

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи



Кикина Анна Юрьевна

**РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА
ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ АНТРОПОМОРФНЫХ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПРОГРАММ**

Специальность 2.5.13. – «Проектирование, конструкция, производство,
испытания и эксплуатация летательных аппаратов»

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

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Белявский Александр Евгеньевич

Москва - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный **Белявский Александр Евгеньевич**

руководитель: доктор технических наук, доцент

Официальные **Потапов Андрей Николаевич**

оппоненты: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная техника и информационные системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (ФГБОУ ВО «ВГЛУ»), г. Воронеж

Толстель Олег Владимирович

кандидат технических наук, доцент ОНК «Институт высоких технологий» ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград

Ведущая Федеральное государственное бюджетное учреждение
организация: "Центральный научно-исследовательский институт военно-воздушных сил" Министерства Обороны Российской Федерации

Защита состоится «25» декабря 2025 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.09 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте: <https://mai.ru/upload/iblock/003/nuh1vzrdodyxmulljndes9d0ejk0uhlg/DISSERTATSIYA-KIKINA-S-PODPISYU.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП -3, Волоколамское шоссе, д.4. Ученый совет МАИ

Ученый секретарь диссертационного совета

24.2.327.09, к.т.н., доцент



Д.Ю. Стрелец

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Планируемое развертывание долговременной Российской орбитальной станции (РОС), разработка пилотируемого транспортного корабля (ПТК) и лунная исследовательская программа обуславливают необходимость разработки и интегрирования в космические летательные аппараты (КЛА) новых систем, в том числе, бортовых антропоморфных робототехнических систем (АРТС), предназначенных для формирования совместных «человеко-машинных» экипажей пилотируемых экспедиций.

Бортовая антропоморфная робототехническая система КЛА – комплексная система, включающая автоматического человекоподобного робота с антропоморфными действиями и инфраструктуру управления роботом с человеко-машинным интерфейсом, предназначенная для поддержки деятельности космонавтов (в частности, при управлении бортовым оборудованием, научной аппаратурой) и для замещения деятельности космонавтов, – особенно актуально для орбитальных космических станций посещения, в перспективе – для напланетных баз.

Возможные варианты управления бортовой АРТС:

1. В интерактивном «копирующем» режиме – космонавтом, находящимся на борту станции, с помощью задающего устройства копирующего типа (ЗУКТ) с отображением обратной связи по усилию и с модулем визуализации;
2. В автоматическом режиме – по предварительно сформированным программам, в том числе, с применением методов «машинного» обучения;
3. В супервизорном режиме, в том числе с использованием технологии голосового управления.

Копирующее управление исполнительными устройствами (манипуляторами) АРТС является динамично развивающимся направлением развития робототехники. В основе копирующего управления лежит одновременное формирование законов движения по всем степеням подвижности манипуляторов АРТС через устройство для передачи движений оператора – ЗУКТ. ЗУКТ в совокупности с технологиями виртуальной реальности позволяет реализовать эффект виртуального присутствия. Копирующее управление АРТС положительно зарекомендовало себя при работе в недетерминированной вариативной, а иногда и экстремальной окружающей среде за счет применения естественного интеллекта человека в качестве системы анализа условий работы, принятия необходимых решений и выбора рациональных алгоритмов выполнения целевых операций.

Копирующее управление манипуляторами АРТС имеет ряд проблем, главной из которых является недостаточная точность выполнения целевых операций.

В соответствии с изложенным, актуальной задачей является разработка расчетно-экспериментального метода повышения точности позиционирования исполнительных органов АРТС для перспективных пилотируемых космических программ, основанного на введении искусственных параметров, задаваемых оператором базовых целевых операций, реализуемого на предварительном этапе, проводимом в наземных условиях, и на этапе выполнения космической программы.

Степень разработанности темы. Разработка и исследование систем копирующего управления манипуляторами роботов осуществляется в отечественных и зарубежных научно-исследовательских и образовательных учреждениях, – ЦНИИ РТК, МГТУ «СТАНКИН», институт механики МГУ, ЮФУ, ИТМО, МФТИ, ТПУ, ТГУ, СПбГПУ, НИУ МЭИ, ДГТУ, АО НПО «Андроидная техника», Telesistence, Kuka, TheBostonUniversityRoboticsLab, KAIST, FudanUniversity, HondaRobotics, SarcosRobotics, KawadaHeavyIndustries, Toyota и др. Существенный вклад в исследование копирующего управления манипуляторами внесли ведущие научные коллективы под руководством таких известных ученых, как Кутлубаев И.М., Лукьянов Е.А., Бохонский А.И., Павловский В.Е., Юревич Е.И., Кулешов В.С., Лакота Н.А., Pol R., Егоров И.Н., Готлиб Б.М., Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Пшихопов В.Х., Махдавыян М., Хурс С.П., Cela A.F., Javier Y.J., Kanoun O., Lamiriaux F., Liu H., Stoll N.

Для решения представленной задачи в диссертационной работе предлагается расчетно-экспериментальный метод повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС при копирующем управлении манипуляторами АРТС.

Объектом исследования является бортовая АРТС с управлением копирующего типа с помощью ЗУКТ.

Предметом исследования являются расчетно-экспериментальный метод повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС при копирующем режиме управления бортовой АРТС с помощью ЗУКТ.

Целью работы является разработка расчетно-экспериментального метода повышения точности позиционирования исполнительных органов антропоморфных робототехнических систем для перспективных пилотируемых космических программ (ППКП).

Для достижения цели сформулированы следующие основные задачи:

- разработка расчетно-экспериментального метода повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС, основанного на введении искусственных параметров, задаваемых оператором базовых целевых операций, реализуемого на предварительном этапе, проводимом в наземных условиях, и на этапе выполнения космической программы;

– разработка алгоритма повышения точности целевой операции попадания манипулятором бортовой АРТС рычага управляющего устройства в заданный угол поворота на основе построения полиномиальной регрессионной зависимости угла отклонения управляющего устройства космонавта-оператора от угла отклонения рычага управляющего устройства бортового АРТС;

– разработка алгоритма повышения точности базовой целевой операции позиционирования точки на рабочей поверхности бортовой АРТС, основанного на методе машинного обучения Случайный лес;

– проведение экспериментального исследования точности позиционирования углов поворота рычага управляющего устройства и позиционирования точки на рабочей поверхности бортовой АРТС;

– разработка программного обеспечения для обработки результатов эксперимента, реализации алгоритмов повышения точности базовых целевых операций и метода повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в том, что автором впервые получены следующие научные результаты:

1. Расчетно-экспериментальный метод повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС, основанный на введении искусственных параметров, задаваемых оператором базовых целевых операций, реализуемый на предварительном этапе, проводимом в наземных условиях, и в условиях выполнения космической программы.

2. Алгоритм повышения точности базовой целевой операции попадания манипулятором бортовой АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота, на основе построения полиномиальной регрессионной зависимости угла отклонения управляющего устройства космонавта-оператора от угла отклонения рычага управляющего устройства бортового АРТС.

3. Алгоритм повышения точности базовой целевой операции позиционирования точки на рабочей поверхности бортовой АРТС, основанный на методе машинного обучения Случайный лес.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и развитии метода и алгоритмов повышения точности целевых операций бортовой АРТС, реализуемых на предварительном этапе, проводимом в наземных условиях, и в условиях выполнения космической программы; в определении возможностей и особенностей коллаборации бортовых АРТС для поддержки деятельности экипажей в ППКП; в исследовании потенциальных направлений и перспективных вариантов коллаборации бортовых АРТС для операционной поддержки деятельности экипажей в ППКП.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается:

- в разработке методики проведения эксперимента для получения аппроксимирующих регрессионных зависимости между параметрами, задаваемыми рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и параметрами, получаемыми в результате работы рукой бортовой АРТС;
- в построении регрессионных зависимостей для повышения точности базовых целевых операций, в том числе, попадания манипулятором бортовой АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота и повышения точности позиционирования точки на рабочей поверхности бортовой АРТС, заводской номер БПАГ.442468.005, совмещенной с мобильной платформой, заводской номер БПАГ.452838.004, управляемой ЗУКТ, заводской номер 426471.005.001, для использования бортовой АРТС в программе РОС, перспективном транспортном корабле и лунной программе;
- в разработке специального программного обеспечения алгоритма повышения точности базовых целевых операций;
- в разработке конструкции рычага управляющего устройства и реализации изготовления рычага на 3 – D принтере.

Методология и методы исследования. Методологическую основу исследований составили труды отечественных и зарубежных ученых в области проектирования АРТС, используемых для поддержки деятельности экипажей в ППКП. В основу проведенных исследований легли методы математической статистики, дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа, методы машинного обучения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Расчетно-экспериментальный метод повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС, основанный на введении искусственных параметров, задаваемых оператором базовых целевых операций.
2. Алгоритм повышения точности целевой операции попадания манипулятором АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота.
3. Алгоритм повышения точности целевой операции позиционирования точки на рабочей поверхности АРТС.
4. Специальное программное обеспечение алгоритмов повышения точности целевых операций попадания манипулятором АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота и позиционирования точки на рабочей поверхности АРТС.

5. Аппроксимирующие регрессии между углами поворота рычага управления оператором посредством ЗУКТ и углами поворота рычага управления АРТС; между координатами точек, устанавливаемых рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и точек, устанавливаемых рукой АРТС.

Достоверность полученных результатов. Допущения, принятые при разработке математических моделей, подтверждены многочисленными исследованиями в практике проектно-конструкторских организаций. Заключение по диссертационной работе подтверждается и иллюстрируются проведенными экспериментальными исследованиями с участием космонавтов, показавших выполнение целевой операции попадания манипулятором АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота с точностью не менее 90% и целевой операции по позиционированию точек на рабочих плоскостях оператора и АРТС с точностью не менее 81%.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международных и отечественных конференциях, научных чтениях и семинарах, в том числе на XLVIII (48-х) Академических чтениях по космонавтике. – Реутов, XLIX Общественно-научных чтениях, посвященных памяти Ю.А. Гагарина г. Гагарин Смоленской области, 9 – 12 марта 2023 г., пятнадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» Санкт-Петербург, 20 – 24 марта 2023 г., 22-й Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 20 – 24 ноября 2023 г., XV Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос», Звездный городок, 15 – 17 ноября 2023 г., XVIII конференции по космической биологии и авиакосмической медицине с международным участием «Земля – орбита – дальний космос», Москва, 7 – 9 ноября 2023 г., 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku, Azerbaijan, 2–6 October 2023, 58-х научных чтениях, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга, 18–21 сент. 2023 г., XVI Всероссийской мультikonференции по проблемам управления, МКПУ-2023, Волгоград, 11–15 сентября 2023 г., 20-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2021», Москва, 18–22 ноября 2021 г., XIV Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полёты в космос», Звездный Городок, 17 – 19 ноября 2021 г., Донецком международном круглом столе "Искусственный интеллект: теоретические аспекты и практическое применение", Донецк, 7 – 27 мая 2021 г., XXVII Годи́чной научной международной конференции Института истории естествознания и техники имени С.И. Вавилова РАН, Москва – Санкт-Петербург, 17 – 21 мая 2021 г.

Публикации. Содержание диссертации изложено в двадцати одной публикации: из них в журналах Перечня ВАК К2 – восьми; в сборниках тезисов докладов научных конференций – тринадцати.

Личный вклад автора. Автор диссертационной работы самостоятельно успешно комплексно исследовал поставленную научную задачу по разработке расчетно-экспериментального метода повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС, основанного на введении искусственных параметров задаваемых оператором базовых целевых операций, что подтверждается результатами разработанных математических моделей, алгоритмов, экспериментальных исследований, а также уровнем их реализации.

Все результаты работы получены автором самостоятельно, и в случае использования результатов других исследований в диссертации указаны соответствующие ссылки на литературные источники. В работах, выполненных в соавторстве, вклад соискателя состоит в определении возможности и особенности коллаборации АРТС для поддержки деятельности экипажей в ППКП, определении потенциальных направлений и перспективных вариантов коллаборации АРТС для операционной и информационной поддержки деятельности экипажей в ППКП, проведении экспериментального исследования точности позиционирования углов поворота рычага управляющего устройства и позиционирования точки на рабочей поверхности АРТС, разработке программного обеспечения для обработки результатов эксперимента, разработке расчетно-экспериментального метода и алгоритма повышения точности целевой операции попадания манипулятором АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота, разработке расчетно-экспериментального метода и алгоритма повышения точности целевой операции позиционирования точки на рабочей поверхности АРТС, реализуемых на предварительных этапах подготовки, проводимых в наземных условиях, и на этапе выполнения космической программы.

Основные результаты диссертационной работы реализованы и представлены актами реализации:

1. ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»;
2. в МАИ (НИУ) использованы в учебном процессе кафедры 614 «Экология, системы жизнеобеспечения и безопасность жизнедеятельности» и при разработке рабочих программ по специальности шифр 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» по специализации «Системы обеспечения жизнедеятельности летательных аппаратов» по дисциплинам «Теория автоматического управления», «Введение в специальность», «Введение в авиационную и ракетно-космическую технику».

Структура работы и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа

содержит 131 страницы, 4 таблицы, 37 рисунков; список литературы включает 101 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, рассмотрена степень разработанности темы, представлены объект и предмет исследования, сформулированы цель работы и задачи, раскрыты научная новизна, теоретическая значимость работы и практическая значимость научных результатов, методология и методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, представлены апробация результатов диссертационной работы, публикации и личный вклад автора.

В первой главе проведен анализ потенциальных направлений и перспективных вариантов коллаборации бортовой АРТС для поддержки деятельности экипажей в ППКП в проекции на РОС и лунную программу, включающие:

- выполнен обобщенный анализ современных технологий и проблем обеспечения интерфейса взаимодействия космонавтов и АРТС;
- вскрыты при проведении экспериментальных исследований проблемные направления исследований интерфейса взаимодействия космонавтов с АРТС, способствующего их коллаборации;
- рассмотрены возможные варианты экспериментальных исследований и космических экспериментов по космической робототехнике, способствующие формированию интерфейса взаимодействия космонавтов с АРТС.

Перспективным направлением российской космической программы является разработка и внедрение бортовых АРТС для обеспечения поддержки внутри-и-внекорабельной деятельности космонавтов на РС МКС, а также использования их в дальнейшем в составе элементов перспективной космической инфраструктуры и напланетных (лунных) баз (Рисунок 1).

Предполагается крепление на рабочие места роботизированных манипуляторов бортовых АРТС (Рисунок 2).

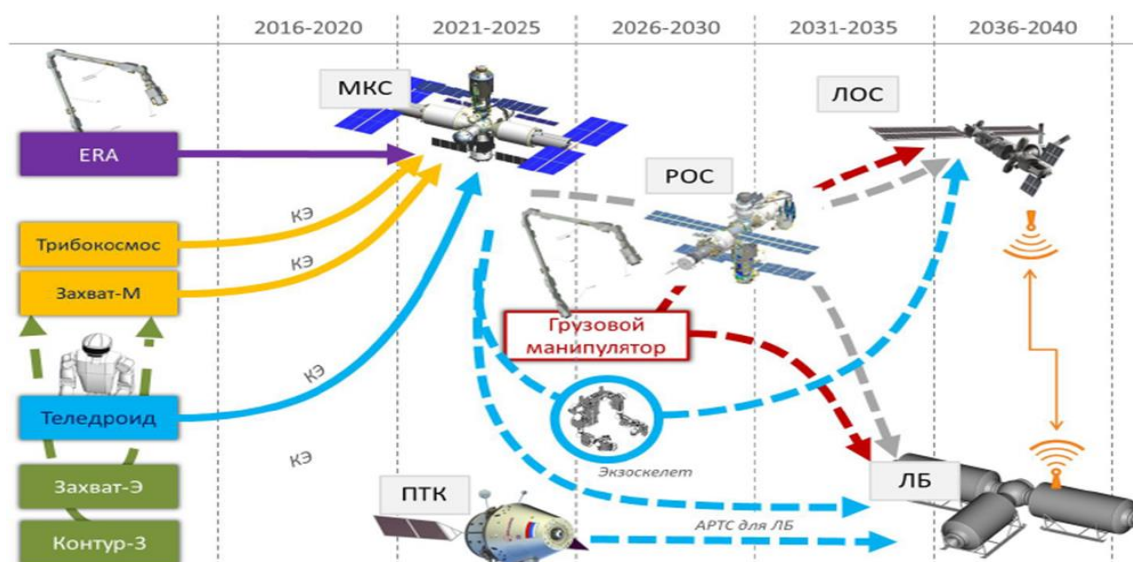


Рисунок 1 – Принятые ГК «Роскосмос» актуальные направления развития робототехнических систем

Бортовые АРТС являются инновационными системами ракетно-космического комплекса, требующими новых подходов к конструированию и эксплуатации. Так в перспективной РОС предусмотрена система роботизированных помощников для внекорабельной деятельности обслуживания и диагностики станции и космических аппаратов, заложен принцип обслуживания АРТС всей наружной поверхности.

Для лунной программы разработана совмещенная АРТС и мобильная платформа для выполнения работ на Лунной поверхности (Рисунок 3).



Рисунок 2 – Крепление бортовых АРТС на рабочие места роботизированных манипуляторов

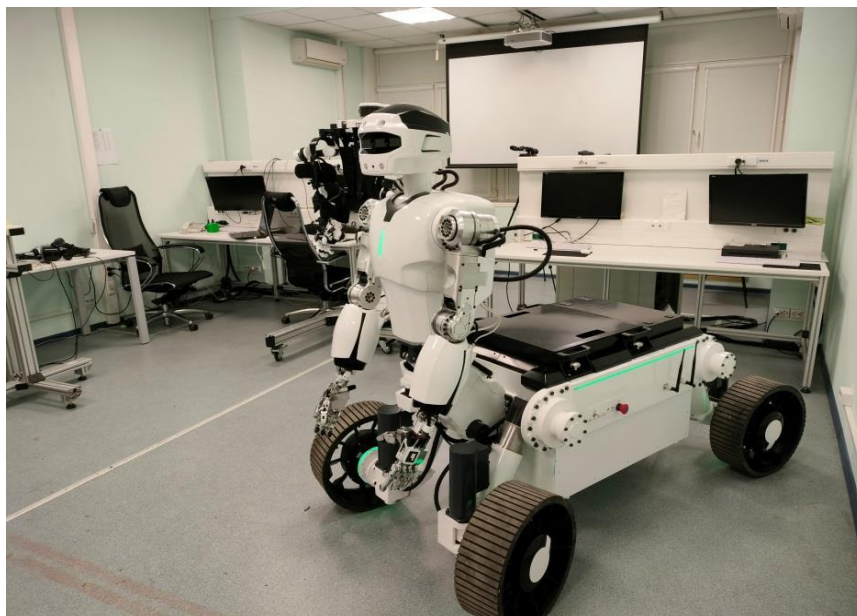


Рисунок 3 – Совмещенная АРТС и мобильная платформа

Отмечено, при работе космонавта-оператора в копирующем режиме управления бортовой АРТС, использующего для формирования управляющих сигналов ЗУКТ, возникает рассогласование движений космонавта-оператора и АРТС. На основе проведенного анализа выявлена необходимость разработки расчетно-экспериментального метода повышения точности позиционирования исполнительных органов антропоморфной робототехнической системы для перспективных пилотируемых космических программ.

Во второй главе предложен расчетно-экспериментальный метод повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС (Рисунок 4).

Основу метода составляет разработанное математическое обеспечение по определению искусственных параметров, задаваемых оператором базовых целевых операций. Метод предполагает проведение наземных экспериментов для установления аппроксимирующей зависимости между параметрами, задаваемыми рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и параметрами, получаемыми в результате работы рукой бортовой АРТС. Для каждой базовой целевой операции разрабатывается алгоритм повышения точности. С помощью построенной математической модели предлагается введение и пересчет искусственных параметров, передаваемых через программный модуль на персональном компьютере (ПК) оператора к бортовой АРТС, что позволяет повысить точность выполнения базовой целевой операции. Последовательное применение алгоритмов повышения точности базовых целевых операций бортовой АРТС при управлении с использованием ЗУКТ позволяет повысить точность позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС.

На первом этапе, проводящемся на Земле во время предполетной подготовки, имеет место декомпозиция программы работы бортовой АРТС на базовые целевые операции. Для каждой базовой целевой операции разрабатывается алгоритм повышения точности. Следующий шаг заключается в проведении наземного эксперимента для получения данных по рассогласованию движений космонавта-оператора и бортовой АРТС.

Для математической формализации задачи построения множественной регрессии введены следующие переменные: $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_p)$ – входная векторная переменная с компонентами $X_j, j = 1, \dots, p$, характеризующая бортовую АРТС; $\mathbf{Y} = (Y_1, \dots, Y_k)$ – выходная векторная переменная с количественными значениями $Y_j, j = 1, \dots, k$, характеризующая космонавта-оператора; $(x_i, y_i); i = 1, \dots, n$ – множество измерений, полученное в результате проведения n экспериментов.

На основании результатов эксперимента устанавливается регрессия, аппроксимирующая зависимость между параметрами, задаваемыми рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и параметрами, получаемыми в результате работы рукой бортовой АРТС:

$$\begin{cases} Y_1 = f_1(X_1, \dots, X_p) \\ \dots \\ Y_k = f_k(X_1, \dots, X_p) \end{cases} \quad (1)$$

На втором этапе, проходящем во время космического полета, с помощью полученных регрессий осуществлены введение и пересчет искусственных параметров, передаваемых через программный модуль на ПК космонавта-оператора к бортовой АРТС:

$$\begin{cases} Y_1^* = f_1(X_1, \dots, X_p) \\ \dots \\ Y_k^* = f_k(X_1, \dots, X_p) \end{cases} \quad (2)$$

Данный шаг метода проходит в режиме реального времени. Заключительным шагом является компиляция базовых целевых операций в программу работы и проведение программы работы бортовой АРТС.

Разработанный метод позволяет адаптировать полученные в результате земных экспериментов регрессионные зависимости к условиям космического полета за счет проведения дополнительных экспериментов по разработанной методике на орбите.

Перспективная лунная программа предполагает использование для поддержки деятельности экипажей при работе на поверхности Луны, перемещении, транспортировке грузов и производстве работ иного назначения совмещенные АРТС и мобильную платформу (Рисунок 5).

На базе ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина» проведено экспериментальное исследование по изучению точности управления космонавтом-оператором бортовой АРТС, заводской номер БПАГ.442468.005, совмещенной с мобильной платформой, заводской номер БПАГ.452838.004, управляемой ЗУКТ, заводской номер 426471.005.001, при проведении базовых целевых операций попадания рукой бортовой АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота и позиционирования точки на рабочей поверхности АРТС.

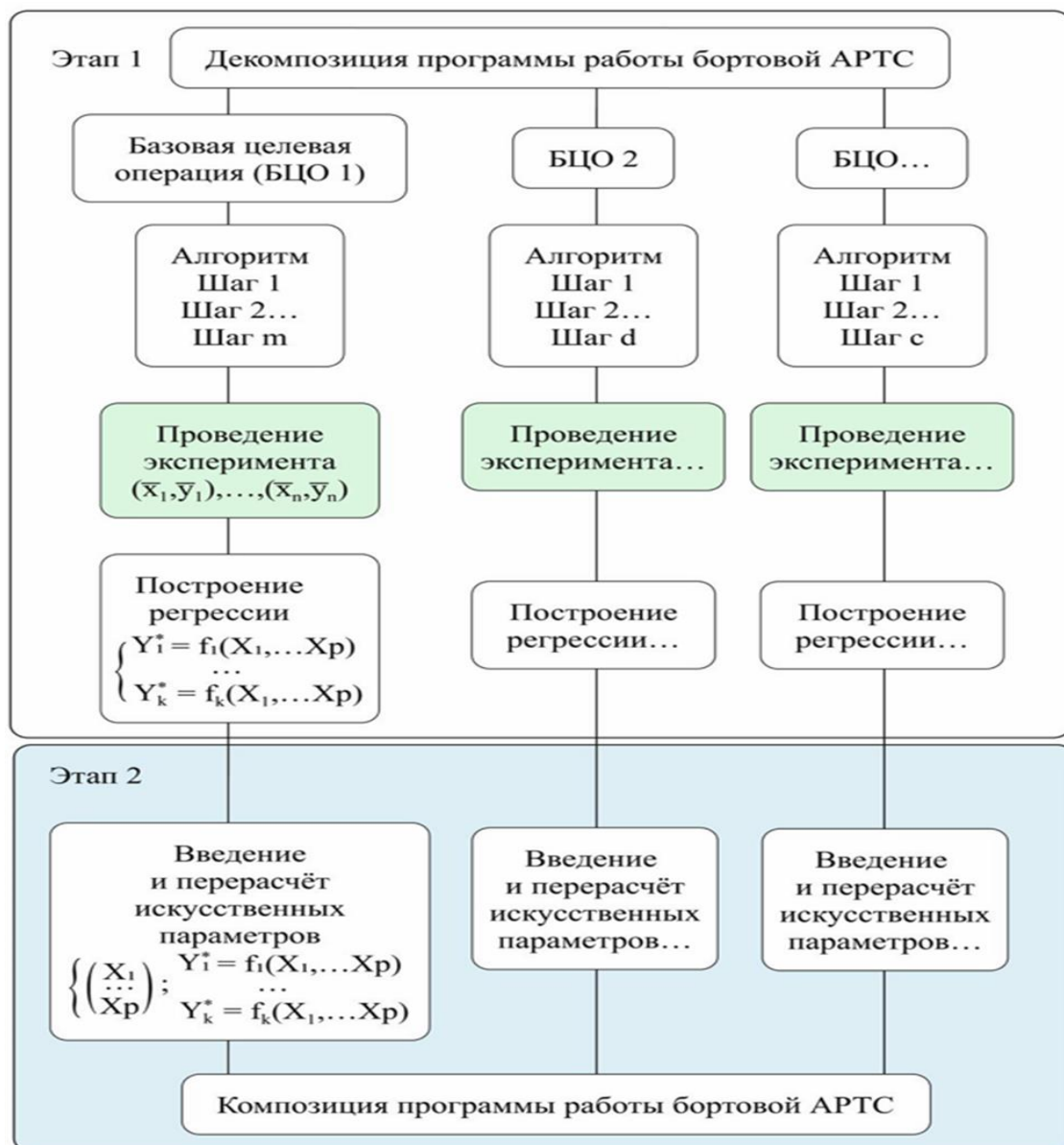


Рисунок 4 – Блок-схема расчетно-экспериментального метода повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС

Для проведения экспериментальных исследований разработаны требования и изготовлен специализированный рычаг управляющего устройства, связанный с ПК оператора. Конструкция специализированного рычага управляющего устройства позволяет работать с рычагом рукой человека-оператора и рукой бортовой АРТС.

Для изготовления основных элементов рычага управляющего устройства использована 3D-печать.

В третьей главе представлена разработка алгоритма повышения точности позиционирования углов поворота рычага управляющего устройства бортовой АРТС. Разработан алгоритм повышения точности базовой целевой операции попадания рукой бортовой АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота, основанный на построении аппроксимирующей зависимости между углами отклонения рычага управляющего устройства, устанавливаемых рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и углами отклонения рычага управляющего устройства, получаемых в результате работы рукой бортовой АРТС. С помощью новой математической модели предлагается введение и пересчет искусственных углов задающего устройства, передаваемых через программный модуль на ПК оператора к бортовой АРТС, что позволило повысить точность выполнения базовой целевой операции.

Для оценки параметров распределения рассогласования движений космонавта-оператора и бортовой АРТС при задаче угла поворота рычага управляющего устройства выбран метод Простой оценки Диксона и оценка с помощью выборочного размаха. Для оценки распределения экспериментальных данных по рассогласованию движений космонавта-оператора и бортовой АРТС использован критерий Колмогорова-Смирнова. Для построения аппроксимирующей регрессии выбран метод наименьших квадратов, устанавливающий зависимость между углами поворота рычага управляющего устройства космонавтом-оператором посредством ЗУКТ и углами поворота рычага управляющего устройства бортовой АРТС. На Рисунке 5 представлены функции распределения вероятности для бортовой АРТС.

На Рисунке 5 красным цветом изображена функция нормального распределения с вычисленными параметрами, синим цветом – функция распределения, построенная на экспериментальных данных.

На Рисунке 6 представлена регрессионная зависимость угла отклонения рычага управляющего устройства оператора от угла отклонения рычага управляющего устройства АРТС.

Построены аппроксимирующие регрессионные зависимости между углами отклонения, устанавливаемыми рукой трех космонавтов-операторов в ЗУКТ, и углами отклонения рычага управляющего устройства, получаемых в результате работы рукой бортовой АРТС.

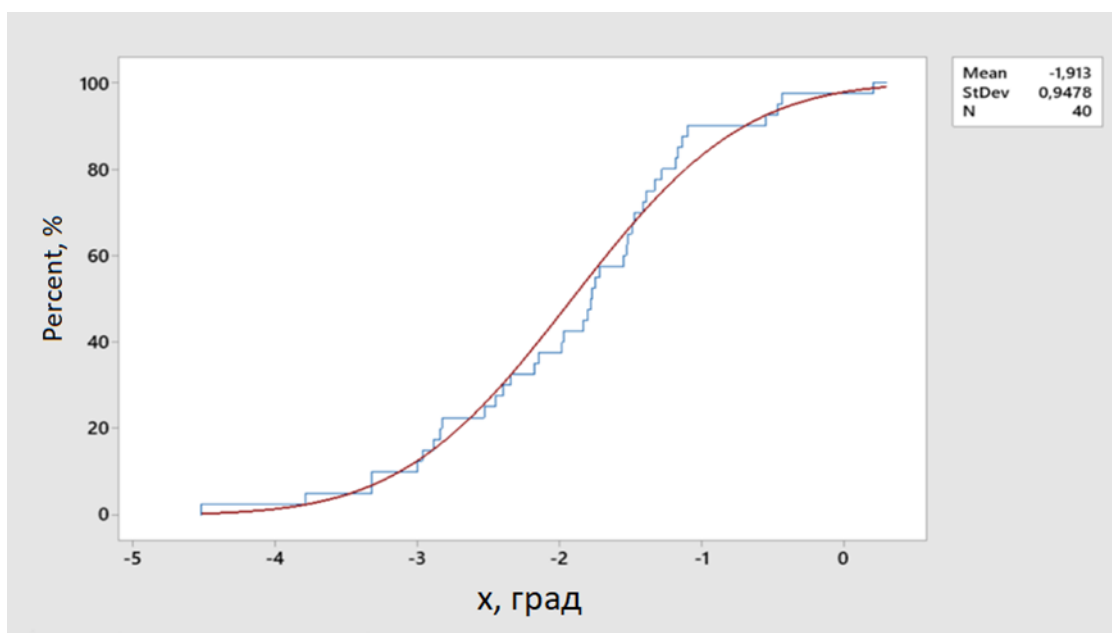


Рисунок 5 – Функции распределения вероятности для бортовой АРТС

В результате использования алгоритма обеспечивается выполнение целевой операции попадания рукой бортовой АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота с точностью не менее 90 %.

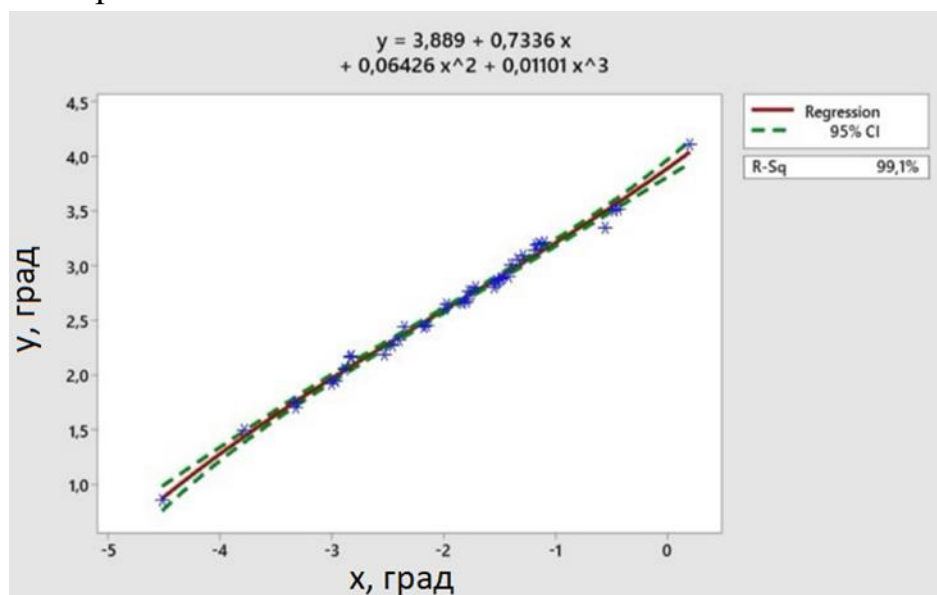


Рисунок 6 – Регрессионная зависимость угла отклонения рычага управляющего устройства оператора от угла отклонения рычага управляющего устройства АРТС

В Таблице 1 представлены регрессионные зависимости угла отклонения рычага управляющего устройства космонавта-оператора А.Ю. Кикиной от угла отклонения рычага управляющего устройства АРТС для восьми горизонтальных направлений отклонения рычага управляющего устройства. Для каждой регрессионной зависимости подсчитан уровень качества по показателю R^2 .

Таблица 1 – регрессионные зависимости угла отклонения рычага управляющего устройства космонавта-оператора А.Ю. Кикиной от угла отклонения рычага управляющего устройства АРТС

Оператор	Угол	Регрессия $y(x)$	R^2
К2	0	$y = 4,249 + 1,371x + 0,009x^2 - 0,003x^3$	97,97
	45	$y = 3,198 + 0,292x + 0,002x^2 - 0,001x^3$	97,65
	90	$y = -0,265 + 1,025x + 0,006x^2 - 0,005x^3$	97,49
	135	$y = -0,194 + 0,579x - 0,011x^2 + 0,001x^3$	96,04
	180	$y = 0,414 + 0,471x - 0,138x^2 + 0,025x^3$	96,39
	225	$y = 15,09 + 3,068x + 0,033x^2 - 0,002x^3$	96,77
	270	$y = 0,272 + 1,230x + 0,084x^2 + 0,005x^3$	97,27
	315	$y = -3,490 + 0,753x - 0,001x^2 - 0,001x^3$	97,57

Регрессионные зависимости получены с использованием программы Minitab 19 операционной среды MATLAB.

В четвертой главе представлен разработанный алгоритм повышения точности базовой целевой операции позиционирования точки на рабочей поверхности АРТС. В основе предлагаемого подхода лежит многомерная аппроксимирующая зависимость между координатами точек на рабочих плоскостях оператора и бортовой АРТС, которая относится к классу моделей множественной регрессии с множественными выходными переменными –откликами. При математической формализации задачи построения множественной регрессии и выбора статистической метрики оценки ее точности вводятся следующие переменные: $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_p)$ – входная векторная переменная с компонентами $X_j, j = 1, \dots, p$; $\mathbf{Y} = (Y_1, \dots, Y_k)$ – выходная векторная переменная с количественными значениями $Y_j, j = 1, \dots, k$. В результате проведения n экспериментов получено множество измерений $(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i); i = 1, \dots, n$, где $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})^T$ – вектор наблюдаемого в эксперименте значения входного вектора $\mathbf{X}$; $\mathbf{y}_i = (y_{i1}, \dots, y_{ik})^T$ – вектор -го наблюдаемого в эксперименте значения выходного вектора $\mathbf{Y}$.

Введены обозначения: $\hat{\mathbf{y}}_i = (\hat{y}_{i1}, \dots, \hat{y}_{ik})^T$ – вектор предсказания по модели регрессии -го значения вектора $\mathbf{Y}$; $\bar{\mathbf{y}} = (\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_k)^T$ – вектор среднего значения выходного вектора $\mathbf{Y}$, где $\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_{ji}; j = 1, \dots, k$.

Для оценки того, на сколько регрессия адекватно представляет данные, используется статистическая метрика – скорректированный коэффициент R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n ||\mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{y}}_i||^2}{\sum_{i=1}^n ||\mathbf{y}_i - \bar{\mathbf{y}}||^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}. \quad (3)$$

Аппроксимирующая регрессия нелинейна, и единственный метод, который обеспечивает требуемый уровень точности, — метод Случайного леса по каждой выходной переменной.

Для алгоритма Случайного леса подобраны параметры настройки, при которых устойчиво строятся регрессионные модели с требуемым уровнем точности. Принятые параметры алгоритма Случайного леса: $n_estimators = 160$, $max_depth = 20$, $max_features = 2$.

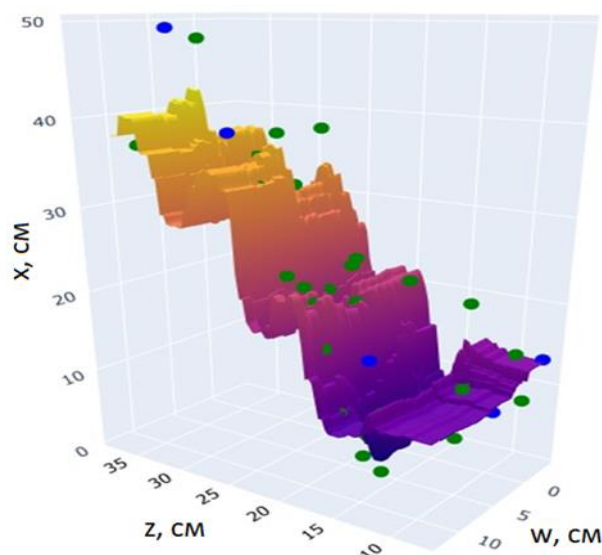
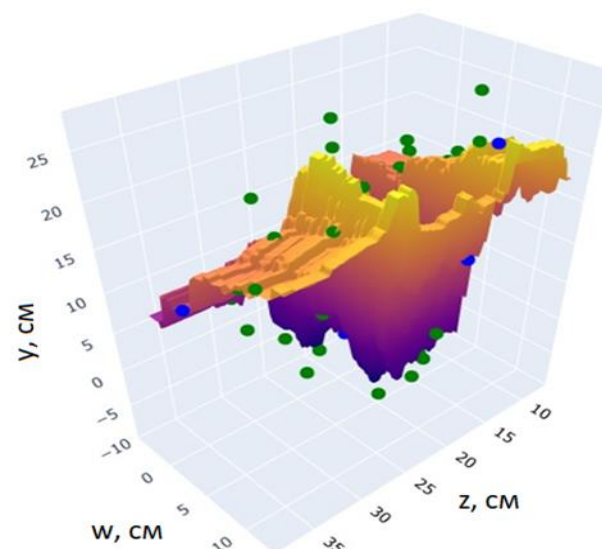
В наземных условиях для конкретного космонавта-оператора на основе проведенных им экспериментальных работ с бортовой АРТС проведено построение двумерной регрессии между координатами (x, y) точек на рабочей плоскости оператора и координатами (z, w) точек на рабочей плоскости АРТС в виде: $x = f_1(z, w)$; $y = f_2(z, w)$ на основе множества экспериментальных данных. Разработан Программный модуль 1 «Обучение», в котором реализован алгоритм Случайного леса по каждой выходной переменной для построения регрессий $x = f_1(z, w)$; $y = f_2(z, w)$

В результате расчетов на ПК получены искомые регрессионные зависимости. На Рисунке 7 приведена регрессия $x = f_1(z, w)$, на Рисунке 8 показана регрессия $y = f_2(z, w)$ с изображением точек обучающей выборки зеленым цветом, тестовой выборки синим цветом.

В космических условиях проведения работ с бортовой АРТС космонавтом-оператором через ПК передаются искусственные координаты требуемой рабочей точки для отработки бортовой АРТС, вычисляемые в разработанном программном модуле 2 «Позиционирование» с использованием хранящейся информации о построенной двумерной регрессии.

В результате обеспечено выполнение целевой операции по позиционированию точек на рабочих плоскостях оператора и бортовой АРТС с точностью не менее 81%.

На базе ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина» в лаборатории «Робототехники» реализован расчетно-экспериментальный метод повышения точности позиционирования исполнительных органов перспективной совмещенной бортовой АРТС с мобильной платформой.

Рисунок 7 – Регрессия $x = f_1(z, w)$ Рисунок 8 – Регрессия $y = f_2(z, w)$

Сформирована база аппроксимирующих регрессионных зависимостей для бортовой АРТС, совмещенной с мобильной платформой, управляемой с помощью ЗУКТ. Регрессии построены для конкретных космонавтов – операторов, участников эксперимента. Полученная база данных, программы «Обучение», «Позиционирование» и «Определение угла» интегрированы в структуру системы управления манипуляторами АРТС, Рисунок 9. Система копирующего управления манипуляторами бортовой АРТС включает следующие аппаратные части: 1 – оператор; 2 – ЗУКТ; 3 – персональный компьютер оператора; 4 – манипуляторы АРТС; 5 – операционная среда; 6 – средства видеонаблюдения; 7 – средства визуализации состояния операционной среды.

Поступающие в модуль формирования законов управления бортовой АРТС сигналы от ЗУКТ трансформируются в сигналы управления бортовой АРТС с учетом программ повышения точности целевых операций «Позиционирование» и «Определение угла», рассчитывающих искусственные координаты точки или угла поворота соответственно.

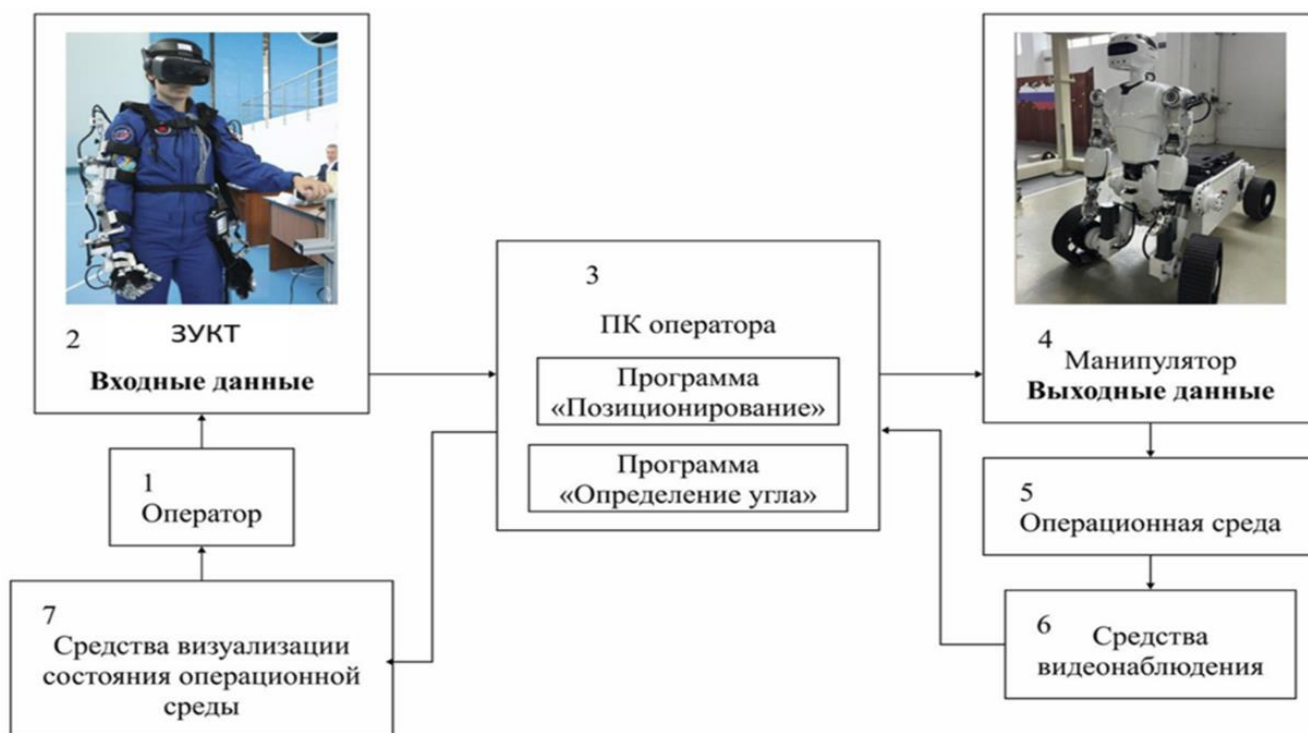


Рисунок 9 – Структура системы управления манипуляторами АРТС

Заключение

Разработан расчетно-экспериментальный метод повышения точности позиционирования исполнительных органов антропоморфных робототехнических систем для перспективных пилотируемых космических программ.

Проведенные теоретические и практические исследования, связанные с точностью позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС, реализуемые на предварительном этапе, проводимом в наземных условиях, и на этапе выполнения космической программы, позволяют сформулировать основные результаты и общие выводы, которые можно квалифицировать как теоретическое обобщение и решение научной задачи разработки расчетно-экспериментального метода повышения точности позиционирования исполнительных органов антропоморфных робототехнических систем для перспективных пилотируемых космических программ, основанный на введении искусственных параметров задаваемых оператором базовых целевых операций.

Основные новые научные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

1. Разработан расчетно-экспериментальный метод повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС, реализуемый на предварительном этапе, проводимом в наземных условиях, и на этапе выполнения космической программы, основанный на введении искусственных параметров, задаваемых оператором базовых целевых операций. Метод позволяет адаптировать

полученные в результате земных экспериментов регрессионные зависимости к условиям космического полета за счет проведения дополнительных экспериментов по разработанной методике на орбите.

2. Разработан алгоритм повышения точности базовой целевой операции попадания рукой бортовой АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота, на основе построения полиномиальной регрессионной зависимости угла отклонения рычага управляющего устройства бортовой АРТС от угла отклонения рычага управляющего устройства космонавта-оператора. В результате обеспечено выполнение целевой операции попадания рукой бортовой АРТС рычагом управляемого устройства в заданный угол поворота с точностью не менее 90 %. Разброс угла наклона рычага управляющего устройства для бортовой АРТС снижен с 11° до $1,1^\circ$.

3. Разработан алгоритм повышения точности базовой целевой операции позиционирования точки на рабочей поверхности бортовой АРТС, основанный на методе машинного обучения Случайный лес. В результате обеспечено выполнение целевой операции по позиционированию точек на рабочих поверхности оператора и бортовой АРТС с точностью не менее 81%. Среднее отклонение позиционирования точек, выполняемых бортовой АРТС, по сравнению с позиционированием точек, выполняемых космонавтом-оператором, снижено с 6,77 см до 1,29 см.

4. На основе результатов экспериментальных работ с определенной бортовой АРТС, совмещенной с мобильной платформой, управляемой с помощью ЗУКТ, для космонавтов-операторов, участвующих в эксперименте, построены полиномиальные регрессии, аппроксимирующие зависимости между углами отклонения, устанавливаемых рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и углами отклонения, получаемых в результате работы рукой АРТС, и двумерные регрессионные зависимости, аппроксимирующие координаты точек на рабочих плоскостях оператора и АРТС с помощью метода машинного обучения Случайный лес.

5. Разработано специальное программное обеспечение алгоритмов повышения точности целевых операций попадания рукой бортовой АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота и позиционирования точки на рабочей поверхности бортовой АРТС.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Разработанный расчетно-экспериментальный метод повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовых антропоморфных робототехнических систем предполагает построение алгоритмов повышения точности целевых операций, выполняемых бортовой АРТС в ППКП для

уменьшения рассогласования движений бортовой АРТС и космонавта-оператора при управлении АРТС с помощью ЗУКТ.

В приложениях к диссертационной работе представлены текст Программного модуля 1 «Обучение», текст Программного модуля 2 «Позиционирование» и методика проведения эксперимента и построения регрессионных зависимостей.

Акты внедрения результатов диссертационной работы в ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина» и ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Основные научные результаты диссертации изложены работах, опубликованных соискателем ученой степени:

Научные статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в Перечень Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации:

1. Белявский А.Е., Кикина А.Ю., Федяев А.В., Иванова А.В. Разработка алгоритма повышения точности позиционирования углов поворота рычага управления бортовой антропоморфной робототехнической системой // Пилотируемые полеты в космос. – 2025. – №1 (54). – С. 84–97.

2. Дикарев В.А., Симбаев А.Н., Кикина А.Ю., Чеботарев Ю.С., Буковская И.А., Белявский А.Е. Об обеспечении коллаборации космонавтов с робототехническими системами для перспективных пилотируемых космических полетов // Пилотируемые полеты в космос. – 2024. – № 4 (53). – С. 36–47.

3. Кикина А.Ю., Кондрат А.И., Сабуров П.А., Копнин В.А. Основные результаты подготовки и деятельности при выполнении программы космического полета бортинженера – 12 68 – й экспедиции МКС, специалиста корабля Space Dragon Crew – 5 // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – №2 (47). – С. 5–14.

4. Дикарев В.А., Дубинин В.И., Симбаев А.Н., Кикина А.Ю., Чеботарев Ю.С., Никитов Э.В., Розанов И.А. Исследование возможностей использования робототехнических систем для поддержания операторской деятельности экипажей и формирования экосистемы/микроклимата сотрудничества // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – №2 (47). – С. 15–31.

5. Дикарев В.А., Симбаев А.Н., Кикина А.Ю., Чеботарев Ю.С., Никитов Э.В., Агаркова Ю.С., Луцевич Д.Н., Миняйло Я.Ю., Кукоба Т.Б., Киреев К.С. Экспериментальные исследования вестибулярной устойчивости космонавтов при управлении робототехническими системами в виртуальной среде: постановка, проведение, результаты // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – №3 (48). – С. 5–20.

6. Дикарев В.А., Симбаев А.Н., Кикина, Ю.С. Чеботарев А.Ю., Никитов Э.В., Агаркова Ю.С., Киреев К.С., Булгаков А.В., Гришина И.А. Экспериментальные исследования операторской деятельности космонавтов при управлении движением

транспортного средства (имитатора планетохода) посредством антропоморфного робота: постановка, проведение, результаты // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – №4 (49). – С. 29–41.

7. Дикарев В.А., Симбаев А.Н., Кикина А.Ю., Чеботарев Ю.С., Никитов Э.В., Швецов В.В., Дудоров Е.А. Проблема обеспечения соответствия кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств антропоморфных робототехнических систем для перспективных пилотируемых космических программ // Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – №4 (45). – С. 54–71.

8. Дикарев В.А., Кикина А.Ю., Крючков Б.И., Белозёрова И.Н. Человеко-машинные интерфейсы пилотируемых космических аппаратов: опыт и перспективы // Воздушно-космическая сфера. – 2021. – № 2. – С. 64–74.

Материалы всероссийских и международных научных конференций:

1. Дикарев В.А., Симбаев А.Н., Кикина А.Ю., Чеботарев Ю.С., Никитов Э.В., Агаркова Ю.С. Исследования возможности выполнения космонавтами операторской деятельности при управлении движением имитатора планетохода посредством антропоморфного робота в копирующем режиме телеуправления до и после космического полета // Сборник тезисов секции 22 имени академика В.Н. Челомея «Ракетные комплексы и ракетно-космические системы. Проектирование, экспериментальная отработка, летные испытания, эксплуатация» XLVIII (48-х) Академических чтений по космонавтике. – Реутов, – 2024. – С. 34–36.

2. Дикарев В.А., Кикина А.Ю., Чеботарев Ю.С., Никитов Э.В., Кондратенко М.В. О коллаборативном применении роботизированного манипулятора и антропоморфного робота для операционной поддержки внекорабельной деятельности космонавтов // Материалы XLIX Общественно-научных чтений, посвященных памяти Ю.А. Гагарина г. Гагарин Смоленской области, 9 – 12 марта 2023 г. – Том 1. – Гагарин, 2023. – С. 178–184.

3. Дикарев В.А., Чеботарев Ю.С., Кикина А.Ю., Симбаев А.Н. Об отработке коллаборативных роботизированных технологий в обеспечение функционирования пилотируемых космических комплексов полета // Сборник XVI Всероссийской мультikonференции по проблемам управления, МКПУ-2023, Волгоград, 11–15 сентября 2023 г.: материалы мультikonференции. – В 4-х томах. – Волгоград, 2023. – С. 236–239.

4. Дикарев В.А., Симбаев А.Н., Чеботарев Ю.С., Кикина А.Ю., Никитов Э.В., Агаркова Ю.С. Опыт проведения экспериментальных исследований «SIRIUS-21» по направлению «Космическая робототехника» в проекции на продолжение исследований в изоляционном эксперименте «SIRIUS-23» // Материалы 58-х научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга, 18–21 сент. 2023 г. Часть 2. – Калуга, 2023. – С. 221–225.

5. Vladimir Dikarev, Maksim Kharlamov, Boris Kryuchkov, Anna Kikina, Pavel Dolgov, V.A. Dikarev, Kirill Kireev, Elena Fomina Experimental research of technologies of cosmonaut professional activity carried out during the implementation of a manned expedition to Mars (Экспериментальное исследование технологий профессиональной деятельности космонавтов при осуществлении пилотируемой экспедиции на Марс) // 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku, Azerbaijan, 2–6 October 2023. – B3. IAF human spaceflight symposium. – 5. Astronaut training, accommodation, and operations in space. – Paper number IAC-23,B3,5,1,x76349. – <https://iafastro.directory/iac/archive/browse/IAC-23/B3/5/76349/>

6. Дикарев В.А., Чеботарев Ю.С., Кикина А.Ю., Симбаев А.Н. О применении интеллектуальных интегрированных технологий виртуальной реальности в интересах пилотируемых космических полетов // Тезисы XVIII конференции по космической биологии и авиакосмической медицине с международным участием «Земля – орбита – дальний космос», Москва, 7 –9 ноября 2023 г. – М. ИМБП РАН, – 2023. – С. 16–19.

7. Симбаев А.Н., Кикина А.Ю., Чеботарев Ю.С., Никитов Э.В., Агаркова Ю.С., Швецов В.В., Белявцев С.Н., Гришина И.А., Булгаков А.В., Беляев Д.А. Обобщенные результаты экспериментальных исследований возможности выполнения космонавтами операторской деятельности при управлении движением транспортного средства посредством антропоморфного робота в копирующем режиме телеуправления до и после космического полета // Материалы XV Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос», Звездный городок, 15 – 17 ноября 2023 г. – Звездный городок, – 2023. – С. 240–241.

8. Дикарев В.А., Чеботарев Ю.С., Кикина А.Ю., Белозерова И.Н. Исследование возможностей использования робототехнических систем для поддержания внекорабельной деятельности экипажей лунных экспедиций в формировании сотрудничества человеко-машинного взаимодействия // Тезисы 22-й Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 20 – 24 ноября 2023 г. – Москва, – 2023. – С.242–243.

9. Чеботарев Ю.С., Кикина А.Ю., Агаркова Ю.С., Дикарев В.А. О некоторых особенностях, выявленных по предварительным результатам экспериментально-исследовательских практик по космической робототехнике ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина // Труды пятнадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» Санкт-Петербург, 20 – 24 марта 2023 г. – СПб., – 2023. – Том 2. – С. – 158–162.

10. Кикина А.Ю. Наземная подготовка космонавтов с использованием специальных технических средств – один из методов обеспечения безопасности пилотируемых космических полётов // Сборник тезисов докладов 20-ой

Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2021», Москва, 18–22 ноября 2021 г, – Москва : Издательство «Перо», – 2021. – С. 343–345.

11. Дикарев В.А., Чеботарев Ю.С., Кикина А.Ю., Агаркова Ю.С. О бигеминальности и методе предварительного проектирования средств и интерфейсов операционной поддержки деятельности космонавтов с применением робототехнических систем // В сборнике: XIV Международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полёты в космос», Звездный Городок, 17 – 19 ноября 2021 г, Звездный городок : ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», – 2021. – С. 29–30.

12. Харламов М.М., Карпов А.А., Дикарев В.А., Крючков Б.И., Усов В.М., Кикина А.Ю. Применение технологий искусственного интеллекта при взаимодействии космонавтов с робототехническими комплексами в перспективных проектах // В сборнике: Донецкий международный круглый стол "Искусственный интеллект: теоретические аспекты и практическое применение", Донецк, 7 – 27 мая 2021 г, Донецк: Институт проблем искусственного интеллекта ДНР, – 2021. – С. 6.

13. Дикарев В.А., Кикина А.Ю., Крючков Б.И., Белозёрова И.Н. Конструкторско-технологические решения человеко-машинных интерфейсов пилотируемых космических аппаратов: ретроспектива и перспектива // В сборнике: XXVII Годишная научная международная конференция Института истории естествознания и техники имени С.И. Вавилова РАН, Москва – Санкт-Петербург, 17 – 21 мая 2021 г, – Москва : ИИЕТ РАН, – 2021. - С. 595–598.