

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий  
институт

Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.Е. Косенко  
подпись          инициалы, фамилия  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Методика определения проектных требований к тросовым системам для  
управления орбитальным движением космического аппарата»  
тема

27.04.03 «Системный анализ и управление»  
код и наименование направления

27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»  
код и наименование магистерской программы

Руководитель	_____	профессор МБК ПФиКТ, д-р техн.наук	_____
	подпись, дата	должность, ученая степень	<u>В.Е. Чеботарев</u> инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>А.В. Колмаков</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата		
Рецензент	_____	начальник лаборатории системы ориентации и стабилизации цеха 038 АО «РЕШЕТНЁВ»	_____
	подпись, дата	должность, ученая степень	<u>А.И. Пилигрим</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____	профессор МБК ПФиКТ, д-р техн.наук	_____
	подпись, дата	должность, ученая степень	<u>В.Е. Чеботарев</u> инициалы, фамилия

Красноярск 2023

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий  
институт

Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.Е. Косенко  
подпись                      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**в форме магистерской диссертации**

Красноярск 2023

Студенту Колмакову Александру Владимировичу  
фамилия, имя, отчество

Группа КИ21-03-6М Направление (специальность) 27.04.03  
номер код

«Системный анализ и управление»  
полное наименование

Тема выпускной квалификационной работы Методика определения проектных требований к тросовым системам для управления орбитальным движением космического аппарата

Утверждена приказом по университету № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Руководитель ВКР Виктор Евдокимович Чеботарев, профессор кафедры, доцент, д-р техн. наук, «Прикладная физика и космические технологии», СФУ

Исходные данные для ВКР в рамках ВКР разрабатывается методика определения проектных требований к тросовым системам для управления орбитальным движением космического аппарата.

Перечень разделов ВКР введение; обзор существующих решений; математическая модель движения космической тросовой системы; математический эксперимент; заключение.

Перечень графического материала презентация PowerPoint, раздаточный материал.

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_  
подпись

В.Е. Чеботарев  
инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_  
подпись, инициалы и фамилия студента

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Методика определения проектных требований к тросовым системам для управления орбитальным движением космического аппарата» содержит 113 страниц текстового документа, 30 использованных источников.

КОСМИЧЕСКИЕ ТРОСОВЫЕ СИСТЕМЫ, СЕРВИСНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ, ПАССИВНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, ТРОС, ЦЕНТР МАСС.

Целью диссертационного исследования является разработка методики определения проектных требований к тросовым системам для управления орбитальным движением космического аппарата.

Задачи диссертационного исследования

- проанализировать функциональные характеристики и принципы применения тросовых систем в системе коррекции космического аппарата;
- разработать математическую модель космических тросовых систем для управления орбитальным движением космического аппарата;
- экспериментально подтвердить эффективность применения тросовой системы в системе коррекции КА и определить её проектные требования.

В итоге была разработана методика определения проектных требований к тросовым системам для управления орбитальным движением космического аппарата по результатам которой для разных диаметров, длин тросов и масс груза были рассчитаны проектные параметры космической тросовой системы.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	6
1 Обзор существующих решений .....	8
1.1 Проблема сервисного обслуживания космического аппарата .....	8
1.2 Реактивные двигатели .....	9
1.3 Космические тросовые системы .....	35
1.4 Выводы по главе .....	54
2 Модель космической тросовой системы .....	56
2.1 Сервисное обслуживание космического аппарата .....	56
2.2 Функционирование космической тросовой системы .....	57
2.3 Уравнение относительного движения .....	60
2.4 Математическая модель космической тросовой системы .....	62
2.5 Выводы по главе .....	71
3 Математический эксперимент .....	73
3.1 Изменение координаты центра масс активного космического аппарата ..	73
3.2 Движение активного космического аппарата .....	76
3.3 Движение активного космического аппарата при разной массе груза тросовых систем .....	80
3.4 Движение активного космического аппарата с разной массой троса .....	90
3.5 Размеры космической тросовой системы .....	101
3.6 Выводы по главе .....	106
Заключение .....	107
Список сокращений .....	109
Список использованных источников .....	110

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность работы.* Масса топлива, используемого для работы системы коррекции, может составлять до 50% от массы КА, при этом само топливо является невозобновляемым ресурсом, и величина его запаса определяет срок активного существования КА. Кроме того, предельная масса КА ограничена, во-первых, энергетическими возможностями средств выведения и, во-вторых, высокой стоимостью средств выведения тяжёлого класса. В связи с этим, использование тросовых систем в качестве бестопливного элемента системы коррекции позволяет увеличить расчётный срок активного существования КА при той же массе системы коррекции.

*Целью* диссертационного исследования является разработка методики определения проектных требований к тросовым системам для управления орбитальным движением космического аппарата.

*Задачи* диссертационного исследования:

- проанализировать функциональные характеристики и принципы применения тросовых систем в системе коррекции космического аппарата;
- разработать математическую модель космических тросовых систем для управления орбитальным движением космического аппарата;
- экспериментально подтвердить эффективность применения тросовой системы в системе коррекции КА и определить её проектные требования.

*Объектом* исследования являются космические тросовые системы как элемент системы коррекции космического аппарата.

*Предметом* исследования являются технические характеристики тросовых систем, используемых для изменения параметров орбиты КА.

*Гипотеза* исследования заключается в том, что тросовые системы возможно использовать для управления орбитальным движением космического аппарата, в частности, сближением двух КА на орбите.

При написании диссертации использовались расчетно-аналитический и конструктивный *методы*, а также законы относительного орбитального движения КА.

*Практическая значимость* диссертационного исследования состоит в повышении точности управления орбитальным движением КА при сближении с другим КА на орбите.

*Научная новизна* диссертационной работы заключается в новой методике определения проектных требований к тросовым системам для управления орбитальным движением КА.

[изъято 1-3 главы, страницы 8-106, в соответствии с заявлением: Приложение Б к ВКР].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном диссертационном исследовании решены следующие задачи:

- проанализированы функциональные характеристики и принципы применения тросовых систем в системе коррекции космического аппарата, по результатам которого в основу диссертационного исследования легли динамические тросовые системы;

- разработана математическая модель космической тросовой системы для управления орбитальным движением космического аппарата на основании модели Клохесси-Уилтшира, которая описывает движение спутников (один из которых является преследуемым, а другой – целью);

- экспериментально подтверждена эффективность тросовой системы при сервисном обслуживании и определены её проектные требования. По результатам эксперимента расчеты показали, что габариты катушек вписываются в габаритные размеры космического аппарата, следовательно, данные проектные требования позволяют применять КТС на космических аппаратах.

Решение задач обусловило выполнение цели диссертационного исследования: разработана методика определения проектных требований к тросовым системам для управления орбитальным движением космического аппарата, которая заключается в следующем:

- определяется математическая модель;
- определяются проектные и временные ограничения;
- по параметрам и ограничениям определяются габаритно-массовые характеристики космической тросовой системы (КТС).

В ходе достижения цели исследования была подтверждена гипотеза: тросовые системы возможно использовать для управления орбитальным движением космического аппарата.

Перспективы развития исследований, проведенных в диссертации, заключаются в следующем:

– необходимо разработать метод регулирования скорости размотки троса КТС, который позволит изменять параметры скорости сближения космических аппаратов при сервисном обслуживании;

– необходимо учесть изменение координаты и скорости по оси, направленной вдоль вектора радиуса пассивного космического аппарата;

– необходимо провести исследования с учетом, того что перемещение груза КТС возможно и по оси  $x$ , направленной вдоль вектора радиуса пассивного космического аппарата.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АКА	– активный космический аппарат;
ГРК	– газоразрядная камера;
ДАС	– двигатель с анодным слоем;
ЖРДМТ	– жидкостной реактивный двигатель малой тяги;
ИД	– ионный двигатель;
КА	– космический аппарат;
КТС	– космическая тросовая система;
ОСК	– орбитальная система координат;
ПКА	– пассивный космический аппарат;
СК	– система коррекции;
СКА	– сервисный космический аппарат;
СПД	– стационарный плазменный двигатель;
ТХД	– торцевой холловский двигатель;
ЭДД	– электродуговой двигатель;
ЭДТС	– электродинамическая тросовая система;
ЭНД	– электронагревной двигатель;
ЭРД	– электрореактивный двигатель;
ЭСД	– электростатический двигатель.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Каткалов, В. Б. Обслуживаемый космос. новые достижения и перспективы / В. Б. Каткалов, М. Л. Морозова // Космические аппараты и технологии. Красноярск, 2022. – Т. 6. – №3 – С. 206-217
- 2 Беляев, Н. М. Реактивные системы управления космических летательных аппаратов : учебное пособие / Н. М. Беляев, Н. П. Белик, Е. И. Уваров. — Москва : Машиностроение, 1979. — 232 с.
- 3 Беляев, Н. М. Расчет и проектирование реактивных систем управления космических летательных аппаратов : учебное пособие / Н. М. Беляев, Е. И. Уваров. — Москва : Машиностроение, 1974.- 200с.
- 4 Алемасов, В. Е. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов вузов / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегаллин, А. П. Тишин; под редакцией В.П. Глушко. – Москва : Машиностроение, 1989.– 464 с.
- 5 Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: учебник для студентов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» : учебное пособие / Г. Г. Гахун, В. И. Баулин, В. А. Володин [и др.] ; Под общей редакцией Г. Г. Гахуна. – Москва : Машиностроение, 1989.– 424 с.
- 6 Егорычев, В. С. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги и их характеристики: учебное пособие : учебное пособие / В. С. Егорычев, А. В. Сулинов. – Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2014. – 126 с.
- 7 Горшков, О. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов : учебное пособие / О. А. Горшков, В. А. Муравлев, А. А. Шагайда. – Москва : Машиностроение, 2008. – 280 с. ISBN 978-5-217-034406
- 8 Волшенюк, О. Л. Космические тросовые системы – перспективное направление космической техники и технологии / О. Л. Волшенюк, А. В. Пироженко, Д. А. Храмов // Космическая наука и технология. –

Днепропетровск: Институт технической механики Национальной академии наук Украины. – 2011. – С. 32-44.

9 Орлов, А. Л. Основные проблемы управления тросовой системой в космосе / А.Л. Орлов, В.И. Лобачев // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2012. № 6. С. 9-13.

10 Динамика космических систем с тросовыми и шарнирными соединениями / А.П. Алпатов, В. В. Белецкий, В. И. Драновский [и др.] // Регулярная и хаотическая динамика, институт компьютерных исследований. – Москва-Ижевск. – 2007. – 560 с.

11 Белецкий, В. В. Динамика космических тросовых систем : учебное пособие / В. В. Белецкий, Е. М. Левин. – Москва : Наука, 1990. – 329 с.

12 Канадское космическое агентство: сайт официальный сайт: – URL: [http://www.asc-csa.gc.ca/images/recherche/images/90\\_hr.jpg](http://www.asc-csa.gc.ca/images/recherche/images/90_hr.jpg) (дата обращения 03.04.2022).

13 Проект YES2 : официальный сайт. Режим доступа свободный: URL: <http://www.yes2.info> (дата обращения 03.04.2022).

14 Ермаков, Д. Н. Исторические аспекты построения оптимального алгоритма управления сближением двух спутников с использованием непрерывной малой тяги / Д.Н. Ермаков, А. П. Оливио // Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Чебоксары, 2021. – С. 92-102.

15 Маштаков, Я.В. Построение некоторых опорных относительных орбит для тетраэдральной конфигурации спутниковой связи / Я.В. Маштаков, С.А. Шестаков // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыш. – 2017. – №84. – 26 с. doi: 10.20948

16 Колмаков, А.В. Применение космической тросовой системы при обслуживании пассивного космического аппарата / А.В. Колмаков, А. А. Внуков // Материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-

космических систем академика М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2022.  
– С. 27-29.

17 Levin, Eugene, Dynamic Analysis of Space Tether Missions, Advances in the Astronautical Sciences, Vol. 126, Univelt Inc., San Diego, California, 2007.

18 Lorenzini, E.C. Tethers in Space Handbook / E.C. Lorenzini, M.L. Cosmo. – 3rd edition. – Smithsonian Astrophysical Observatory, 1997. – 241 p.

19 Inarrea M. Attitude stabilization of electrodynamic tethers in elliptic orbits by time-delay feedback control / M. Iñarrea, V. Lanchares, A.I. Pascual, J.P. Salas // Acta Astronautica. – 2014. – Vol. 96. – P. 280–295.

20 Corsi J. Stability and control of electrodynamic tethers for de-orbiting applications (Conference Paper) / J. Corsi, L. Less // Acta Astronautica. – 2001. – Vol. 48. – Issue 5-12. – P. 491-501.

21 Hoyt, R. P. Remediation of radiation belts using electrostatic tether structures / R.P. Hoyt, B. M. Minor // Aerospace Conf., – 2005 IEEE. Big Sky, MT, pp. 583-594.

22 Hoyt, R. P. Cislunar tether transport system / Robert P. Hoyt, Chancey Uphoff // AIAA-99-2690, pp. 1-15.

23 Forward, R. L. Mars-Earth rapid interplanetary tether transport (MERIT) system: I. Initial feasibility analysis / Robert L. Forward, Gerald D. Nordley // AIAA-99-2151, pp. 1-18.

24 Hoyt, R. P. The Terminator Tape: A cost-effective de-orbit module for end-of-life disposal of LEO satellites / Hoyt, R. P., et al. // AIAA Space 2009 Conference and Exposition, September 14, 2009 -September 17, pp. 1 - 9.

25 Cosmo, M. L. Tethers in space handbook / M.L. Cosmo, E. C. Lorenzini. // Third edition. – December, 1997, pp. 1-274.

26 Tyc, G. On the Dynamics of Spinning Tethered Space Vehicles / Tyc, G. and Ray P.S. Han // Philosophical Transactions: Mathematical, Physical & Engineering Sciences of the Royal Society, 359, 2161-2190, –2001.

27 Kruijff, M. Qualification and in-flight demonstration of a European tether deployment and momentum transfer system on YES2 / M. Kruijff, E. Heide, M. Stelze

// Proceedings of the IAA symposium on small satellites system and services, Rhodes, Greece, 26-30 May 2008, pp. 1-17.

28 Kruijff, M. Applicability of tether deployment simulation and tests based on YES 2 flight data / M. Kruijff. AIAA -2008-7036, pp. 1-24.

29 Williams, P. YES2 optimal trajectories in presence of eccentricity and aerodynamic drag / P. Williams, A.Hyslop, M. Stelzer, M. Kruijff // IAC -06-02.3.04, Valencia, 2006 and Acta Astronautica. Volume 64, issue 7 – 8, april-may 2009, pp. 745 – 769.

30 Clohessy, W. H. Terminal guidance system for satellite meeting / W. H. Clohessy, R. S. Wiltshire // J. AerospaceSci., 27 (9), 1960, pp. 653–658.

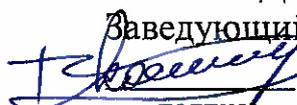
Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий  
институт

Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

  
В.Е. Косенко  
подпись инициалы, фамилия  
« 13 » 06 2023 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

«Методика определения проектных требований к тросовым системам для  
управления орбитальным движением космического аппарата»  
тема

27.04.03 «Системный анализ и управление»  
код и наименование направления

27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»  
код и наименование магистерской программы

Руководитель

  
13.06.23  
подпись, дата

профессор МБК ПФиКТ,  
д-р техн.наук  
должность, ученая степень

В.Е. Чеботарев  
инициалы, фамилия

Выпускник

  
13.06.23  
подпись, дата

А.В. Колмаков  
инициалы, фамилия

Рецензент

  
13.06.23  
подпись, дата

начальник лаборатории  
системы ориентации и  
стабилизации цеха 038  
АО «РЕШЕТНЁВ»  
должность, ученая степень

А.И. Пилигрим  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

  
09.06.23  
подпись, дата

профессор МБК ПФиКТ,  
д-р техн.наук  
должность, ученая степень

В.Е. Чеботарев  
инициалы, фамилия

Красноярск 2023