

Пикалов Руслан Сергеевич

**ДИНАМИКА СБЛИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО БУКСИРА
С КРУПНОГАБАРИТНЫМИ ОБЪЕКТАМИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА**

1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

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

Научный руководитель:

Асланов Владимир Степанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева».

Официальные оппоненты:

Купреев Сергей Алексеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механики и процессов управления инженерной академии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы».

Филатьев Александр Сергеевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник факультета космических исследований федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград.

Защита состоится 18 сентября 2026 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.10, 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» ссылка: https://ssau.ru/storage/pages/6963/file_6a1e8a00268543.95616055.pdf.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

д.т.н., доцент А.С. Виноградов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время проблема загрязнённости околоземного космического пространства является одной из важных задач современной космонавтики. Из года в год наблюдается устойчивый рост объектов космического мусора. В своём предельном состоянии он способен привести к так называемому синдрому Кesslera – неконтролируемому росту числа объектов мусора на орбите, способному в конечном итоге сделать околоземное космическое пространство полностью непригодным для практического использования.

Одним из вариантов решения этой проблемы может стать использования космических буксиров, оснащенных системами захвата крупногабаритного космического мусора на основе тросовых систем. Важным этапом миссии по уводу космического мусора является осуществление сближения космического буксира с космическим мусором посредством свёртывания троса. В связи с чем поиск и разработка законов управления свёртыванием троса, обеспечивающих сближение с космическим мусором, является актуальной научной задачей, требующей решения. Важным условием для реализации управления является обеспечение безударного сближения, так как соударение в космосе может привести к разрушению сближаемых объектов и образованию новых элементов космического мусора. Дополнительно необходимо создать и проработать облик механизма способного реализовать предлагаемые в исследовании законы управления.

Исследуемая в диссертационной работе проблема заключается в поиске и разработке законов управления свёртыванием троса, позволяющих осуществить требуемый манёвр сближения. В дополнение необходимо изучить динамику системы «космический буксир – космический мусор» в процессе свёртывания для понимания возможных возникающих в этом процессе ситуаций. Рассмотрены задачи управления угловым движением связки и выравнивания орбитальных скоростей буксира и космического мусора до начала этапа сближения. Дополнительно была поставлена задача рассмотрения возможности разработки закона управления свёртыванием троса в случае движения связки по эллиптическим орбитам. Актуальность данной задачи заключается в том, что большая часть объектов космического мусора движется по эллиптическим орбитам.

В качестве целевого объекта увода рассмотрены орбитальные ступени «Космос-3М», которых на 2026 год на орбите находится порядка 300 единиц. Предлагаемые методы применимы к похожим по массово-инерционным характеристикам верхним ступеням ракет-носителей (РН) семейства «Ариан». В качестве космического буксира рассмотрен разгонный блок «Волга», выполнивший основную миссию и сохранивший на борту запас топлива. Рассматривается плоское движение системы, состоящей из активного и пассивного аппаратов и троса, соединяющего их в единую связку. Способы и реализация закрепления троса, как и задача последующей утилизации захваченного объекта, остаются за рамками диссертации.

Степень разработанности темы. Анализ научно-технической литературы показал, что в настоящее время выполнено значительное количество исследований, посвящённых моделированию динамики космических тросовых систем в задачах увода космического мусора. Большой вклад в этой области внесли отечественные и зарубежные ученые: Трушляков В.И., Заболотнов Ю.М., Купреев С.А., Филатьев А.С., Асланов В.С., Ледков А.С., Юдинцев В.В., Williams P., Shaub H., Zhang X., Huang Y., Chen X., Shan M.

Следует упомянуть работы таких исследователей, как Черноусько Ф.Л., Калашников Л.М, Zhong R., Chen Y., Huang P., рассмотревших различные задачи по свёртыванию и управлению длиной троса. Несмотря на то, что вопрос разработки законов управления свёртыванием и развёртыванием космической тросовой системой довольно хорошо проработан, слабоизученным остаётся вопрос применения данного подхода в задачах по уводу крупногабаритного космического мусора и, в частности, осуществления свёртывания на эллиптических орбитах.

Вместе с тем необходимо отметить, что полученные к настоящему времени результаты предшественников не включали конкретных технических систем управления длиной и натяжением троса посредством механизма лебёдки и не касались вопросов возможности реализации этих законов с учётом достижимости технических требований к данному механизму. Поэтому в настоящей диссертации решаются технические задачи по поиску новых законов управления длиной троса и синтезу технических требований к механизму лебёдки.

Цель диссертационной работы: разработка математической модели, синтез законов управления и выработка технических требований и рекомендаций для системы захвата и безударного сближения с крупногабаритными объектами космического мусора на базе космического буксира с механизмом лебёдки.

Задачи исследования:

1. Разработать математические модели, описывающие движение системы «буксир-космический мусор» на этапе сближения.
2. Сформировать закон управления длиной троса, обеспечивающий безударное сближение космического буксира и объекта космического мусора.
3. Исследовать динамику системы «буксир-космический мусор» при выполнении манёвра сближения путем свёртывания троса.
4. Провести анализ результатов численного моделирования динамики рассматриваемой системы во время сближения.
5. Разработать схему механизма управления длиной троса и определить для неё технические требования и рекомендации.

Объект исследования: процесс сближения космического буксира с неуправляемым объектом космического мусора.

Предмет исследования: модель процесса свёртывания троса.

Положения, выносимые на защиту:

1. Нелинейный закон управления длиной троса, позволяющий осуществлять безударное сближение космического буксира с объектом космического мусора.
2. Закон управления длиной троса, решающий задачу выравнивания орбитальных параметров космического буксира и космического мусора до начала сближения.
3. Закон управления длиной троса, обеспечивающий сближение буксира с космическим мусором на эллиптических орбитах с выключенными двигателями буксира.
4. Функциональная зависимость для параметров системы «буксир-космический мусор», обеспечивающая отсутствие углового движения связки вокруг собственного центра масс в процессе выполнения транспортной операции.
5. Предложены схема и состав устройства управления длиной троса – лебёдки, обеспечивающей свёртывание троса по полученным законам управления. Определены технические требования и рекомендации к механизму лебёдки.

Методы исследования: в диссертационной работе применялись следующие классические методы теоретической механики: основные теоремы динамики, уравнения Лагранжа, теорема об изменении кинетического момента, принцип Даламбера, теорема Ляпунова об устойчивости по первому приближению и численные методы решения дифференциальных уравнений.

Научная новизна: в диссертационной работе получены следующие новые результаты:

1. Предложен нелинейный закон управления длиной троса, обеспечивающий управляемый процесс безударного сближения космического буксира с объектом космического мусора на круговых орбитах.
2. Получен закон управления длиной троса, обеспечивающий выравнивание орбитальных параметров космического буксира и космического мусора до начала сближения.
3. Разработан закон управления, обеспечивающий процесс свёртывания троса на эллиптических орбитах в отсутствие тяги двигателей буксира.
4. Получена функциональная зависимость для параметров системы «буксир-космический мусор», обеспечивающая отсутствие углового движения связки вокруг собственного центра масс в процессе выполнения транспортной операции.

Научная и практическая значимость. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы при подготовке миссий по активной уборке космического мусора с использованием тросовых систем и выполнении операций по свёртыванию троса.

Достоверность результатов обеспечивается корректностью физической и математической постановки задач исследования, применением апробированных аналитических и численных методов моделирования и анализа.

Личный вклад: Все результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 18 работ. В том числе 2 статьи опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК России, и 9 статей – в научных изданиях, индексируемых базой Scopus.

Основные положения работы докладывались на Международной молодёжной конференции «XIV Королёвские чтения» (г. Самара, 2017 г.), IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (DyCoSS) (г. Москва, 2017 г.), на XX и XXII Всероссийском семинаре по управлению движением и навигации летательных аппаратов (г. Самара, 2017, 2019 г.), II International scientific conference «Mechanical Science and Technology Update» (г. Омск, 2018 г.), IV-M International Conference on

Information Technology and Nanotechnology (г. Самара, 2018-2019 гг.), XXVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (г. Москва, 2019 г.), 51 Школке-конференции «Актуальные проблемы механики» (г. Великий Новгород, 2024 г.), XLIX Академических чтениях по космонавтике «Королёвские чтения» (г. Москва, 2025 г.).

Получен акт о возможности использования результатов диссертационных исследований в деятельности АО «РКЦ «Прогресс»» от 21.04.2026 г. Результаты диссертационного исследования включены в курс «Физико-механический практикум» направления подготовки 01.03.03 «Механика и математическое моделирование (Анализ и компьютерное моделирование аэрокосмических систем)». (акт о внедрении в учебный процесс от 21.03.2024 г.)

Диссертационная работа **соответствует паспорту специальности (ПС) 1.1.7 - «Теоретическая механика, динамика машин»**. Результаты работы соответствуют следующим пунктам паспорта специальности: п.1. Классическая механика и аналитическая динамика; п.2. Теория устойчивости движения. Прикладные проблемы устойчивости равновесия и движения механических систем; п.5. Управление движением, наблюдаемость и идентификация механических систем; п.10. Динамика летательных аппаратов и космических конструкций.

Объём диссертационной работы составляет 143 страницы. Включает в себя 85 рисунков и 12 таблиц. Список литературы содержит 145 наименований. Диссертационная работа имеет следующую **структуру**: введение, шесть глав, заключение и список используемой литературы.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность и практическая значимость работы, раскрыта актуальность темы, степень её разработанности и методы исследования. Приведена научная новизна и практическая значимость. Указан список публикаций и апробаций работы.

В **первой главе** рассмотрено современное состояние проблемы увода космического мусора. Приведена международная классификация космического мусора, разделяющая объекты по величине поперечного размера. Описаны возможные последствия столкновения и уровень опасности каждой из групп. Рассмотрены контактные и бесконтактные способы увода космического мусора, существующие и разрабатываемые на сегодняшний день. Изложена концепция увода крупногабаритных объектов мусора типа орбитальная ступень, основанная на создании жёсткой связки космический буксир - космический мусор при помощи троса.

Во **второй главе** рассмотрена задача поиска закона управления длиной троса, способного обеспечить управляемый процесс безударного сближения космического буксира с объектом космического мусора на круговых орбитах. Для вывода закона управления использована одномерная модель системы буксир - космический мусор в бессилом поле без учёта гравитационных сил и других возмущений. Космический буксир и космический мусор (рисунок 1) рассмотрены как материальные точки массой m_1 и m_2 соответственно. Между собой точки соединены невесомым неупругим тросом, имеющим в начальный момент времени длину l_0 . Положение космического буксира и космического мусора определено координатами x_1 и x_2 соответственно. На буксир действует сила тяги его двигателей F и сила натяжения троса T , на космический мусор – сила натяжения T , посредством которой осуществляется сближение мусора с буксиром. Движение системы описывается уравнениями:

$$\ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1}(F - T), \quad \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2}T. \quad (1)$$

Вводя величину $l = x_1 - x_2$ – текущую длину троса, перепишем уравнения движения в виде:

$$\ddot{l} = \frac{1}{m_1}(F - T) - \frac{1}{m_2}T. \quad (2)$$

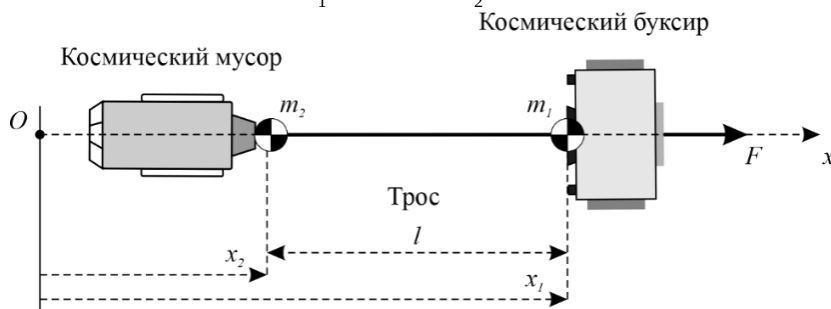


Рисунок 1 - Схема системы космический буксир - космический мусор в одномерном случае

Для выполнения условия безударного сближения введено условие:

$$l \neq 0, \forall t \neq t_k, \quad (3)$$

где t_k - время выполнения манёвра сближения. Для выполнения этого условия величина l должна удовлетворять граничным условиям:

$$t = 0: \dot{l} = 0, l = l_0; \quad t = t_k: \dot{l} = 0, l = 0, \quad (4)$$

Введём нелинейный закон управления длиной троса в форме тригонометрического ряда, удовлетворяющий условиям (3) и (4):

$$L = \frac{l_0}{2} \left(1 + \sum_{i=0}^n a_{2i+1} \cos[(2i+1)\omega t] \right), \quad (5)$$

где $\omega = \pi/t_k$. Коэффициенты разложения a_{2n+1} должны удовлетворять условию $\sum_{i=1}^n a_{2i+1} = 1$. Таким образом предложен нелинейный закон управления длиной троса, обеспечивающий управляемый процесс безударного сближения космического буксира с объектом космического мусора на круговых орбитах. Безударность сближения обеспечивается непрерывностью и гладкостью функции (5) и её производных.

С учётом закона (5) уравнения движения примут вид:

$$\ddot{l} = \frac{1}{m_1}(F - T) - \frac{1}{m_2}T = -\frac{l_0\omega^2}{2} \left(\sum_{i=0}^n a_{2i+1} (2i+1)^2 \cos[(2i+1)\omega t] \right). \quad (6)$$

Из (6) получим формулу определяющую силу натяжения троса:

$$T = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \left(\frac{l_0\omega^2}{2} \left(\sum_{i=0}^n a_{2i+1} (2i+1)^2 \cos[(2i+1)\omega t] \right) + \frac{F}{m_1} \right). \quad (7)$$

Сила T , определяемая формулой (7), обеспечивает сближение мусора с буксиром таким образом, что текущая длина троса l удовлетворяет введённым граничным условиям.

Подставим закон (7) в систему (1), получим окончательный вид уравнений, описывающих динамику системы буксир – космический мусор при свёртывании троса:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{F}{m_1 + m_2} - \frac{M_2 l_0 \omega^2}{2} \sum_{i=0}^n a_{2i+1} (2i+1)^2 \cos[(2i+1)\omega t], \\ \ddot{x}_2 = \frac{F}{m_1 + m_2} + \frac{M_1 l_0 \omega^2}{2} \sum_{i=0}^n a_{2i+1} (2i+1)^2 \cos[(2i+1)\omega t], \end{cases} \quad (8)$$

где $M_1 = m_1/(m_1 + m_2)$ и $M_2 = m_2/(m_1 + m_2)$ - относительные массы космического буксира и космического мусора соответственно.

Результаты численного моделирования движения системы буксир – космический мусор во время свёртывания показали, что введённый закон управления (5) осуществляет безударное сближение космического буксира и космического мусора. При этом достаточно использовать $n = 0$ и коэффициент $a_1 = 1$, то есть достаточно одного члена ряда в формуле (5).

В **третьей главе** исследовано управляемое движение связки буксир – космический мусор в случае плоского орбитального движения по круговой орбите. Свёртывание троса осуществляется по закону, предложенному во второй главе.

Рассмотрено плоское относительное орбитальное движение системы буксир – космический мусор. Центр масс системы O движется по круговой орбите радиуса r с постоянной угловой скоростью ω_O (вектор угловой скорости имеет вид $\omega = \{0, 0, \omega_0\}$). Использована система координат $Oxyz$ (рисунок 2а): ось Ox направлена по касательной к орбите точки O , Oy – к центру Земли, Oz дополняет систему до правой тройки векторов. Вектор $\mathbf{r} = \{0, -r, 0\}^T$ определяет положение центра масс системы относительно центра Земли. Космический буксир и космический мусор моделируются как материальные точки: S_1 и S_2 , массами m_1 и m_2 соответственно, соединённые между собой вязкоупругим натянутым тросом длиной l_0 . Положение точек S_1 и S_2 в системе координат $Oxyz$ определяется радиус-векторами $\mathbf{p}_1 = \{x_1, y_1, 0\}^T$ и $\mathbf{p}_2 = \{x_2, y_2, 0\}^T$ соответственно. На точку S_1 действует постоянная сила F - тяга двигателей космического буксира, направленная вдоль линии S_2S_1 , и сила натяжения вязкоупругого

троса T_t . На точку S_2 действует сила натяжения вязкоупругого троса T_t . Система буксир–космический мусор движется в центральном гравитационном поле Земли, влияния других внешних сил (гравитационные возмущения небесных тел и т.п.) не учитываются. Вектор $\Delta = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = \{x_1 - x_2, y_1 - y_2, 0\}^T = \{\Delta_x, \Delta_y, 0\}^T$ определяет расстояние между точками S_1 и S_2 . Уравнения орбитального движения рассматриваемой системы (В.В. Добранравов, «Курс теоретической механики», 1966) имеют вид:

$$\ddot{\Delta} = -3\omega_o^2 \frac{\Delta_y}{r} \mathbf{r} - \omega_o^2 \Delta - 2(\omega_o \times \dot{\Delta}) + \left(\frac{\mathbf{f}_1}{m_1} - \frac{\mathbf{f}_2}{m_2} \right). \quad (9)$$

Силы взаимодействия космического буксира и космического мусора между собой $\mathbf{f}_i$ определены формулами:

$$\mathbf{f}_1 = (F - T_t) \frac{\Delta}{|\Delta|}, \quad \mathbf{f}_2 = T_t \frac{\Delta}{|\Delta|}. \quad (10)$$

Направление действия сил F и T_t совпадает с направлением вектора Δ (рисунок 2а). Сила T_t определена формулой:

$$T_t = \begin{cases} k_t \varepsilon_t + c_t \dot{\varepsilon}_t, & |\Delta| \geq l, \\ 0, & |\Delta| < l, \end{cases} \quad (11)$$

первое слагаемое отвечает за силу упругости, второе - за силу демпфирования. k_t и c_t – жёсткость и коэффициент демпфирования троса соответственно. ε_t и $\dot{\varepsilon}_t$ - относительное растяжение и скорость относительного растяжения троса, определяются формулами:

$$\varepsilon_t = \frac{|\Delta|}{l} - 1, \quad \dot{\varepsilon}_t = \frac{\Delta \dot{\Delta}}{|\Delta| l} - \frac{|\Delta| \dot{l}}{l^2}. \quad (12)$$

Величина l - длина троса, определяется законом управления длиной троса (5) для $n = 0$. Подставляя силы в (9), получим окончательный вид уравнений управляемого орбитального движения системы:

$$\ddot{\Delta} = -3\omega_o^2 \frac{\Delta_y}{r} \mathbf{r} - \omega_o^2 \Delta + \left[\frac{F}{m_1 |\Delta|} - \frac{1}{M} \left(\frac{k_t}{l} - \frac{k_t}{|\Delta|} - c_t \frac{\dot{l}}{l^2} \right) \right] \Delta - \frac{c_t}{Ml} \dot{\Delta} - 2(\omega_o \times \dot{\Delta}), \quad (13)$$

или в координатной форме:

$$\ddot{\Delta}_x = 2\omega_o \dot{\Delta}_y - \frac{c_t}{Ml} \dot{\Delta}_x + \Omega \Delta_x, \quad \ddot{\Delta}_y = -2\omega_o \dot{\Delta}_x - \frac{c_t}{Ml} \dot{\Delta}_y + (\Omega - 3\omega_o^2) \Delta_y, \quad (14)$$

здесь $M = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ - приведённая масса системы, Ω - частота продольных колебаний троса, определяемая формулой:

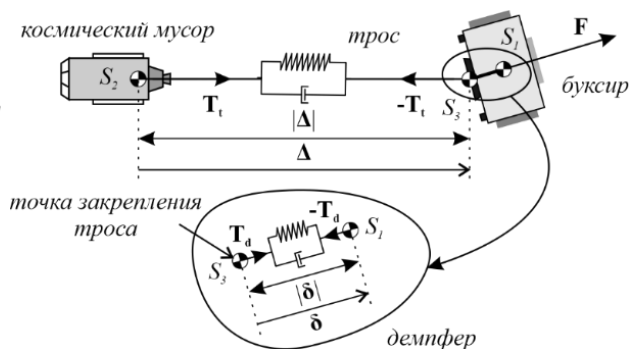
$$\Omega^2 = \frac{F}{m_1 |\Delta|} - \frac{1}{M} \left(\frac{k_t}{l} - \frac{k_t}{|\Delta|} - c_t \frac{\dot{l}}{l^2} \right) \quad (15)$$

Из (15) следует, что Ω зависит от l и $|\Delta|$, зависящих, в свою очередь, от времени t . С ростом t , величины l и $|\Delta|$ уменьшаются, а частота, наоборот, растёт. Это приводит к возникновению высокочастотных колебаний в конце манёвра сближения, что может привести к запутыванию, обрыву троса или столкновению космического буксира с космическим мусором. Таким образом, формула (15) представляет собой аналитическую зависимость для определения частоты колебаний троса.

В результате численных экспериментов установлено, что введённый закон управления обеспечивает свёртывание системы в случае плоского орбитального движения по круговой орбите. Но в конце свёртывания наблюдаются продольные колебания самого троса. В дополнение, свёртывание приводит к закручиванию связки вокруг собственного центра масс, способному перейти во вращение связки.

Для уменьшения продольных колебаний троса в конце манёвра свёртывания в систему введено дополнительное звено – демпфер. В этом случае рассмотрена система, состоящая из трёх материальных точек: S_1 - космический буксир, S_2 - космический мусор, S_3 - точка закрепления троса к буксиру

The diagram illustrates a two-satellite system in a rotating frame. A central mass O is connected to two satellites S_1 and S_2 by springs with distances ρ_1 and ρ_2 . The system rotates with angular velocity ω_0 . A coordinate system (x, y, z) is centered at O . Position vectors $\mathbf{r}_1$ and $\mathbf{r}_2$ are shown relative to Earth. Distances Δ and $|\Delta|$ are indicated between the satellites. Forces T_i , $-T_i$, and F are shown acting on the satellites.



Введены новые переменные:

С учетом переменных (16), по аналогии с (9), уравнения движения системы имеют вид:

Внутренние силы между элементами системы определяются следующим образом: для S_1 и S_2 – вязкоупругая сила, действующая в демпфере, для S_2 и S_3 – вязкоупругая сила троса.

где $\mathbf{i} = \{1, 0, 0\}^T$, T_d - сила упругости демпфера:

Здесь k_d и c_d - жёсткость и коэффициент демпфирования соответственно, величины ε_d и $\dot{\varepsilon}_d$ — относительное растяжение и скорость относительного растяжения демпфера соответственно:

Сила T_i определяется формулой (11), но для величины Δ вычисляемой формулой (16).

8

Четвёртая глава посвящена решению двух задач: управлению угловым движением связки, обеспечивающему отсутствие углового движения связки вокруг собственного центра масс, и выравниванию орбитальных параметров космического буксира и космического мусора до начала сближения.

В рамках задачи управления угловым движением связки буксир–космический мусор на этапе сближения рассмотрено два этапа: 1) остановка углового движения системы перед началом сближения; 2) контроль углового движения во время выполнения сближения.

Рассмотрена система, представленная на рисунке 3. Система состоит из космического буксира массой m_1 , космического мусора - m_2 и вязкоупругого троса. Тяга F маршевых (основных) двигателей космического буксира всегда будет направлена по вектору, соединяющему точки m_1 и m_2 . Кроме того, на буксире установлены двигатели ориентации, где сила их тяги F_a направлена перпендикулярно силе тяги маршевых двигателей.

Движение системы рассмотрено в подвижной системе координат $Oxyz$ (рисунок 3), вращающейся относительно неподвижной системы координат $OXYZ$ с постоянной угловой скоростью ω_0 . Ось Ox направлена по касательной к орбите точки C . Оу направлена к центру Земли, Oz дополняет систему до правой тройки векторов. Используются следующие обобщённые координаты: l - расстояние между космическим буксиром и космическим мусором (длина троса) и угол α , определяющий поворот системы вокруг собственного центра масс. Точка C определяет положение центра масс системы, она движется по круговой орбите с постоянным радиусом r_c .

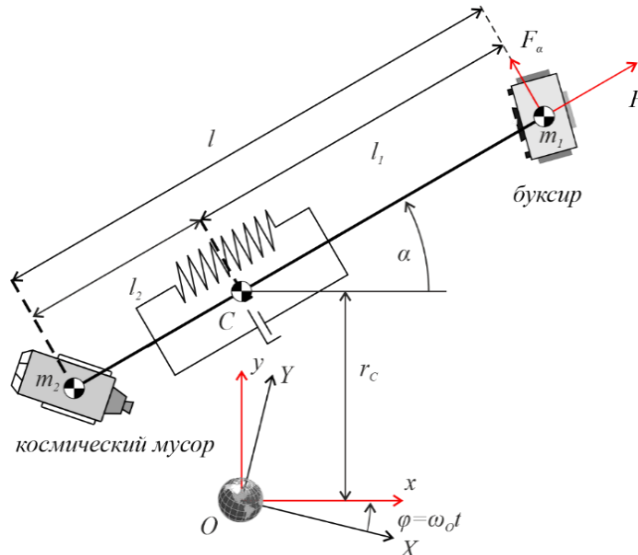


Рисунок 3 – Схема системы космический буксир – космический мусор для случая управления угловым движением

Используя метод уравнений Лагранжа второго рода, выведены уравнения движения системы:

$$\begin{cases} \ddot{l} - l(\omega_0 + \dot{\alpha})^2 - 2r_c\omega_0^2 \sin \alpha + H[l]c(l - l_0) - \mu \left(m_1 \frac{\partial(1/|r_1|)}{\partial l} + m_2 \frac{\partial(1/|r_2|)}{\partial l} \right) = Q_l, \\ l^2 \ddot{\alpha} + 2l(l\dot{\omega}_0 + \dot{l}\dot{\alpha} - r_c\omega_0^2 \cos \alpha) - \mu \left(m_1 \frac{\partial(1/|r_1|)}{\partial \alpha} + m_2 \frac{\partial(1/|r_2|)}{\partial \alpha} \right) = Q_\alpha. \end{cases} \quad (21)$$

Здесь $H[l]$ - функция Хевисайда:

$$H[l] = \begin{cases} 1, & l > l_0, \\ 0, & l \leq l_0. \end{cases} \quad (22)$$

l_0 - свободная длина троса, определяемая законом управления (5) при $n = 0$, r_c - радиус орбиты центра масс системы, c - жёсткость троса, μ - гравитационный параметр Земли.

Обобщённая сила Q_l определена формулой:

$$Q_l = F + H[l]k_d(\dot{l} - \dot{l}_0), \quad (23)$$

здесь первое слагаемое отвечает за тягу маршевых двигателей космического буксира, второе - за силы демпфирования троса.

Для управления угловым движением введём обобщённую силу Q_α в виде:

$$Q_\alpha = -k \sin \alpha - k_\alpha \dot{\alpha}, \quad (24)$$

где k и k_α - коэффициенты управления. Обобщённая сила Q_α отвечает за тягу двигателей ориентации (сила F_α). Формула (24) представляет собой полученную функциональную зависимость для параметров системы «буксир-космический мусор», обеспечивающую отсутствие углового движения связки вокруг собственного центра масс в процессе выполнения транспортной операции. Она обеспечивает управление угловым движением связки за счет управления тягой двигателей ориентации буксира.

Для первой стадии, с помощью серии численных экспериментов, исследована возможность остановки углового вращения системы вокруг собственного центра масс до начала этапа свёртывания троса. Результаты экспериментов показали, что предложенная функциональная зависимость (24) решает задачу остановки собственного вращения.

Для второй стадии (свёртывание троса) рассмотрено два случая движения системы: без управления угловым движением, с управлением угловым движением. В обоих случаях смотка троса осуществлялась в течение 2500 секунд. Результаты численных экспериментов представлены на рисунках 4-5.

Из рисунка 4 видно, что при отсутствии управления угловым движением на стадии сближения, система начинает вращаться, в итоге это приводит к продольным колебаниям. Колебания троса влияют на процесс последующей стыковки. В случае работы управления угловым движением (рисунок 5) на этапе сближения система сначала начинает вращаться, но затем останавливается.

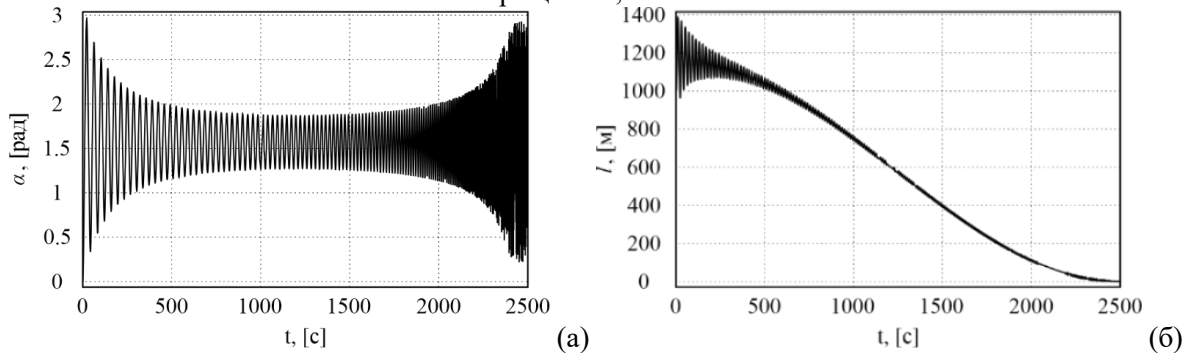


Рисунок 4 – Графики изменения: (а) - координаты α , (б) - координаты l (свёртывание осуществляется при $Q_\alpha = 0$)

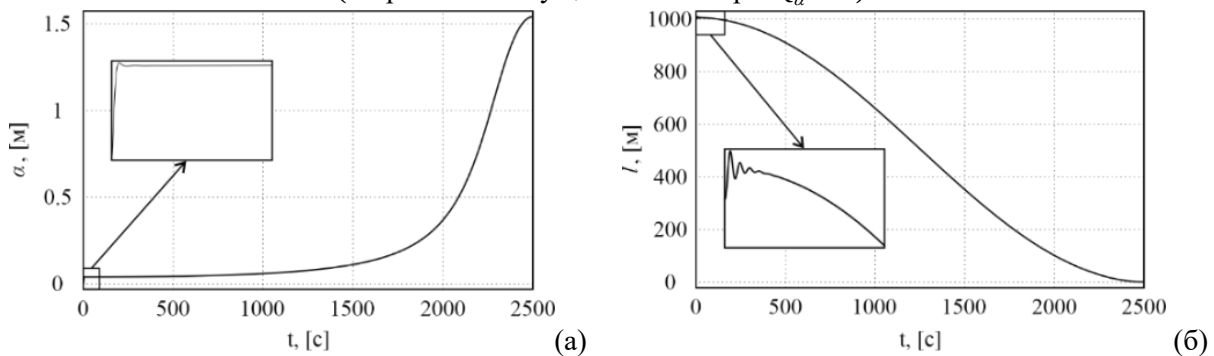


Рисунок 5 – Графики изменения: (а) – координаты α , (б) – координаты l (свёртывание осуществляются при $Q_\alpha = -k \sin \alpha - k_\alpha \dot{\alpha}$)

В рамках задачи выравнивания относительных скоростей построен закон управления длиной троса, соединяющего два тела, которые движутся с начальной относительной скоростью. Управление длиной троса обеспечивает уменьшение относительной скорости тел до нуля с сохранением целостности связки. Далее после обнуления относительной скорости, управляя длиной троса, обеспечивается сближение двух тел для последующей орбитальной транспортировки всей связки.

Для этого исследовано движение тросовой системы, состоящей из космического буксира и объекта космического мусора с пристыкованным автономным стыковочным модулем (далее под объектом космического мусора понимается связка объекта космического мусора и автономного модуля)

[В.И. Трушляков, Патент № 2531679]. Рассмотрено два этапа движения тросовой системы после формирования связки с начальной относительной скоростью между космическим буксиром и мусором:

- этап развёртывания троса для уменьшения относительной скорости между буксиром и космическим мусором;
- этап свёртывания троса до момента формирования жёсткой связи между космическим буксиром и космическим мусором.

Рассмотрена тросовая система, состоящая из космического буксира C_1 , космического мусора со стыковочным модулем C_2 и упругого троса, рисунок 6. На космическом буксире установлен механизм развёртывания троса, обеспечивающий изменение его длины. При управлении длиной троса необходимо учитывать ограничения на силу натяжения троса, обусловленные прочностью самого троса, механизма, элементов механизма его развёртывания и места крепления троса на объекте космического мусора. Кроме этого, при управлении длиной троса при его развёртывании необходимо учитывать и ограниченность его длины.

Космический буксир и объект космического мусора с пристыкованным автономным модулем рассмотрены как материальные точки с массами m_1 и m_2 соответственно. На первом этапе на связку буксир - космический мусор при движении по орбите действует гравитационное поле Земли. Однако предполагая, что продолжительность развёртывания тросовой системы невелика в сравнении с периодом обращения связки вокруг Земли, влияние гравитационного поля на движение тел связки рассматриваться не будет, т.е. движение тел рассматривается без учёта гравитационного воздействия.

Рассмотрено движение объекта космического мусора относительно центра масс связки. Уравнение движения космического мусора относительно центра масс связки получено с помощью принципа Д'Аламбера, рассматривая движение объекта космического мусора под действием силы натяжения троса.

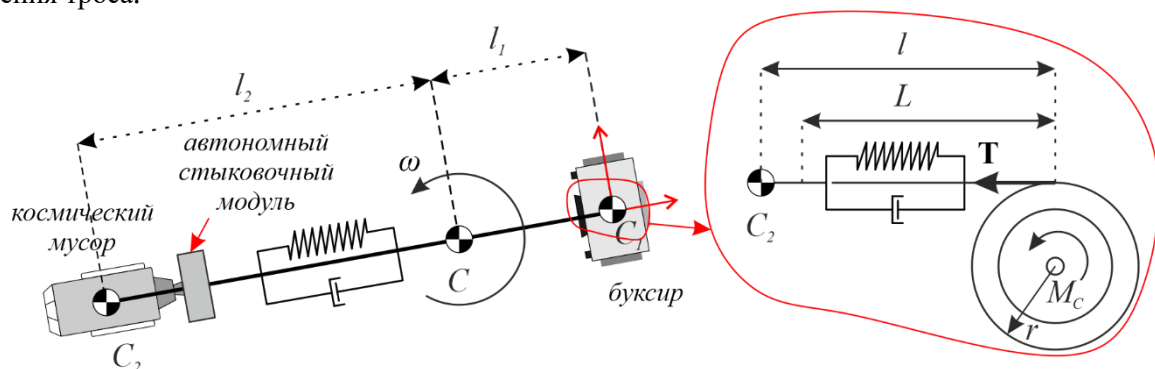


Рисунок 6 – Система космический буксир – космический мусор с механизмом развёртывания

Свободная длина L троса может изменяться по заданному закону при помощи механизма, установленного на космическом буксире. Уравнение движения механизма управления свободной длиной троса записано следующим образом (рисунок 6):

$$J_r \ddot{\theta} = M_c + Tr, \quad (25)$$

где J_r – момент инерции катушки с тросом, r – радиус катушки с тросом, $M_c = r F_c$ – управляющий момент.

Далее, введён закон управления длиной троса, обеспечивающий выравнивание орбитальных параметров космического буксира и космического мусора до начала сближения:

$$F_c = (c(l - L) - T_p) k_T, \quad (26)$$

здесь k_T – положительный безразмерный коэффициент управления, c – жёсткость троса, T_p – рабочий или номинальный уровень натяжения троса. Закон (26) позволяет выравнивать орбитальные скорости космического буксира и космического мусора до начала сближения. Выражение (26) обеспечивает натяжение троса около некоторого рабочего значения, что приводит к выравниванию этих скоростей. Система уравнений движения связки буксира с космическим мусором принимает вид:

$$m \ddot{l} - \frac{1}{l^3} \omega_0^2 l_0^4 m + T = 0, \quad M \ddot{L} = [(l - L)c - T_p] k_T + T. \quad (27)$$

Здесь m – приведённая масса системы двух тел, T – сила натяжения троса, $M = J_r / r^2$.

Система уравнений (27) интегрируется со следующими начальными условиями:

$$l(0)=l_0, \dot{l}(0)=\dot{l}_0, L(0)=l_0, \dot{L}(0)=\dot{l}_0.$$

Система (27) нелинейная и не интегрируется аналитически. Однако её решение при начальной угловой скорости тросовой системы равной нулю и при нулевом коэффициенте демпфирования может быть использовано для оценки максимальной силы натяжения троса и оценки времени развёртывания тросовой системы. Уравнения (27), при нулевой начальной угловой скорости троса и нулевом коэффициенте демпфирования троса, принимают следующий вид:

$$m\ddot{l} + c_0(l-L) = 0, \quad M\ddot{L} = [(l-L)c - T_p]k_T + c_0(l-L), \quad (28)$$

где c_0 – начальная жёсткость троса. Уравнения (28) имеют следующее аналитическое решение:

$$\begin{aligned} l &= l_0 + \dot{l}_0 t - \frac{c_0 k_T m^2 M^2 T_p}{A^4} \left(mM \cos\left(\frac{At}{mM}\right) + c_0 \left(M + (1+k_T)m \right) \frac{t^2}{2} - mM \right), \\ L &= l_0 + \dot{l}_0 t + \frac{k_T m^2 M^2 T_p}{A^4} \left(c_d m^2 \cos\left(\frac{At}{mM}\right) - c(cM + c_d m) \frac{t^2}{2} - c_d m^2 \right), \end{aligned} \quad (29)$$

где

$$A = \sqrt{mM(c_0 M + c_d m)}, \quad c_d = c_0(1+k_T). \quad (30)$$

Сила натяжения троса определяется выражением:

$$T = c_0(l-L) = \frac{1}{A^4} k_T m^3 M^2 T_p (c_0 M + c_d m) \left(1 - \cos\left(\frac{At}{mM}\right) \right). \quad (31)$$

Выражение (31) имеет максимальное значение при $t = mM / A$.

$$T_{\max} = \frac{2c_0 k_T T_p (k_T m + m + M)}{mM^2 (c_0 M + c_d m)^4}. \quad (32)$$

Выражения (29) и (32) позволяют оценить время развёртывания троса до максимальной длины, максимальную длину и максимальную силу натяжения троса при его развёртывании при нулевой относительной скорости движения тросовой системы и малом демпфировании.

Проведено численное моделирование процесса развёртывания тросовой системы. Результаты демонстрирует, что введённое управление решает задачу выравнивания орбитальных скоростей космического буксира и космического мусора до начала процесса сближения.

В **пятой главе** решается задача поиска закона управления длиной троса, обеспечивающего сближение космического буксира с космическим мусором на эллиптических орбитах с выключенными двигателями буксира. Для этого исследовано плоское движение космической тросовой системы с невесомым тросом переменной длины на эллиптической орбите.

Космический буксир и космический мусор смоделированы как материальные точки, связанные между собой упругим и невесомым тросом, рисунок 7. В качестве обобщённых координат выбраны: угол θ – отклонение троса от касательной к орбите центра масс связки и относительная длина троса $\Lambda = l/l_0$, где l – длина троса, l_0 – начальная длина троса. Для записи уравнений движения использованы уравнения описанные в работе P. Williams «Deployment/retrieval optimization for flexible tethered satellite systems, 2008», со следующими допущениями: движение является плоским и угол отклонения троса от плоскости орбиты равен нулю ($\phi \equiv 0$), масса троса пренебрежимо мала по сравнению с массой соединяемых им тел ($m_t = 0$), движение происходит только под действием гравитационных сил ($Q_\theta = 0$). В этом случае уравнения движения для эллиптических орбит имеют вид:

$$\theta'' = 2(\theta' + 1) \left[\frac{e \sin \nu}{\kappa} - \frac{\Lambda'}{\Lambda} \right] - \frac{3}{\kappa} \sin \theta \cos \theta, \quad (33)$$

$$\Lambda'' = \frac{2e \sin \nu}{\kappa} \Lambda' + \Lambda \left[(\theta' + 1)^2 + \frac{1}{\kappa} (3 \cos^2 \theta - 1) \right] - \frac{T(m_1 + m_2) p^3}{m_1 m_2 l_0 \mu \kappa^4}. \quad (34)$$

где $\kappa = 1 + e \cos \nu$, m_1 – масса буксира, m_2 – масса космического мусора, T – сила натяжения троса, ν – истинная аномалия, μ – гравитационный параметр Земли, p – фокальный параметр орбиты.

Знак $(\quad)' = d(\quad)/d\nu$ – означает производную по углу истинной аномалии ν , e – эксцентриситет орбиты.

Получим закон управления длиной троса, обеспечивающий свёртывание с постоянным углом θ . Для этого введем параметр управления:

$$u = \Lambda' / \Lambda \quad (35)$$

и подставим его, вместе с выражением $\theta' = 0$, $\theta'' = 0$ в уравнение (33): $0 = 2 \left[\frac{e \sin \nu}{\kappa} - u \right] - \frac{3}{\kappa} \sin \theta \cos \theta$.

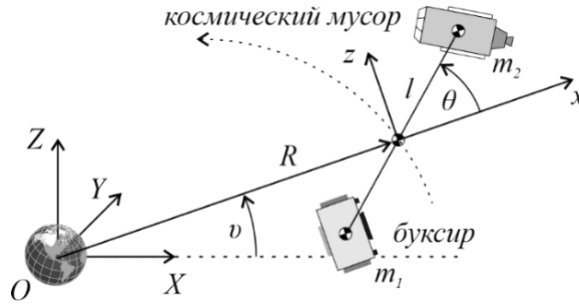


Рисунок 7 – Схема системы и обобщенные координаты

Выражая отсюда u , получим:

$$u = \frac{e \sin \nu}{1 + e \cos \nu} - \frac{3 \sin 2\theta}{4(1 + e \cos \nu)}. \quad (36)$$

Подставляя в (35), найдём закон изменения скорости свёртывания троса, обеспечивающий постоянный угол θ :

$$\Lambda' = \frac{1}{1 + e \cos \nu} \left(e \sin \nu - \frac{3}{4} \sin 2\theta \right) \Lambda. \quad (37)$$

Очевидно, что минимальное значение Λ' , соответствующее наискорейшему свёртыванию троса, будет наблюдаться при $\theta_* = \pi / 4$.

Для того, чтобы перевести тросовую систему из исходного положения θ_0, θ'_0 в требуемое для наискорейшего свёртывания угловое положение $\theta_* = \pi / 4$, $\theta'_* = 0$ добавим в управление (36) обратную связь:

$$u = \frac{e \sin \nu}{1 + e \cos \nu} - \frac{3 \sin 2\theta}{4(1 + e \cos \nu)} + \left(\frac{k_1}{2} + \frac{3}{4(1 + e \cos \nu)} \right) \theta' + \frac{k_2}{2} (\theta - \theta_*), \quad (38)$$

здесь k_1, k_2 - коэффициенты управления, C_0 - определяемая из начальных условий константа, $n \geq 2$ - целое число, Λ_0 - начальная длина троса. По мере приближения к положению $\theta_* = \pi / 4, \theta'_* = 0$, влияние третьего и четвертого слагаемого в выражении (38) уменьшается, и свёртывание идет по закону близкому к (37). В сомножитель к θ' в третьем слагаемом добавлен член $\frac{3}{4(1 + e \cos \nu)}$, который

позволяет существенно упростить дальнейший анализ устойчивости движения системы. Формула (38) представляет собой закон управления длиной троса, обеспечивающий сближение буксира с космическим мусором на эллиптических орбитах с выключенными двигателями буксира.

Подставляя (38) в (33) и учитывая (35), запишем систему уравнений, описывающих управляемое движение рассматриваемой тросовой системы:

$$\theta'' = 2(\theta' + 1) \left[\frac{3 \sin 2\theta}{4(1 + e \cos \nu)} - \left(\frac{k_1}{2} + \frac{3}{4(1 + e \cos \nu)} \right) \theta' - \frac{k_2}{2} (\theta - \theta_*) \right] - \frac{3 \sin \theta \cos \theta}{1 + e \cos \nu}, \quad (39)$$

$$\Lambda' = \left(\frac{e \sin \nu}{1 + e \cos \nu} - \frac{3}{4(1 + e \cos \nu)} \sin 2\theta + \left(\frac{k_1}{2} + \frac{3}{4(1 + e \cos \nu)} \right) \theta' + \frac{k_2}{2} (\theta - \theta_*) \right) \Lambda. \quad (40)$$

Эту систему можно отнести к классу систем нелинейных дифференциальных систем с периодическими коэффициентами. При этом, данный закон получен при условии отсутствия тяги двигателей космического буксира, что позволяет реализовать сближения без расхода запаса топлива на борту буксира.

С помощью теоремы Ляпунова об устойчивости по первому приближению доказана асимптотическая устойчивость управляемого движения на эллиптической орбите при использовании введённого закона управления длиной троса (38).

Результаты численных экспериментов демонстрируют, что полученный в главе закон управления обеспечивает свёртывание троса в случае движения системы по эллиптической орбите. При этом

система в итоге занимает угловое положение $\theta = \pi / 4$, колебания по углу к концу манёвра затухают. Полученное управление позволяет реализовать свёртывание троса как на круговых, так и на эллиптических орбитах с большим эксцентриситетом, без использования тяги двигателей космического буксира.

В шестой главе предложены схема и состав устройства управления длиной троса – лебёдки (рисунок 8). Определены технические требования: основные элементы, массово-габаритные параметры и мощность сервопривода, необходимые для реализации предложенных в диссертационном исследовании законов управления длиной троса.

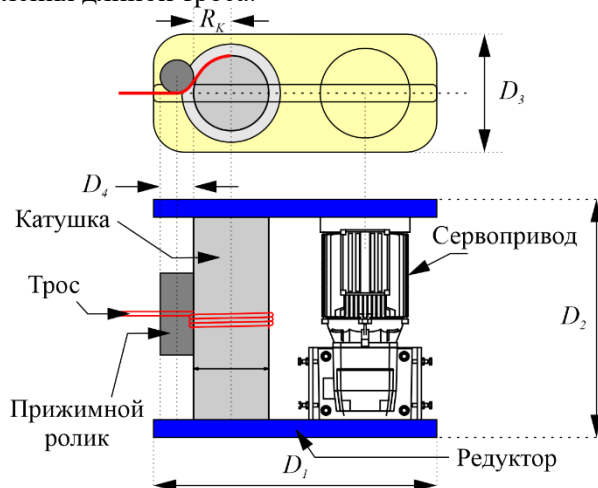


Рисунок 8 – Устройство механизма лебёдки

Ключевыми элементами системы космический буксир – космический мусор выступают: космический буксир, космический мусор, лебёдка и трос (рисунок 9). В качестве космического буксира предлагается использовать разгонный блок (РБ) «Волга», разработанный АО «ЦСКБ «Прогресс». РБ имеет основной двигатель и двигатели управления ориентацией, позволяющие реализовать полученную функциональную зависимость (24) для параметров системы «буксир-космический мусор», обеспечивающую отсутствие углового движения связки вокруг собственного центра масс. В качестве космического мусора в работе рассматриваются крупногабаритные объекты типа орбитальная ступень, в частности, использованы массово-инерционные параметры РБ ракеты-носителя «Космос-3М». В системе использован трос, изготовленный из кевлара. Подобный трос использовался в эксперименте YES-2 (Young Engineers` Satellite-2).

В диссертационной работе предельная нагрузка на трос не превышает значение $T_{\max} = 2000$ Н. Это значение используется далее в работе как предельное для вычисления характеристик лебёдки. Диаметр троса в расчётах составляет 5 мм.

Лебёдка представляет собой механизм, состоящий из следующих основных элементов: катушки с тросом, сервопривода, редуктора и прижимного ролика (рисунок 8). Параметры механизма лебёдки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры лебёдки

Параметр	Значение	Параметр	Значение
длина, D_1	0.8 м	диаметр прижимного ролика, D_4	0.05 м
ширина, D_2	0.66 м	КПД редуктора, η	0.8
высота, D_3	0.4 м	предельная масса лебёдки, m_k	100 кг
радиус катушки R_k	0.1 м		

Управление тросом осуществляется путём управления длиной троса l_T и его скоростью смотки/размотки $V_T = \dot{l}_T$. Законы управления, предлагаемые в диссертационном исследовании, реализуются механизмом лебёдки через управление скоростью троса, которая обеспечивается вращением катушки.

Длина троса l_T и скорость свёртывания троса $V_T = \dot{l}_T$ связаны с углом поворота катушки φ_K и с её угловой скоростью ω_K следующими соотношениями соответственно:

$$l_T = \varphi_K R_K, \quad V_T = \omega_K R_K \quad (41)$$

Скорость свёртывания троса, заданная законом управления, преобразуется в обороты катушки, которые, в свою очередь, переводятся редуктором в обороты сервопривода лебёдки.

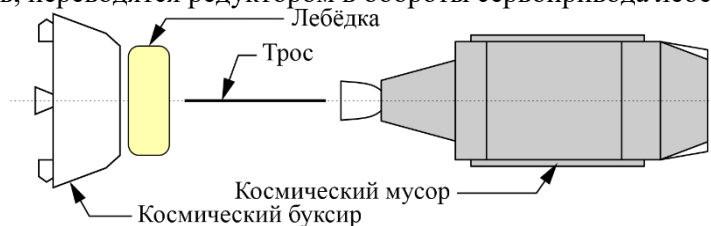


Рисунок 9 – Ключевые элементы системы космический буксир – космический мусор

При помощи кинематического анализа была рассчитана требуемая мощность сервопривода, которая позволит обеспечить выполнение предложенных законов управления длиной троса. Как следует из расчётов, предельная мощность составляет $P_{dv} = 12.5 \text{ кВт}$. Это предельное значение было получено на максимальном режиме работы, с максимальной скоростью свёртывания троса $V_{T_{\max}} = 5 \text{ м/с}$ при значении натяжения $T_{\max} = 2000 \text{ Н}$.

Результаты численных экспериментов с использованием законов управления из глав 2-5 показывают, что скорость свёртывания не превышает 2.5 м/с . Более того, при использовании управления (38) сила натяжения не превышает значений в 20 Н . Это даёт возможность снизить требуемую мощность сервопривода лебёдки до 0.125 кВт , сохранив при этом предельную скорость свёртывания в 5 м/с .

Таким образом, предложены схема и состав устройства управления длиной троса – лебёдки, обеспечивающей свёртывание троса по предложенным в диссертационном исследовании законам управления. Определены технические требования и рекомендации к механизму лебёдки: состав механизма, массово-габаритные параметры и мощность сервопривода.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

На основании разработанных математических моделей:

1. Предложен нелинейный закон управления длиной троса, позволяющий осуществлять безударное сближение космического буксира с объектом космического мусора.
2. Построен модифицированный закон управления длиной троса, обеспечивающий решение задачи выравнивания орбитальных параметров (скоростей) космического буксира и космического мусора до начала сближения.
3. Разработан закон управления, позволяющий решать задачу обеспечения процесса свёртывания троса при движении связки по эллиптическим орбитам в отсутствии тяги двигателей буксира.
4. Получена функциональная зависимость для параметров системы «буксир-космический мусор», позволяющая обеспечить отсутствие углового движения связки вокруг собственного центра масс в процессе выполнения транспортной операции.
5. Предложены схема и состав устройства управления длиной троса - лебёдки, позволяющей обеспечить процесс свёртывания троса по предлагаемым в работе законам управления. Определены технические требования и рекомендации к данному механизму: состав, массово-габаритные параметры и мощность её сервопривода.
6. Получен акт о возможности использования результатов диссертационных исследований от АО «РКЦ «Прогресс» от 21.04.2026 г. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс кафедры теоретической механики института авиационной и ракетно-космической техники ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» и включены в курс «Физико-механический практикум» направления подготовки 01.03.03 «Механика и математическое моделирование (Анализ и компьютерное моделирование аэрокосмических систем)» (акт о внедрении в учебный процесс от 21.03.2024 г. Результаты исследований использованы при выполнении работ, поддержанных Российским научным фондом (проект РНФ №16-19-10158, 2016-2018 гг., проект РНФ №19-19-00085, 2019-2021 гг., проект РНФ №22-19-00160, 2022-2024 гг.).

Результаты исследований могут быть использованы в следующих задачах:

- увод крупногабаритного космического мусора;
- возвращение космонавтов и оборудования на МКС после работы за бортом станции.

Результаты работы включены в план выполнения проекта РНФ №26-19-00260 «Моделирование перспективных транспортных космических миссий с использованием тросовых систем, реактивной тяги и электростатического взаимодействия» на 2026-2028 гг., в котором автор диссертационного исследования входит в число основных исполнителей проекта.

Основное содержание работы опубликовано в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. **Пикалов Р.С.** Безударное сближение космического мусора с буксиром при использовании тросовой системы / В.С. Асланов, Р.С. Пикалов // Труды МАИ. – 2017. – № 92. – С. 1-24.
2. **Пикалов Р.С.** Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора / Р.С. Пикалов, В.В. Юдинцев // Труды МАИ. – 2018. – № 100. – С. 1-37.

В изданиях, индексируемых в базе Scopus:

3. **Pikalov R.S.** Rendezvous of non-cooperative spacecraft and tug using a tether system / V.S. Aslanov, R.S. Pikalov // Engineering Letters 2017. – Vol. 25. No. 2. – P. 142-146.
4. **Pikalov R.S.** Dynamics and control of tether-Assisted rendezvous in LEO / V.S. Aslanov, R.S. Pikalov // Advances in the Astronautical Sciences. – 2017. – Vol. 161. – P. 1001-1010. – DOI: 10.1177/1077546306065710.
5. **Pikalov R.S.** Dynamic control of tug-debris tethered system after the capturing of the debris / V.I. Trushlyakov, V.V. Yudin, R.S. Pikalov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1050. No. 1. – P. 012092. – DOI 10.1088/1742-6596/1050/1/012092.
6. **Pikalov R.S.** Soft docking with damping of two spacecraft using a tether / V.S. Aslanov, R.S. Pikalov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096. No. 1. – P. 012074 – DOI 10.1088/1742-6596/1096/1/012074.
7. **Pikalov R.S.** Strategy for the realization of soft docking with space debris by using a tether system / R.S. Pikalov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1368. No. 4. – P. 042026. – DOI 10.1088/1742-6596/1368/4/042026.
8. **Pikalov R.S.** Control of the rendezvous of two spacecraft using a tether system / V.S. Aslanov, R.S. Pikalov, E.R. Gunchin // Russian Aeronautics. – 2020. – Vol. 63. No. 1. – P. 171-175. – DOI 10.3103/S1068799820010249.
9. **Pikalov R.S.**, Controlled attitude motion of the space tether at the retraction tether stage / R.S. Pikalov, V.S. Aslanov // International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation. – 2020. – Vol. 11. No. 4. – P.170-175. – DOI 10.1504/IJESMS.2020.111270.
10. **Pikalov R.S.** Tether system motion analysis of the various space debris' anchor point positions / L.F. Faizullin, R.S. Pikalov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1745. No. 1. – P. 1-8. – DOI 10.1088/1742-6596/1745/1/012060.
11. **Pikalov R.S.** Nonlinear control of tether retrieval in elliptical orbit / A.S. Ledkov, R.S. Pikalov // Russian Journal of Nonlinear Dynamics — 2023. — Vol. 19. No. 2— P. 1-18. – DOI 10.20537/nd230401.

В прочих изданиях:

12. **Пикалов Р.С.** Тросовая система для сближения буксира с космическим мусором // Тезисы докладов международной молодёжной научной конференции «XIV Королёвские чтения» - Самара, 3-5 октября 2017 г., Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, — 2017. — Т. 1. — С. 48-49.
13. **Пикалов Р.С.** Сближение космического буксира с космическим мусором при помощи тросовой системы с демпфером / Р.С. Пикалов, В.С. Асланов // Сборник трудов XX Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов – Самара 14-16 июня 2018 г., Самарский научный центр (РАН), — 2018. — Ч. 2. — С. 78-82.
14. **Pikalov R.S.** Rendezvous of two spacecraft in LEO with use tether / R.S. Pikalov, V.S. Aslanov // Сборник трудов IV Международной конференции и молодёжной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» - Самара 24-27 апреля 2018 г., — «Новая техника», — 2018. — P. 1960-1968.
15. **Pikalov R.S.** Strategy for the realization soft docking with space debris by using tether system // Сборник трудов V Международной конференции и молодёжной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» - Самара 21-24 мая 2019 г., — «Новая техника», — 2019. — P.414-417.
16. **Пикалов Р.С.** Причаливание космического буксира к объекту космического мусора с помощью тросовой системы // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2019» - Москва 8-12 апреля 2019. – МАКС Пресс, - 2019.
17. **Пикалов Р.С.** Управление свёртыванием тросовой системы на эллиптической орбите // Сборник аннотаций докладов 51 школы-конференции «Актуальные проблемы механики» - Нижний Новгород 19-21 июня 2024. – С. 189.
18. **Пикалов Р.С.** Нелинейное управление свертыванием тросовой системы на эллиптической орбите // Сборник тезисов «XLIX Академических чтений по космонавтике» - Москва 28-31 января 2025 г., МГТУ им Н.Э. Баумана, – 2025. – С. 244-246.