен учет углового движения периферийных спутников в конфигурации «ступица – спицы».

5. Не совсем корректно использован термин «невесомые» для тросов ТГКА (п. 2.2, с. 39).

6. В диссертации имеются опечатки, стилистические ошибки (см., например, с. 5, 58, 138 и др.).

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

**Заключение.** Диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему и выполнена автором на высоком научном уровне. Проведенные научные исследования можно характеризовать как научно обоснованные технические разработки, обеспечивающие решение важных прикладных задач в области динамики движения тросовых группировок космических аппаратов. Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

По актуальности, новизне, объему, научной и практической ценности проведенных исследований диссертация отвечает требованиям Положения о

порядке присуждения ученых степеней ВАК, а ее автор Чэнь Шумин заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16 - Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Отзыв составили:

профессор кафедры «Системы автоматического  
и интеллектуального управления» МАИ,  
д.т.н., профессор



В.И. Бусурин

доцент кафедры «Системы автоматического  
и интеллектуального управления» МАИ,  
к.т.н.



Н.А. Макаренкова

Диссертационная работа Чэнь Шумин рассмотрена и обсуждена на заседании кафедры 301 «Системы автоматического и интеллектуального управления» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» «22» мая 2023 года, протокол № 11.

Зав. кафедрой 301 МАИ, д.т.н.,  
профессор, академик РАН



С.Ю. Желтов

Уч. секретарь кафедры, к.т.н.



Н.А. Макаренкова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Адрес организации: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Сайт организации: <https://mai.ru>

e-mail: [mai@mai.ru](mailto:mai@mai.ru)

Телефон: 8(499)158 5862.

Факс: 8-(499)-158-29-77.