

На правах рукописи



**Беляев Александр Сергеевич**

**СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ОБЕЗВЕШИВАНИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ИХ НАЗЕМНЫХ  
ИСПЫТАНИЯХ**

2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: **Филипас Александр Александрович**  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Хакимьянов Марат Ильгизович**  
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа

**Богданов Дмитрий Юрьевич**  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электропривод» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Защита состоится «21» сентября 2023 г. в 17:00 на заседании диссертационного совета 24.2.350.07, созданного на базе ОмГТУ, по адресу: 644050, Омск, пр. Мира, 11, Главный корпус, ауд. П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОмГТУ и на сайте [www.omgtu.ru](http://www.omgtu.ru).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.350.07. Тел.: (3812) 65-24-79, e-mail: [dissov\\_omgtu@omgtu.ru](mailto:dissov_omgtu@omgtu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.350.07,  
кандидат технических наук, доцент



А. С. Грицай

**Актуальность работы.** Производство космических кораблей и спутников является наукоемкой отраслью. Прежде чем вывести космический аппарат (КА) на орбиту, необходимо провести ряд испытаний с целью проверки его на соответствие заданным требованиям и выявления возможных дефектов изготовления и некорректных решений, принятых на этапе конструирования. К таким испытаниям относятся натурное и математическое моделирование. При проведении натурального моделирования следует обеспечить условия, максимально приближенные к условиям длительной эксплуатации проектируемого устройства. Для космических аппаратов одним из таких ключевых условий является невесомость. Одним из основных вариантов создания требуемых условий является применение систем обезвешивания (СО). Чаще всего подобные системы применяются для обезвешивания трансформируемых конструкций космических аппаратов (ТККА): рефлекторов антенн, крыльев солнечных батарей (КСБ) и манипуляторов. По принципу исполнения СО делятся на тросовые и опорные, а по принципу функционирования – на пассивные, пассивно-активные и активные. Вопросами разработки систем обезвешивания в нашей стране занимались, судя по анализу научных публикаций, многие исследователи, такие как Евтеев А. Н., Матвеев А. В. и другие. Эти работы были направлены на применение тросовых систем обезвешивания двух типов: пассивного и пассивно-активного. Отметим известные недостатки систем пассивного и пассивно-активного обезвешивания, которые связаны с рядом факторов:

- наличием трения в тросово-блочных узлах и шарнирах системы обезвешивания, причем величина паразитных сил резко нарастает с ростом габаритов и массы объекта испытаний;
- массой, используемой для создания обезвешивающей силы, а также массой противовесов, что увеличивает инерционность движущихся элементов, ухудшая условия испытаний.

За рубежом, судя по анализу публикаций таких исследователей, как К. Seweryn, Т. Rybus, К. Yoshida, К. Nitta, J. M. Dolan, К. Saulnier и другие, этой задаче уделяется также большое внимание, однако принцип работы систем обезвешивания в рассмотренных случаях строится на использовании пневматических подшипников как элементов пассивно-активных опорных систем обезвешивания. Системы этого типа, по сравнению с тросовыми конструкциями, имеют меньшие массогабаритные параметры, что облегчает монтаж, наладку и упрощает настройку, однако влияние масс самой системы обезвешивания увеличивает инерционность всей системы, что ухудшает качество испытаний ТККА.

К наиболее перспективным решениям относятся полностью активные системы, которые не только компенсируют вес обезвешиваемого элемента (ОЭ), но и самостоятельно перемещаются в пространстве, что исключает появление инерционности, вызванной дополнительно присоединенными массами. Известны разработки такого типа, опубликованные в научных работах А.Г. Верхогляда, В.И. Халимановича, Г.Я. Пятибрatова, О.А. Кравченко и других. Вызовами для дальнейшего развития этих перспективных систем являются большие временные затраты на монтаж и настройку, сложность синтеза алгоритмов управления, сложность конструктивного исполнения, высокая стоимость систем, т.к. для каждого

разрабатываемого элемента космического аппарата необходимо создавать свою систему обезвешивания. Таким образом, разработка систем обезвешивания ТККА является актуальной задачей, а ее решение способствует повышению точности и надежности работы оборудования космических аппаратов.

**Целью диссертационной работы** является обоснование подходов и разработка методики проектирования систем обезвешивания ТККА в ходе их наземных испытаний с помощью активных опорной и четырехтросовой систем обезвешивания, на примере односекционной солнечной батареи.

**Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:**

1. Разработать математические модели с сохранением структуры и переменных состояния реальной системы обезвешивания и программное обеспечение, описывающие исполнительные механизмы и два варианта активных систем обезвешивания конструкций космических аппаратов – опорную и четырехтросовую.
2. Разработать подходы и методику проектирования систем обезвешивания с учетом ограничений на положение (расстановку) элементов системы обезвешивания относительно друг друга в транспортировочном положении элемента космического аппарата, с обеспечением требуемого, с точки зрения конструкторских расчетов, условия обезвешивания.
3. Провести экспериментальные исследования процесса обезвешивания объекта с горизонтально перемещающимся центром масс при использовании активной опорной и четырехтросовой систем обезвешивания.

**Объектом исследования** является процесс активного обезвешивания трансформируемых конструкций космических аппаратов при их наземных испытаниях.

**Предметом исследования** является обоснование подходов и разработка методики проектирования систем обезвешивания трансформируемых конструкций космических аппаратов при их наземных испытаниях.

**Гипотеза исследования:** обоснованные подходы и разработанная методика проектирования систем обезвешивания позволят решить задачу обезвешивания трансформируемых конструкций космических аппаратов с учетом ограничений на положение (расстановку) элементов системы обезвешивания относительно друг друга в транспортировочном положении элемента космического аппарата, с обеспечением требуемого, с точки зрения конструкторских расчетов, условия обезвешивания.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в работе задач использовались математическое моделирование, теория автоматического управления, методы искусственного интеллекта, методы системного анализа. При выполнении экспериментальных исследований применялись методы натурального моделирования, активной идентификации параметров объектов управления, статистическая

обработка экспериментальных данных. Для автоматизации процесса проектирования систем управления осуществлена разработка комплекса алгоритмического и программного обеспечения для оригинальных, разработанных автором, математических моделей, направленных на поддержку инженеров – проектировщиков.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Получена математическая модель активной опорной системы обезвешивания, отличающаяся подходом в представлении опорной подсистемы в виде перевернутого маятника, с двумя степенями свободы, на мобильной платформе, которая позволяет исследовать работу систем при различной компоновке кинематической схемы, параметрах исполнительных элементов и весе обезвешиваемого элемента.
2. Получена математическая модель активной четырехтросовой системы обезвешивания, отличающаяся подходом в составлении компонентов системы уравнений обезвешиваемого элемента на основе формирования вектора силы движения обезвешиваемого элемента и учетом основных нелинейностей, позволяющая исследовать динамику работу систем при различной компоновке кинематической схемы, параметрах исполнительных элементов и весе обезвешиваемого элемента.
3. Предложена методика проектирования систем обезвешивания трансформируемых элементов космических аппаратов, отличающаяся внедрением оригинального подхода к подбору типа, количества и положения устройств обезвешивания на основе математической теории оптимизации, с разработкой аналитического описания целевой функции, физически обоснованных граничных условий и верификацией полученного оптимального решения.

**Теоретическая значимость** работы состоит в обосновании подходов обезвешивания трансформируемых конструкций космических аппаратов при их наземных испытаниях на основе активных одноканальных опорной и четырехтросовой систем обезвешивания с получением их математических моделей, обеспечивающих в условиях наземных испытаний компенсацию влияния земного тяготения. Предложена методика проектирования систем обезвешивания с учетом конструкторских ограничений, обеспечивающая требуемое условие обезвешивания.

**Практическая значимость:**

1. Реализована разработанная конструкция активной опорной системы обезвешивания трансформируемых конструкций космических аппаратов при их наземных испытаниях, отличающаяся использованием мобильной платформы со следящими электроприводами, которая позволяет не только осуществлять компенсацию веса элементов космического корабля, но и компенсирует инерционность присоединенных масс.
2. Реализована разработанная конструкция активной четырехтросовой системы обезвешивания трансформируемых конструкций космических аппаратов, отличающаяся использованием закрепленных управляемых моментных

электроприводов с тросовыми лебедками, которая позволяет не только компенсировать вес обезвешиваемого элемента, но и осуществлять независимое многокоординатное перемещение с компенсацией инерционности присоединенных масс.

3. Разработанные методика и модели позволяют осуществить проектирование системы обезвешивания с учетом типа, количества и положения элементов системы обезвешивания, с обеспечением требуемого условия обезвешивания, например, минимизации моментов в шарнирах или минимизации веса в определенных точках, а также с учетом конструкторских ограничений на положение элементов системы обезвешивания относительно друг друга в транспортном положении космического аппарата.
4. Разработанные варианты систем обезвешивания позволяют упростить монтаж и настройку системы обезвешивания.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований использованы при выполнении НИР по гранту УМНИК №635ГУЦЭС8-D3/63727 «Разработка автоматизированной тросовой системы обезвешивания для реабилитации пациентов». Созданный гибридный лабораторно-исследовательский стенд внедрен в учебный процесс по основным образовательным программам 15.03.06 и 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» в ТПУ. Разработанное программное обеспечение, построенное на основе математической модели, применено в опытных устройствах, разрабатываемых в ООО «Промышленная механика» г. Томск.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель активной опорной системы обезвешивания ТККА, позволяющая исследовать динамику работы при различной компоновке кинематической схемы, параметрах исполнительных элементов и весе обезвешиваемого элемента.
2. Математическая модель активной четырехтросовой системы обезвешивания ТККА, позволяющая исследовать динамику работы при различной компоновке кинематической схемы, параметрах исполнительных элементов и весе обезвешиваемого элемента.
3. Оригинальная методика проектирования систем обезвешивания ТККА при их наземных испытаниях, которая позволяет осуществить выбор типа и количества элементов СО, а также определять их положение в зависимости от параметров обезвешиваемого элемента и накладываемых ограничений.

**Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами выполнено по нижеперечисленным пунктам:** п. 2 «Автоматизация контроля и испытаний», п.4 «Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами» и п. 12 «Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем

*АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени».*

**Степень достоверности.** Достоверность результатов и выводов работы обеспечивается строгостью используемых математических методов, непротиворечивостью результатов и выводов с ранее полученными данными исследований, а также результатами натурных экспериментов на лабораторных установках.

**Апробация работы.** Основной материал диссертационной работы отражен в 9-и научных докладах, основные из которых обсуждались на научно-практических конференциях: Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева «Решетневские чтения» (г. Красноярск, г. Железногорск 2019, 2020), 20th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (г. Москва, 2021), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «МСИТ» (г. Томск, 2021), Всероссийской научно-технической конференция «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «АСУ, информационно-телекоммуникационные системы». (г. Анапа, 2020), «Современные проблемы машиностроения», (г. Томск, 2020), Международной научно-технической конференции «Проблемы машиноведения» (г. Омск, 2021).

**Личный вклад автора.** Основные научные положения, результаты и выводы диссертационной работы получены автором лично. Совместно с научным руководителем сформулированы цель и задачи работы. Анализ полученных результатов выполнен автором совместно с научным руководителем.

**Публикации:** По теме диссертационной работы опубликовано 17 работ, среди которых 3 – в журналах перечня ВАК; 1 – в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, получен 1 патент на изобретение, 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 147 страницы, 6 приложений, в том числе 64 рисунка, 8 таблиц, список используемой литературы включает 128 наименований.

### **Основное содержание работы**

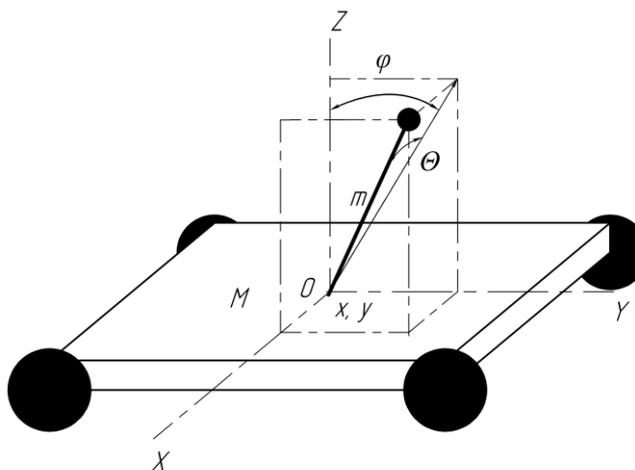
Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, рассмотрены вопросы научной новизны и указана практическая ценность работы.

В **первой** главе выполнен обзор и анализ систем обезвешивания трансформируемых конструкций космических аппаратов. Основные системы обезвешивания классифицируют по двум конструктивным принципам. По первому – как тросовые и опорные. По второму, более удобному для анализа и развития - на пассивные, пассивно-активные, активные. В системах первого типа используют устройства-противовесы, создающие силу, равную весу обезвешиваемого элемента. В системах второго типа устройства-противовесы создают на основе активного

элемента – электропривода, который создает момент, компенсирующий вес рассматриваемого элемента. В системах третьего типа реализуется не только функция компенсации веса элемента, но и решается задача перемещения всего устройства обезвешивания. В ряде систем реализуется альтернативный способ обезвешивания, использующий колёсные и роликовые опоры. Такие системы также можно строить как пассивные, так и пассивно-активные, что позволяет снижать массогабаритные характеристики и сложность монтажа по сравнению с тросовыми системами. Несмотря на привлекательность такого подхода, он имеет негативную особенность: поскольку перемещение осуществляется только за счёт движения обезвешиваемого элемента, то в системе присутствует эффект присоединённых масс. Это приводит к росту инерционности системы, а возникающие моменты трения в шарнирах значительно увеличивают ошибку обезвешивания. Эти особенности являются источниками значительного отклонения результата испытания КА от оптимального. На основе проведенного анализа сделан выбор в пользу двух систем обезвешивания – одноканальной активной опорной и активной четырехтросовой.

**Вторая** глава посвящена разработке математических моделей двух выбранных активных систем обезвешивания – опорной и четырехтросовой.

Для разработки математической модели опорной системы обезвешивания на базе мобильной робототехнической платформы на Mecanum-колесах было выбрано представление в виде 2-х степенного перевернутого маятника на платформе с 2-мя степенями свободы. Кинематическая схема такой системы приведена на рисунке 1. Данное допущение возможно, поскольку обезвешиваемый элемент совершает плоское движение, и ось вращения опорной стойки совпадает с осью вращения мобильной платформы, что делает вращательное воздействие ОЭ на платформу пренебрежимо малой величиной.



**Рис. 1.** Кинематическое представление устройства обезвешивания

Здесь  $\theta$  – угол отклонения опорной стойки относительно плоскости  $ZoY$ ,  $\varphi$  – угол поворота опорной стойки в плоскости  $ZoY$ , нулевое положение отсчитывается по оси  $X$ ,  $M$  – масса мобильной платформы,  $m$  – масса обезвешиваемого элемента,  $l$  – длина опорной стойки,  $x$  – координаты центра мобильной платформы по оси  $X$ ,  $y$  – координаты центра мобильной платформы по  $Y$ ,  $F_x$  – суммарная сила, действующая на мобильную платформу вдоль оси  $X$ ,  $F_y$  – суммарная сила,

действующая на мобильную платформу вдоль оси  $Y$ ,  $g$  – ускорение свободного падения. В результате использования уравнений Лагранжа второго рода получено уравнение динамики в следующей форме:

$$\begin{cases} (M + m) \cdot \ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cdot \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \cdot \sin \theta = F_x; \\ (M + m) \cdot \ddot{y} - ml\ddot{\theta} \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi + ml\ddot{\varphi} \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi - \\ - ml(\dot{\theta}^2 + \dot{\varphi}^2) \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi - 2ml\dot{\theta}\dot{\varphi} \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi = F_y; \\ ml^2\ddot{\theta} + ml\ddot{x} \cdot \cos \theta - ml\ddot{y} \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi + ml^2\dot{\varphi}^2 \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta - mgl \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi = 0; \\ ml^2\ddot{\varphi} \cdot \cos^2 \theta + ml\ddot{y} \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi - 2ml^2\dot{\theta}\dot{\varphi} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta - mgl \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Модель (1) получена при следующих основных допущениях:

- отсутствуют моменты сопротивления по осям наклона опорной стойки в 2-х степенном шарнире;
- отсутствуют моменты трения качения между колесами робота и поверхностью;
- отсутствуют потери тепловой энергии в электродвигателях;
- не учтена дискретизация датчиков и неоднородность распределения веса обезвешиваемого элемента.

Для дальнейшего синтеза алгоритма управления модель (1), являющаяся нелинейной, была линеаризована в области положения опорной стойки с минимальным проявлением нелинейности – в окрестности вертикального положения, то есть когда:  $\theta = 0, \dot{\theta} = 0, \varphi = 0, \dot{\varphi} = 0$ . Дополнительной особенностью математической модели является учёт влияния всенаправленных колёс в движителях мобильной платформы. Это обстоятельство потребовало пересчета скоростей вращения колес в скорости движения вдоль осей мобильной платформы, а также перевода моментов вращения колес в силы движения платформы вдоль осей X и Y на основе решения прямой и обратной задач кинематики. С учетом приближенных математических моделей электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением при общеизвестных допущениях, описание опорной системы обезвешивания в пространстве состояний в развернутой форме имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}; \\ \mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mathbf{x} = [v_x, \theta, \dot{\theta}, v_y, \varphi, \dot{\varphi}, i_1, i_2, i_3, i_4]^T$ ,  $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T$ ,  $u_i$  – напряжение на  $i$ -ом электродвигателе,

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-mg}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & K1 & K1 & K1 & K1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(m+M)g}{M \cdot l} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K1}{l} & \frac{-K1}{l} & \frac{-K1}{l} & \frac{-K1}{l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-mg}{M} & 0 & -K1 & K1 & K1 & -K1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(m+M)g}{M \cdot l} & 0 & \frac{K1}{l} & \frac{-K1}{l} & \frac{-K1}{l} & \frac{K1}{l} \\ -K2 & 0 & 0 & K2 & 0 & 0 & \frac{-r}{L} & 0 & 0 & 0 \\ -K2 & 0 & 0 & -K2 & 0 & 0 & 0 & \frac{-r}{L} & 0 & 0 \\ -K2 & 0 & 0 & -K2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-r}{L} & 0 \\ -K2 & 0 & 0 & K2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-r}{L} \end{bmatrix}, \quad K1 = \frac{k_{\text{red}} \cdot k}{M \cdot R}, \quad K2 = \frac{-Ce}{L \cdot R \cdot k_{\text{red}}}.$$

где  $\omega_j$  – скорость вращения  $j$ -го двигателя,  $k_{\text{red}}$  – передаточное число редуктора,  $k$  – конструктивный коэффициент движителя,  $C_e$  – электрическая постоянная двигателя,  $i_j$  – ток  $j$ -го двигателя,  $r$  – сопротивление двигателя,  $L$  – индуктивность обмотки двигателя,  $R$  – радиус колеса мобильной платформы,  $M_j$  – момент  $j$ -го движителя,  $v_x$  – скорость мобильной платформы вдоль оси  $X$ ,  $v_y$  – скорость мобильной платформы вдоль оси  $Y$ .

Для получения модели активной четырехтросовой системы воспользуемся кинематической схемой, приведенной на рисунке 2. Четырехтросовая система состоит из 4-х лебедок с тросами, закрепленными в точках  $O_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ , создающих моменты вращения  $M_i$ , при помощи электроприводов, и имеющими длины троса  $l_i$ , где  $i$ -номер лебедки, а обезвешиваемый груз имеет координаты  $\{x, y, z\}$ .

Создание силы обезвешивания будет происходить за счет сил натяжения тросов, которые, в свою очередь, создаются за счет моментов на электролебедках. Стоит отметить, что при моделировании работы было сделано допущение о том, что трос является идеальным, то есть пренебрегается его массой, его возможными колебаниями, а также процессами старения троса, вызванными воздействиями нестационарных усилий. Для выполнения условия обезвешивания силы натяжения тросов должны компенсировать вектор движения обезвешиваемого элемента:

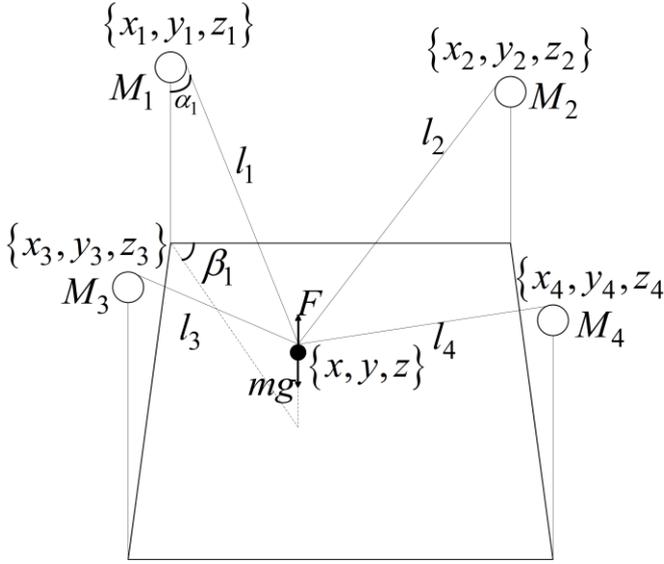


Рис. 2. Кинематическая схема четырехтросовой системы обезвешивания

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 - \vec{F}_T = m\vec{a}, \quad (3)$$

где  $F_i$  – сила натяжения  $i$ -го троса,  $F_T$  – сила тяжести ОЭ,  $m$  – масса ОЭ, а  $\vec{a}$  – ускорение ОЭ.

Для работы с векторным уравнением (3), все вектора сил были разложены на их проекции в прямоугольной системе координат по 3-м осям. После чего, на основании базовых законов динамики и кинематики были получены прямые зависимости между ускорением движения обезвешиваемого элемента и силами натяжения тросов:

$$\begin{cases} F_1 \cdot \frac{x_1 - x}{l_1} + F_2 \cdot \frac{x_2 - x}{l_2} + F_3 \cdot \frac{x_3 - x}{l_3} + F_4 \cdot \frac{x_4 - x}{l_4} = ma_x, \\ F_1 \cdot \frac{y_1 - y}{l_1} + F_2 \cdot \frac{y_2 - y}{l_2} + F_3 \cdot \frac{y_3 - y}{l_3} + F_4 \cdot \frac{y_4 - y}{l_4} = ma_y, \\ F_1 \cdot \frac{z_1 - z}{l_1} + F_2 \cdot \frac{z_2 - z}{l_2} + F_3 \cdot \frac{z_3 - z}{l_3} + F_4 \cdot \frac{z_4 - z}{l_4} = m(g + a_z). \end{cases} \quad (4)$$

Для решения обратной задачи динамики, полученная система уравнения (4) была переведена в матричный вид:

$$\mathbf{D} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = m \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ g + a_z \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = \mathbf{D}^{-1} \cdot m \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ g + a_z \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Так как матрица  $\mathbf{D}$  не является квадратной матрицей, то для нахождения обратной матрицы необходимо воспользоваться одним из методов псевдообращения. В данной работе было целесообразно воспользоваться методом Мура-Пенроуза, в результате применения которого процесс получения псевдообратной матрицы выполнен при приемлемых затратах вычислительных ресурсов.

Для определения требуемого управляющего воздействия на электродвигатели осуществлен переход от сил натяжения тросов к моментам на электродвигателях. Создаваемый электродвигателями, установленными на лебедках, момент вращения направлен на компенсацию силы натяжения тросов, поэтому справедливо уравнение:

$$M_i = F_i \cdot R_{лб} + J \cdot \dot{\omega}_i + M_{пот}, \quad (6)$$

где  $R_{лб}$  – радиус лебедки,  $M_{л}$  – масса лебедки,  $J$  – момент инерции. Используя зависимость между угловой и линейной скоростью, уравнение (6) преобразуется в следующий вид:

$$\ddot{i}_i = \frac{\pi R_{\text{лб}}}{180} \cdot \frac{M_i - F_{iz} \cdot R_{\text{лб}} - M_{\text{пот}}}{J}. \quad (7)$$

В процессе воздействия веса обезвешиваемого элемента необходимо учитывать эффекты растяжения троса, которые можно учесть по закону Гука  $F_i = -k_i \cdot \Delta L_i$ , где  $k_i$  – коэффициент упругости, зависящий от длины троса следующим образом:  $k_i = (E \cdot S) / l_i$ . Удлинение троса, вызванное растяжением  $\Delta L$ , которое демонстрирует зависимость величины удлинения троса от приложенной к нему силы и текущей длины троса, можно определить следующим выражением:  $\Delta L_i = (-F_i \cdot l_i) / (E \cdot S)$ . По информации о скорости вращения лебедки определена линейная скорость движения груза, которая определяет изменение длины троса  $l_i = \pi R_{\text{лб}} \varphi_i / 180$ , где  $\varphi_i$  – угол поворота  $i$ -ой лебедки. Добавляя к данной зависимости эффект удлинения троса, который будет динамически изменяться в процессе перемещения ОЭ, получена расчетная зависимость длины троса от угла поворота лебедки с учетом:

$$l_i = \frac{\pi R_{\text{лб}}}{180} \cdot \varphi_i + \frac{F_i \cdot l_i}{E \cdot S}. \quad (8)$$

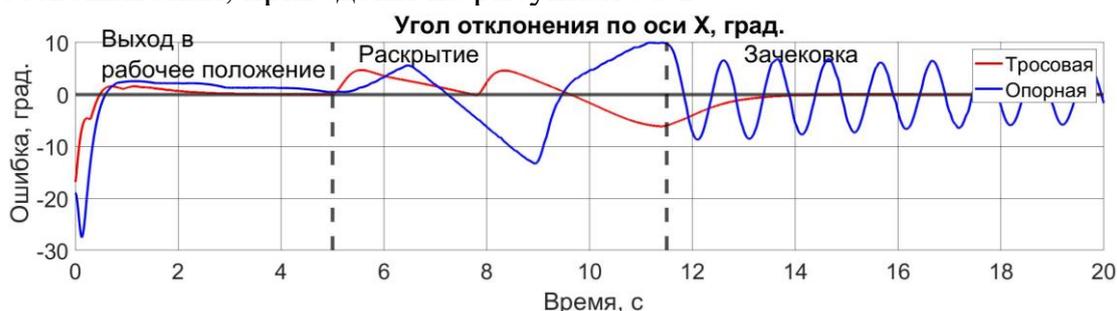
В качестве управляемых электродвигателей выбраны двигатели постоянного тока с независимым возбуждением при общепринятых допущениях в математической модели. С учетом этого, математическое описание системы примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = \frac{1}{m R_{\text{лб}}} \cdot \left( M_1 \cdot \frac{x_1 - x}{l_1} + M_2 \cdot \frac{x_2 - x}{l_2} + M_3 \cdot \frac{x_3 - x}{l_3} + M_4 \cdot \frac{x_4 - x}{l_4} \right), \\ \ddot{y} = \frac{1}{m R_{\text{лб}}} \cdot \left( M_1 \cdot \frac{y_1 - y}{l_1} + M_2 \cdot \frac{y_2 - y}{l_2} + M_3 \cdot \frac{y_3 - y}{l_3} + M_4 \cdot \frac{y_4 - y}{l_4} \right), \\ \ddot{z} = \frac{1}{m R_{\text{лб}}} \cdot \left( M_1 \cdot \frac{z_1 - z}{l_1} + M_2 \cdot \frac{z_2 - z}{l_2} + M_3 \cdot \frac{z_3 - z}{l_3} + M_4 \cdot \frac{z_4 - z}{l_4} \right) - g, \\ \ddot{\varphi}_i = \left( \frac{M_i}{l_i} (l_i - (z_i - z) - 0.05 l_i) \right) / J, \\ l_i = \frac{\pi R_{\text{лб}}}{180} \cdot \varphi_i + \frac{M_i \cdot l_i}{R_{\text{лб}} \cdot E \cdot S}, \\ M_j = i_j \cdot k \cdot k_{\text{ред}}, \\ \frac{di_j}{dt} = \frac{u_j}{L} - \frac{\omega_j \cdot C_e}{L \cdot k_{\text{ред}}} - \frac{r}{L} \cdot i_j. \end{array} \right. \quad (9)$$

Система уравнений (9) отражает наличие перекрестных связей и переменных параметров, что делает систему многосвязной и нестационарной. Для практического описания необходимо ее упрощение. Были приняты следующие основные допущения: намотка троса на барабан равномерна; сигналы датчиков непрерывны, статические характеристики элементов системы не имеют зон нечувствительности.

**Третья** глава посвящена разработке математических моделей с сохранением структуры и переменных состояния реальных одноканальных активных опорной и четырехтросовой систем обезвешивания, синтезу систем управления ими и исследованию процесса их функционирования. Основные задачи были направлены на достижение максимально точных результатов за счет учета дополнительных факторов. К ним относятся: моменты сопротивления в двухступенном шарнире опорной системы обезвешивания, моменты трения качения между колесами мобильной платформы и поверхностью, моменты сопротивления в шарнирах солнечной батареи, дискретизация сигналов сенсорной системы робота, ограничения на максимальный ток и напряжение двигателей.

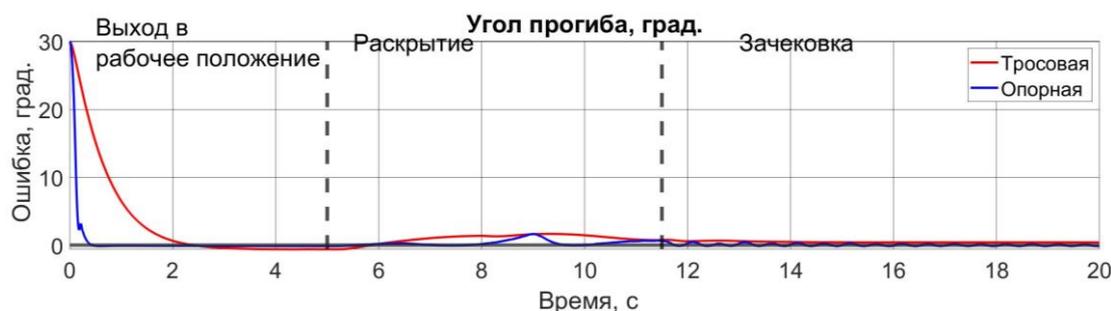
Полученные математические модели с сохранением структуры и переменных состояния реальной системы обезвешивания были разработаны на базе прикладного программного пакета (ППП) Matlab Simulink 2019a с применением библиотеки SimMechanics Multibody, позволяющей визуализировать процесс работы системы обезвешивания непосредственно с обезвешиваемым объектом. В качестве такого объекта была принята односекционная солнечная батарея, состоящая из штанги и солнечной панели, которая позволяет в полной мере проверить работоспособность моделей. Для определения качества обезвешивания, в модели солнечной панели предусмотрена степень свободы, позволяющая осуществлять моделирование прогиба под весом (данный угол отклонения и определяет ошибку обезвешивания). Для реализации управления системами обезвешивания в качестве базового варианта управления был выбран пропорционально-интегрально-дифференциальный закон. Для системы тросового обезвешивания разработана четырехконтурная система управления, в которой внутренний контур осуществляет управление моментом электродвигателя, второй – управление скоростью вращения вала электродвигателя, третий – управление длиной троса электролебедки, а внешний контур решает задачу слежения за траекторией раскрытия. Опорная система обезвешивания реализована в виде двухконтурной структуры, в которой внутренний контур предназначен для стабилизации скорости вращения каждого двигателя мобильной платформы, а внешний контур решает задачу слежения по углам отклонения опорной стойки от вертикального положения. Переходные характеристики, характеризующие 3 стадии работы системы: выход в рабочее положение (исходное обезвешивание), раскрытие и последующая зачековка, полученные в результате математического моделирования двух рассматриваемых систем обезвешивания, приведены на рисунках 3а-в.



**Рис. 3а.** Переходные характеристики работы систем обезвешивания по углу отклонения по оси X



**Рис. 3б.** Переходные характеристики работы систем обезвешивания по углу отклонения по оси Y



**Рис. 3в.** Переходные характеристики работы систем обезвешивания по углу прогиба

Анализ полученных характеристик (рис. 3) показал, что, с одной стороны, система опорного обезвешивания имеет меньшую ошибку по углу прогиба по сравнению с тросовой системой, что говорит о лучшем качестве обезвешивания, а с другой стороны, имеет большие отклонения по осям X и Y в процессе раскрытия, а также и после зачековки солнечной панели, что делает возможным улучшение качества обезвешивания при минимизации отклонения путем настройки системы управления. Эта особенность связана с тем, что конструкция опорной системы обезвешивания построена на основе двухстепенного перевернутого маятника на тележке, а этот объект является неустойчивым и неминимально-фазовым. Для такого рода объектов выбор ПИД закона управления, как было выявлено, не является подходящим решением. При поиске лучших решений по выбору базового закона управления для активной опорной системы обезвешивания был рассмотрен линейно-квадратичный регулятор. В работах таких авторов, как Anderson C., S. D. Hanwate, E. Vinodh Kumar, H. Asadi и другие, линейно-квадратичный регулятор показывает лучшее качество управления по сравнению с другими регуляторами для подобных неустойчивых объектов управления.

Несмотря на в целом интересные результаты, у этого варианта оказались свои специфические особенности: результаты в сильной степени зависят от точности назначения коэффициентов матриц состояний  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{R}$ . В то же время поиск их аналитическим путем практически невозможен. Выход был найден в привлечении для их расчетов аппарата генетического алгоритма (ГА). При этом было принято во внимание то обстоятельство, что в мобильной платформе двигатели одинаковы. Это позволило принять одинаковыми и коэффициенты управляющей матрицы  $\mathbf{R}$  для каждого электродвигателя. Они далее обозначены переменной  $\tau_1$ . На основании этого и отсутствия необходимости оптимизировать энергетические потери мобильной платформы в процессе движения, коэффициенты состояния по

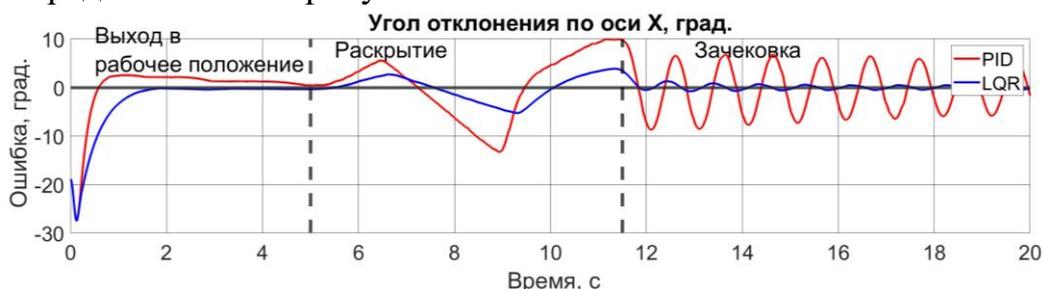
токам электродвигателей в матрице  $\mathbf{Q}$  также заданы одной переменной  $x_5$ . В итоге коэффициенты матриц состояний  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{R}$  описаны следующим видом:

$$\mathbf{Q} = \text{diag}\{\tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_5, \tau_5, \tau_5\}, \mathbf{R} = \text{diag}\{\tau_1, \tau_1, \tau_1, \tau_1\}, \quad (10)$$

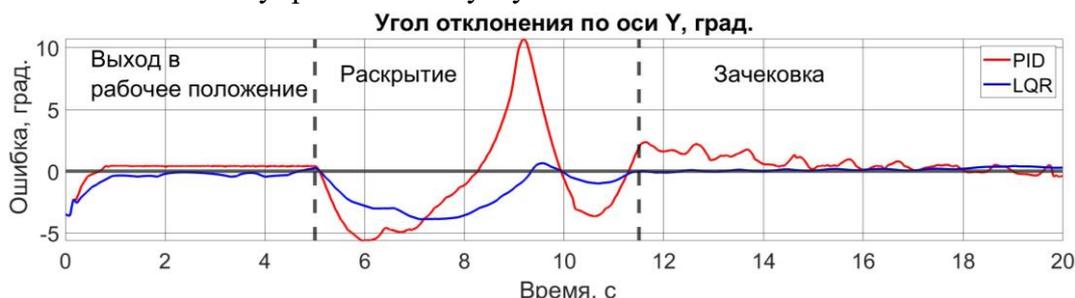
где,  $\mathbf{T} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5]$  – вектор значений генов популяции ГА. В качестве функции оценки приспособляемости была выбрана сумма средних интегральных значений угла отклонения от вертикального положения опорной стойки по каждой оси:

$$J_r = \frac{\sum|\theta(\mathbf{T})| + \sum|\varphi(\mathbf{T})|}{2n}. \quad (11)$$

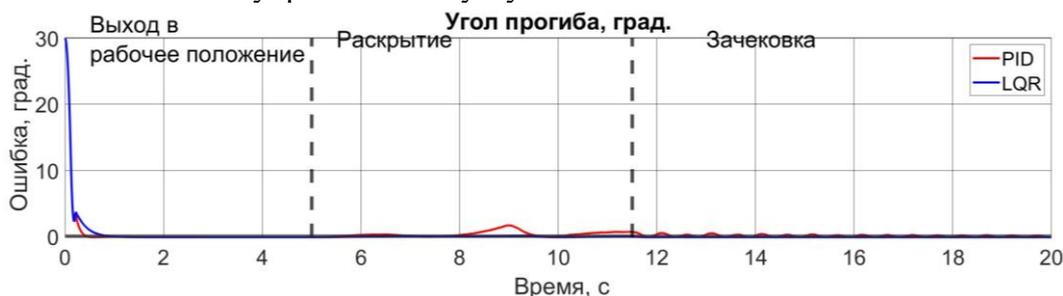
Было проведено сравнение работы активной опорной системы обезвешивания с системами управления на основе ПИД и линейно-квадратичного регулятора, настройки которого получены с применением ГА. Дополнительно в математическую модель были введены основные нелинейности, связанные с ограничением на максимально допустимый ток двигателей, дискретизацию показаний датчиков по уровню сигнала и момент трения колес о поверхность. Переходные характеристики систем представлены на рисунках 4а-в.



**Рис. 4а.** Сравнение переходных характеристик при использовании разных типов систем управления по углу отклонения по оси X



**Рис. 4б.** Сравнение переходных характеристик при использовании разных типов систем управления по углу отклонения по оси Y



**Рис. 4в.** Сравнение переходных характеристик при использовании разных типов систем управления по углу прогиба

Анализ представленных и других опубликованных автором результатов показал, что линейно-квадратичный регулятор, с настройками, полученными с использованием ГА, справляется с задачей управления системой обезвешивания лучше по сравнению с ПИД-регулятором, что видно, в частности, по уменьшению отклонений опорной стойки по осям X и Y.

**Четвертая** глава посвящена методике проектирования системы обезвешивания для наземных испытаний космических аппаратов с учетом конструкторских ограничений. Алгоритм методики проектирования включает 10 шагов, представленных на рисунке 5.

Данная методика имеет универсальный характер и позволяет определить тип (например, опорная, тросовая или комбинированная), параметры системы обезвешивания (такие как количество элементов системы, их положение относительно ОЭ), с учетом конструкторских ограничений и максимально допустимых нагрузок, получаемых из предварительных конструкторских расчетов. С использованием предложенной методики и соответствующего алгоритма был проведен расчет для трех секционной солнечной батареи, состоящей из трех панелей, масса каждой из них 40 кг, а длина – 4 м. Для расчета параметров системы обезвешивания с учетом основного условия обезвешивания - минимизации моментов, возникающих в шарнирах, использованы генетические алгоритмы, позволяющие определить места расстановки элементов системы обезвешивания относительно обезвешиваемого элемента. С этой целью были получены зависимости моментов и сил, действующих на систему:

$$\begin{aligned} M_A &= -F_1 \cdot \frac{L_1}{2} - F_2 \cdot \left( L_1 + \frac{L_2}{2} \right) - F_3 \cdot \left( L_1 + L_2 + \frac{L_3}{2} \right) - P_1 \cdot \rho_1 - P_2 \cdot \rho_2 - P_3 \cdot \rho_3, \\ R_A &= -F_1 - F_2 - F_3 - P_1 - P_2 - P_3, \\ M_1 &= M_A - R_A \cdot L_1 - F_1 \cdot \left( \frac{L_1}{2} \right) - P_1 (L_1 - \rho_1), \end{aligned} \quad (12)$$

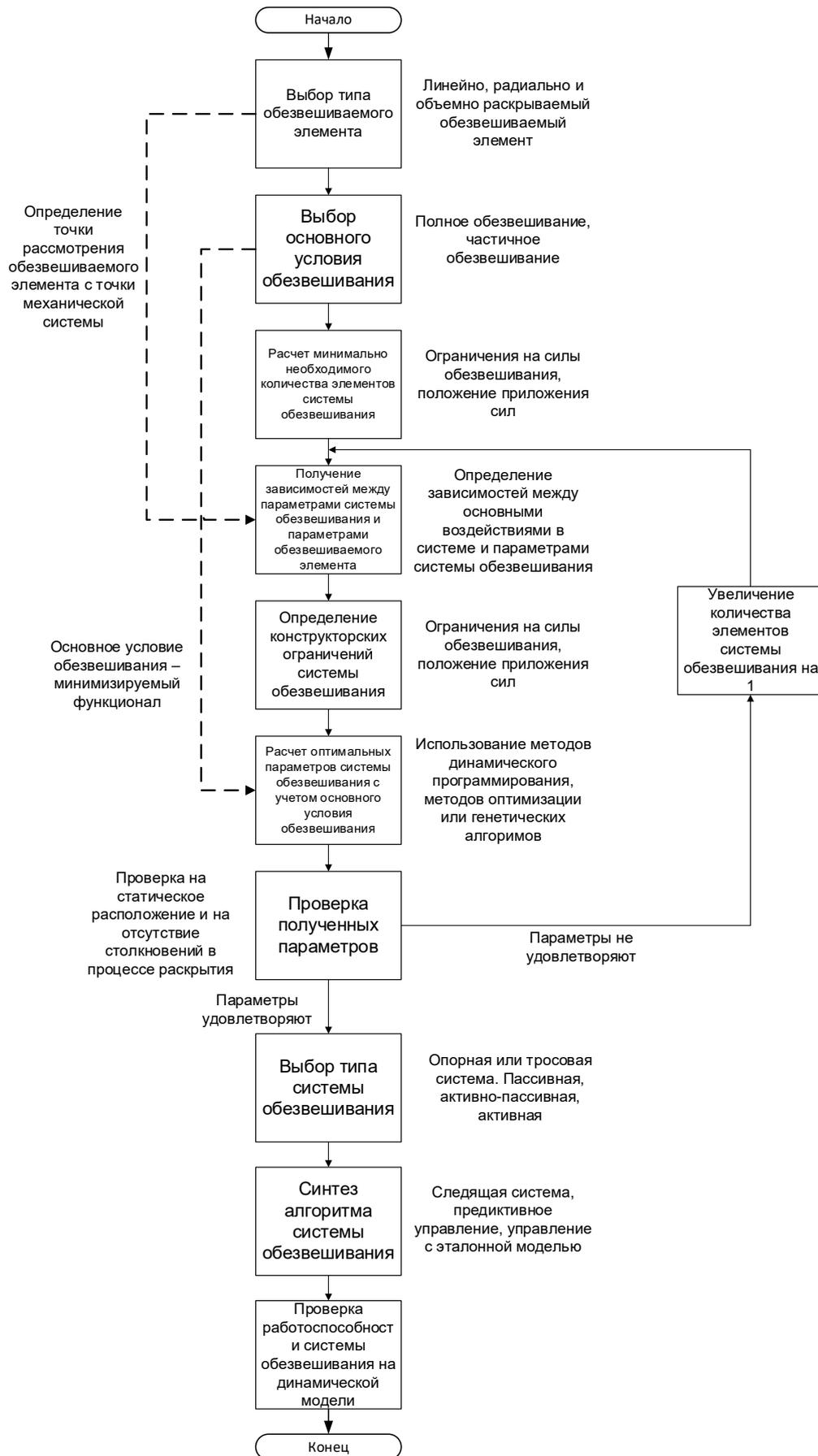
$$M_2 = M_A - R_A \cdot (L_1 + L_2) - F_1 \cdot \left( \frac{L_1}{2} + L_2 \right) - P_1 (L_2 + L_1 - \rho_1) - F_2 \cdot \left( \frac{L_2}{2} \right) - P_2 (L_2 + L_1 - \rho_2).$$

где  $L_i$  – длина  $i$ -ой панели,  $i \in [1;3]$ ,  $F_i$  – вес  $i$ -ой панели,  $P_i$  – сила обезвешивания  $i$ -го элемента системы обезвешивания,  $\rho_i$  – положение точки приложения силы  $i$ -го элемента системы обезвешивания.

В качестве целевой функции оптимизации выбрана сумма модулей значений моментов в шарнирах солнечной батареи, в следующем виде:

$$f(\rho_i, P_i) = \min_{\rho_i, P_i \in P} \left( \left| M_A(\rho_i, P_i) \right| + \left| M_1(\rho_i, P_i) \right| + \left| M_2(\rho_i, P_i) \right| \right) \quad (13)$$

В качестве ограничений задается расстояние между точками приложения сил обезвешивания в сложенном состоянии. Это расстояние должно составлять не менее 0,6 м.



**Рис. 5.** Алгоритм методики проектирования системы обезвешивания с учетом конструкторских ограничений

Кроме того, выбранная минимальная дистанция между точками должна быть соблюдена в процессе раскрытия. Помимо этого, нужно учесть, что каждое устройство обезвешивания должно создавать силу, направленную противоположно весу обезвешиваемых элементов, т.е. нужно принять  $P_i$  отрицательными. Аналогично введено ограничение и на максимальное по модулю значение силы, обеспечиваемое элементом системы обезвешивания, например, 1 кН. При этом ограничения вектора  $\mathbf{P}$  выглядят следующим образом:

$$\mathbf{P} = \left( \begin{array}{l} \rho_1 \in [0;4], \rho_2 \in [4;8], \rho_3 \in [8;12], \\ P_1 \in [-1;0], P_2 \in [-1;0], P_3 \in [-1;0] \end{array} \right) \left\{ \begin{array}{l} |\rho_1 - (\rho_2 - 4)| > 0,6; \\ |\rho_1 - (\rho_3 - 8)| > 0,6; \\ |(\rho_3 - 8) - (\rho_2 - 4)| > 0,6. \end{array} \right. \quad (14)$$

На основе полученных ранее зависимостей и ограничений, производится определение точек приложения сил обезвешивания, рассчитанных на основе генетического алгоритма, который позволил получить оптимальные в определенном смысле, на основании целевой функции (13), положения элементов системы обезвешивания. Возникающие силы и моменты представлены на соответствующей диаграмме (рисунок б), где точками  $M_1$  и  $M_2$  обозначены шарниры между панелями.

Проверка полученных результатов происходит на основании того, что в любой точке обезвешиваемого элемента момент не должен быть больше максимально допустимого из ограничений по конструктивным расчетам момента.

Следующим этапом исследования является проверка на отсутствие соударений элементов системы обезвешивания во время раскрытия солнечной батареи. С этой целью выполняется анализ кинематики раскрытия обезвешиваемого объекта с учетом определенных позиций элементов системы обезвешивания (рисунок 7). Для проверки используются следующие кинематические уравнения движения точек  $\mathbf{T}_i$  приложения сил в пространстве в процессе раскрытия, определенные на предыдущем шаге:

$$\mathbf{T}_1 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1 \cdot \cos(q_1) \\ \rho_1 \cdot \sin(q_1) \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{T}_2 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 \cdot \cos(q_1) + (\rho_2 - L_1) \cdot \cos(q_1 + q_2) \\ L_1 \cdot \sin(q_1) + (\rho_2 - L_1) \cdot \sin(q_1 + q_2) \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$\mathbf{T}_3 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 \cdot \cos(q_1) + L_2 \cdot \cos(q_1 + q_2) + (\rho_3 - L_2 - L_1) \cdot \cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ L_1 \cdot \sin(q_1) + L_2 \cdot \sin(q_1 + q_2) + (\rho_3 - L_2 - L_1) \cdot \sin(q_1 + q_2 + q_3) \end{pmatrix}. \quad (17)$$

где  $q_i$  – угол поворота  $i$ -ой солнечной панели. Полученные траектории движения точек в пространстве и во времени приведены на рисунке 7.

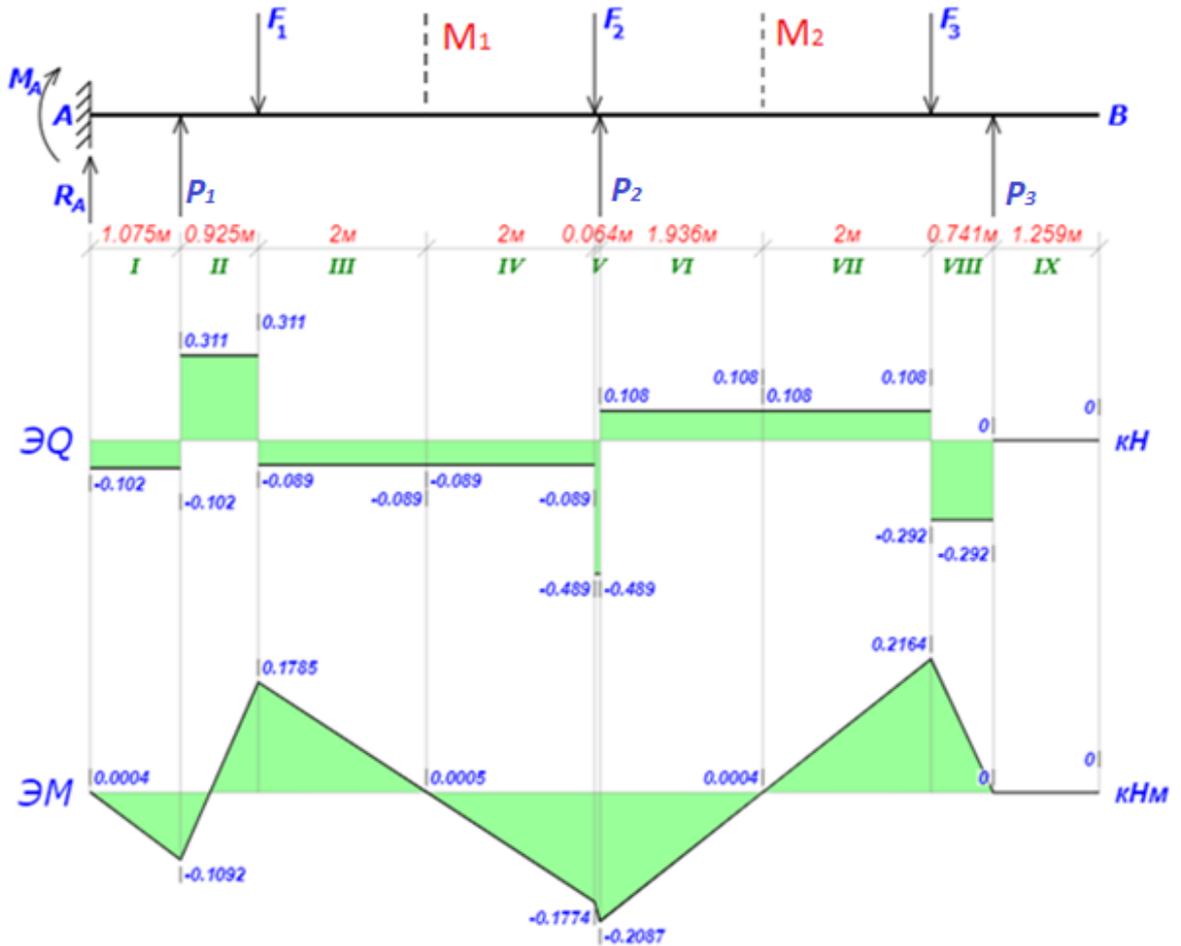


Рис 6. Эпюры сил и моментов, действующих на обезвешиваемый элемент.

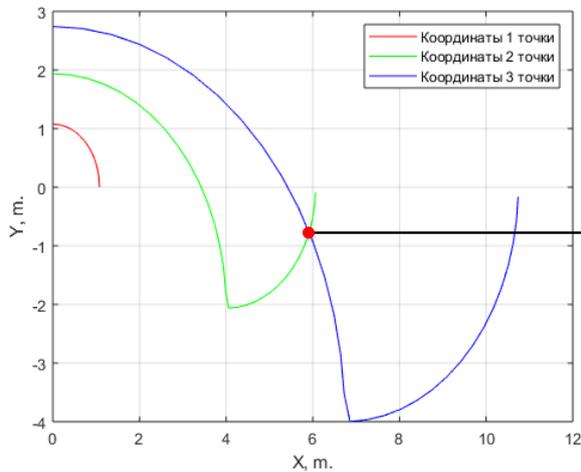


Рис. 7а. Траектории движения панелей в пространстве. Красная точка – точка предполагаемого столкновения панелей в пространстве.

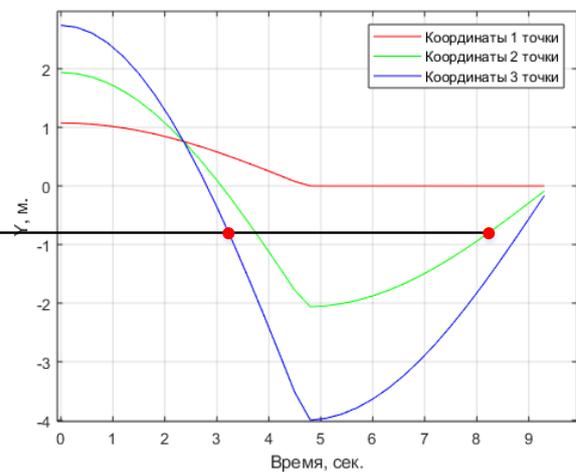


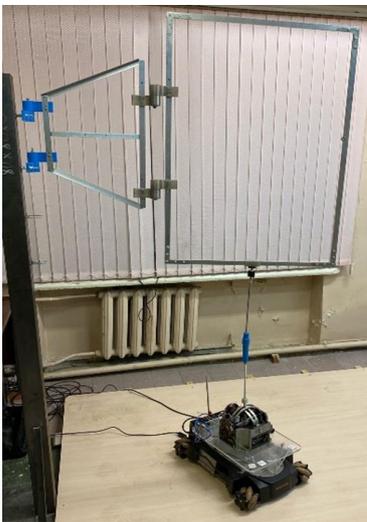
Рис. 7б. Траектории движения панелей во времени. Красные точки показывают, что панели находятся в точке предполагаемого столкновения, на рисунке 7а, в разные моменты времени (временные интервалы).

По графикам, представленным на рисунках 7а и 7б, видно, что координаты рассчитанных точек приложения сил пересекаются в пространстве в точке (рисунок 7а точка {6, -0,8}) единовременно, однако по времени появление элементов систе-

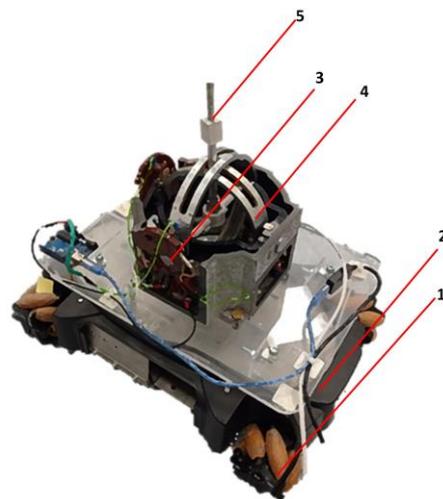
мы обезвешивания в этой точке существенно различаются (рисунок 7б – 3,2 с. и 8,2 с.), что подтверждает отсутствие соударений в рабочей зоне.

В главе 5 проведена апробация полученных результатов на стендах, которые были разработаны специально для проведения натуральных экспериментов, сопоставлены результаты моделирования и экспериментальные данные.

Экспериментальные стенды для проверки систем обезвешивания трансформируемых конструкций солнечных батарей космических аппаратов были разработаны в Томском политехническом университете. Внешний вид лабораторно-исследовательского стенда опорного обезвешивания приведен на рисунке 8а. Система активного опорного обезвешивания реализована на базе мобильной робототехнической платформы Kuka Youbot, представлена на рисунке 8б. Для определения углов поворота использован контроллер Arduino Uno, фиксирующий показания энкодеров и передающий данные в контроллер робота.

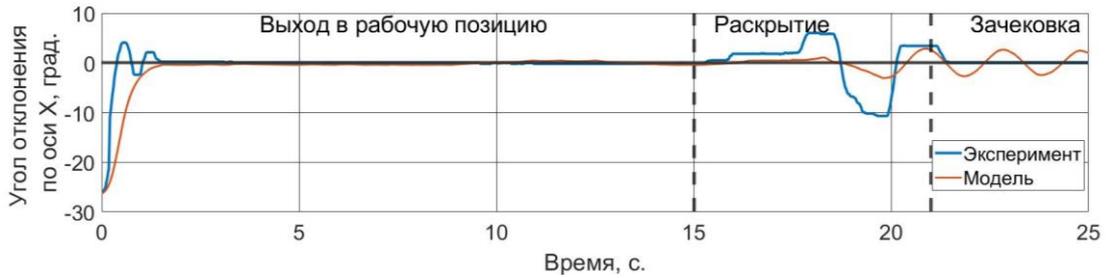


**Рис. 8а.** Внешний вид лабораторно-исследовательского стенда опорного обезвешивания солнечной панели

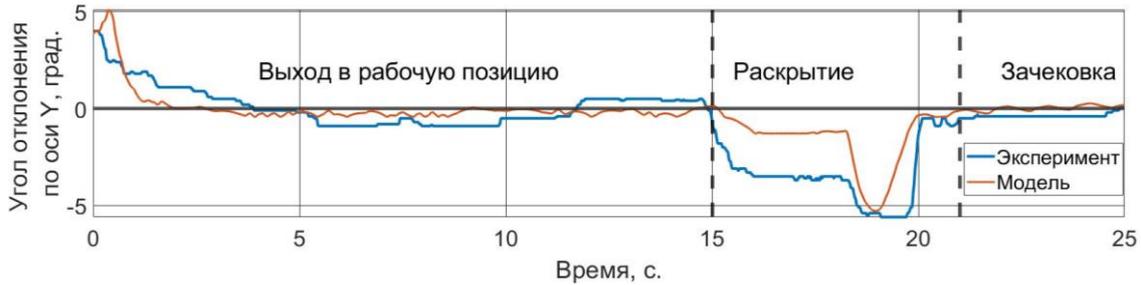


**Рис. 8б.** Внешний вид активной опорной системы обезвешивания на основе Kuka YouBot

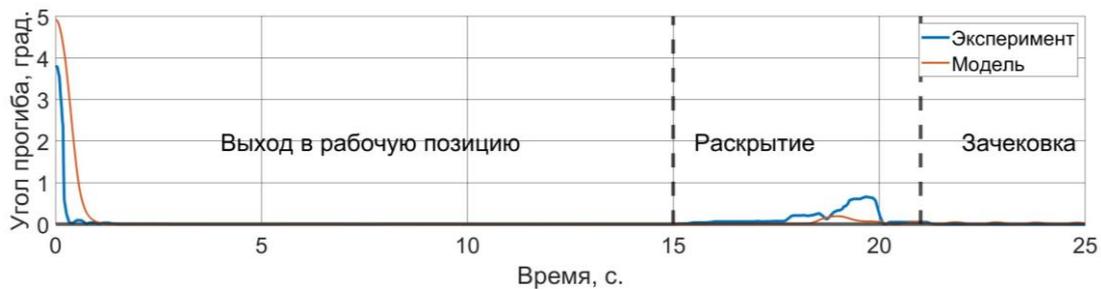
Перед проведением эксперимента односекционная солнечная батарея была приведена в сложное положение, а опорная система обезвешивания установлена с ошибкой по углам отклонения опорной стойки. В процессе эксперимента опорная система должна предварительно скомпенсировать ошибку по углам отклонения (выход в рабочее положение), после чего происходит процесс раскрытия, до зачехловки всех элементов, в ходе которой система управления опорной системой обезвешивания также должна компенсировать отклонение опорной стойки от вертикального положения. Экспериментальные переходные характеристики по углам отклонения опорной стойки от вертикального положения, в сравнении с результатами моделирования, представлены на рисунках 9а-в.



**Рис. 9а.** Переходные процессы работы системы активного опорного обезвешивания по углу отклонения по оси X



**Рис. 9б.** Переходные процессы работы системы активного опорного обезвешивания по углу отклонения по оси Y



**Рис. 9в.** Переходные процессы работы системы активного опорного обезвешивания по углу прогиба

По данным переходным характеристикам работы математической модели и натурального стенда видно, что, во-первых, в режиме «выход в рабочее положение» время переходного процесса составляет 1,66 с. и 1,63 с. соответственно. Во-вторых, в режиме «раскрытие» максимальная динамическая ошибка у модели составила: по оси X =  $-3^\circ$ , по оси Y =  $-5,2^\circ$ , по углу прогиба =  $0,19^\circ$ , а у натурального эксперимента: по оси X =  $-10,7^\circ$ , по оси Y =  $-5,6^\circ$ , по углу прогиба =  $0,66^\circ$ . В-третьих, в режиме «зачековка» у модели частота колебаний равна 2,3 с., а максимальная ошибка по углу прогиба –  $0,05^\circ$ , при этом у натурального эксперимента частота колебаний равна 2,4 с., а максимальная ошибка по углу прогиба –  $0,055^\circ$ . Анализ данных численных показателей позволяет сделать вывод о работоспособности разработанной системы обезвешивания, верифицирует полученную модель и возможности ее применения для производственных задач испытаний механизмов раскрытия панелей солнечных батарей космических аппаратов.

Для отработки режимов работы четырехтросовой системы обезвешивания был также разработан лабораторно-исследовательский стенд (рисунок 10). Он состоит из четырех управляемых электролебедок с двигателями постоянного тока

МУ6812 мощностью 180 Вт., редукторами РЧ-58,5 с передаточным числом 1:64 и оптическими энкодерами с точностью 600 импульсов на оборот, установленными на выходном валу редуктора.



**Рис. 10.** Внешний вид лабораторно-исследовательского стенда по 4-х тросовому обезвешиванию.

Дискретизация уровня значений по углу поворота лебедки, которая определяется данным энкодером, составляет  $0,6^\circ$ , что при диаметре лебедки 0,2 м. составляет 1 мм.

Управление двигателями осуществляется отладочной платой Nucleo-144 на базе микроконтроллера STM32F429 при помощи 2-х канальных H-мостов на базе Mosfet транзисторов IRLR7843 с гальванической развязкой с установленным датчиком тока.

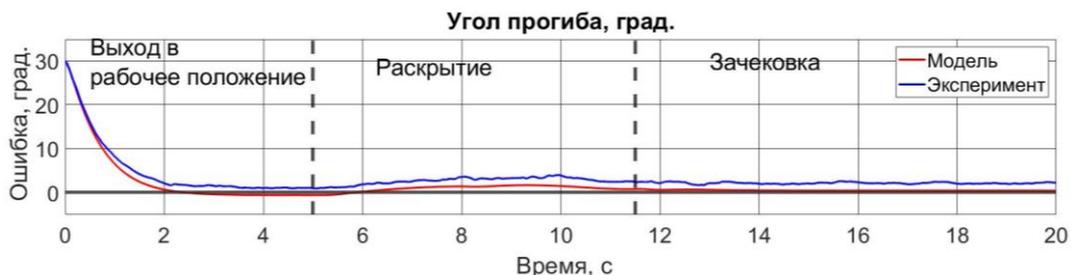
На лабораторно-исследовательском стенде были получены переходные характеристики, представленные на рисунках 11а-в.



**Рис. 11а.** Переходные процессы работы системы активного 4-х тросового обезвешивания по ошибке отклонения по оси X



**Рис. 11б.** Переходные процессы работы системы активного 4-х тросового обезвешивания по ошибке отклонения по оси Y.



**Рис. 11в.** Переходные процессы работы системы активного 4-х тросового обезвешивания по углу прогиба.

Анализ полученных переходных характеристик по интегральной оценке квадратичной ошибки показал, что отклонение экспериментальных данных от

модельных составляет не более 8%. Кроме того, основные показатели качества, такие как максимальная динамическая ошибка в режиме «Раскрытие» (по оси X у натурального эксперимента –  $8,9^\circ$ , у модели –  $6,1^\circ$ ) и время переходного процесса (у натурального эксперимента – 1,7 с., у модели – 1,6 с.), сопоставимы с модельными результатами, что также подтверждает достоверность расчетных результатов.

### **Основные результаты диссертационной работы**

1. Разработана математическая модель активной опорной системы обезвешивания, позволяющая исследовать динамику работы систем при различной компоновке кинематической схемы, параметрах исполнительных элементов и весе обезвешиваемого элемента.
2. Разработана математическая модель активной четырехтросовой системы обезвешивания, позволяющая исследовать динамику работы системы при различной компоновке кинематической схемы, параметрах исполнительных элементов и весе обезвешиваемого элемента.
3. Предложена оригинальная методика проектирования систем обезвешивания, которая позволяет осуществить выбор типа и количества элементов системы обезвешивания, а также определять их положение в зависимости от параметров обезвешиваемого элемента и накладываемых ограничений.
4. Разработаны математические модели с сохранением структуры и координат реальной системы обезвешивания и программное обеспечение, описывающие исполнительные механизмы и два варианта активных систем обезвешивания конструкций космических аппаратов - опорную и четырехтросовую.
5. Разработаны системы управления одноканальной активной опорной и активной четырехтросовой системой обезвешивания, позволяющие осуществлять с заданной точностью компенсацию ошибок слежения по углам отклонения опорной стойки от вертикального положения.
6. Разработана система управления опорной системой обезвешивания с итерационной оптимизацией коэффициентов регулятора на основе генетического алгоритма, позволившая снизить динамическую ошибку слежения по осям движения мобильной платформы, в режиме «раскрытие» по сравнению с применением стандартно настроенного ПИД-регулятора с  $11^\circ$  до  $4^\circ$ .
7. Проведены натурные исследования одноканальных активных опорной и четырехтросовой систем обезвешивания на исследовательских стендах, показавшие совпадение в 92% по углу прогиба с результатами математического моделирования.

Анализ полученных результатов в теоретической и практической части диссертационного исследования показал перспективность продолжения работ в данном направлении. Особый интерес представляет развитие активных систем обезвешивания, построенных на гибридном принципе. В качестве дополнительных областей применения полученных результатов могут служить транспортные системы, в том числе состоящие из нескольких распределенных в пространстве подсистем.

### **Список публикаций по теме диссертации:**

**В изданиях, рекомендованных ВАК по специальности диссертации:**

1. Беляев А. С. Проектирование системы опорного активного обезвешивания элементов космического корабля с применением Matlab Simulink / А. С. Беляев, А. В. Тырышкин, А. А. Филипас // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Наука о природе и технике. – 2020. – № 7. С. 34-41.
2. Четырехтросовая система обезвешивания с управлением по вектору силы / А. С. Беляев, А. А. Филипас, В. В. Курганов, Н. И. Поберезкин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 98-106.

**В изданиях, рекомендованных ВАК по смежной специальности:**

3. Методика расчета системы обезвешивания крупногабаритных трансформируемых элементов космических аппаратов при наземных испытаниях / А. С. Беляев, А. А. Филипас, А. В. Цавнин, А. В. Тырышкин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 1. С. 106-120.

**Научные публикации по теме диссертации в рецензируемых изданиях, входящих в Scopus и Web of Science**

4. Belyaev A. S. Hybrid control algorithm based on LQR and genetic algorithm for active support weight compensation system / A. S. Belyaev, O. Y. Sumenkov // IFAC-PapersOnLine. – 2021. – Vol. 54. – № 13. – P. 431-436.

**Объекты интеллектуальной собственности**

5. Патент на изобретение RU 2744925 C1, МПК В25J 5/00 (2021.02); В64G 7/00 (2021.02). Устройство для обезвешивания элементов космических аппаратов при наземных испытаниях : № 2020115741 : заявл. 13.05.2020 : опубликовано 17.03.2021 / Беляев А.С., Тырышкин А.В., заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» – 10 с. : ил. – Режим доступа : ФИПС. – Текст : электронный.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022617266 Программное обеспечение для определения траекторий передвижения обезвешиваемых элементов во время испытаний / Иванов Е.А., Беляев А.С., Брылев О.А. – №2022611205; заявл. 28.01.2022; опубл. 19.04.2022.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022661483 «Программное обеспечение для микроконтроллерного управления стендом по 4-х тросовому обезвешиванию» / Беляев А.С., Иванов Е.А., Брылев О.А. – №2022616280/69; заявл. 12.04.2022; опубл. 22.06.2022.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661595 «Программное обеспечение для управления опорной системой обезвешивания» / Беляев А. С., Шаманин О. М., Брылев О. А. – № 2022616601 ; заявл. 14.04.2022; опубл. 23.06.2022.

**Материалы и труды всероссийских и международных конференций**

9. Sumenkov O. Y. Comparison of control methods for inverted 2-degree of freedom pendulum mounted on the cart / O. Y. Sumenkov, A. S. Belyaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1118, № 1. – P. 012017.
10. Беляев А.С. Системы обезвешивания трансформируемых элементов космических аппаратов при их наземных испытаниях/А.С. Беляев // Актуальные научные исследования: сборник статей XI Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2023. – С. 114-117.
11. Беляев А. С. Имитационная модель системы опорного обезвешивания элементов космических аппаратов / А. С. Беляев, А. А. Филипас, А. В. Тырышкин // Материалы XXIV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева – 2020 С. 60-62.
12. Разработка опорной системы обезвешивания элементов космических аппаратов при раскрытии в земных условиях / А.С. Беляев, А.А. Филипас, А.В. Тырышкин, А.С. Ельцов. // Сборник трудов XV всероссийской конференции «Перспективные системы и задачи управления» 2020. – С. 314-317.
13. Филипас А.А., Беляев А.С., Цавнин А.В., Концепция расчета системы обезвешивания элементов космических аппаратов при их наземных испытаниях с использованием методов интервальной неопределенности // сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции. Военный инновационный технополис "ЭРА". Анапа, 2020. С. 26-31.
14. Козлова, Н. А. Моделирование 3-х секционной солнечной батареи с системой опорного обезвешивания / Н. А. Козлова, А. С. Беляев // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 21-25 марта 2022 г., г. Томск. – Томск : Изд-во ТПУ, 2022. – С. 271-272.
15. Беляев, А. С. Применение генетического алгоритма для синтеза параметров линейно-квадратичного регулятора опорной системы обезвешивания / А. С. Беляев, О. Ю. Суменков // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 22-26 марта 2021 г., г. Томск. – Томск : Изд-во ТПУ, 2021. – С. 405-406.
16. Беляев, А. С. Разработка и исследование имитационной модели гибкого подвеса в Matlab Simulink / А. С. Беляев, А. С. Галданова // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 22-26 марта 2021 г., г. Томск. – Томск : Изд-во ТПУ, 2021. – С. 377-378.
17. Беляев А. С. Имитационная модель гибкой тросовой системы обезвешивания в MATLAB Simulink / А. С. Беляев, А. А. Филипас // Проблемы машиноведения: Материалы V Международной научно-технической конференции, Омск, 16–17 марта 2021 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2021. – С. 153-157.