

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»

**Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Белявский Александр Евгеньевич

Москва - 2025

О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА, СОСТОЯНИЯ И АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОЛЛАБОРАЦИИ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКИПАЖЕЙ В ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПЛАНИРУЕМОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЕ.....	13
1.1 Особенности взаимодействия коллаборативных робототехнических систем с человеком-оператором.....	13
1.2 Обобщение опыта и состояния проведения с участием космонавтов научно-прикладных, экспериментальных исследований и космических экспериментов по отечественной космической робототехнике.....	23
1.3 Анализ потенциальных направлений и задач обеспечения коллаборации в РТС для поддержки деятельности экипажей в перспективных пилотируемых космических программах.....	32
1.4 Постановка задачи исследования.....	40
Заключение по Главе 1.....	47
ГЛАВА 2 РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ БОРТОВОЙ АРТС.....	49
2.1 Формализация задачи разработки расчетно-экспериментального метода повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС.....	49
2.2 Проведение экспериментального исследования точности управления оператором бортовой АРТС с помощью задающего устройства копирующего типа.....	52
2.3 Разработка рычага управляющего устройства.....	58
Заключение по Главе 2.....	67

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ УГЛОВ ПОВОРОТА РЫЧАГА УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА БОРТОВОЙ АРТС.....69

3.1 Разработка алгоритма повышения точности базовой целевой операции попадания рукой бортовой АРТС рычага управляющего устройства в заданный угол поворота.....69

3.2 Выбор метода оценки параметров распределения рассогласования движений космонавта-оператора и бортовой АРТС, при задаче угла поворота рычага управляющего устройства.....74

3.3 Определение вида распределения данных, полученных в результате проведения эксперимента.....78

3.4 Выбор метода построения аппроксимирующей полиномиальной регрессии.....82

3.5 Построение полиномиальной регрессии.....85

Заключение по Главе 3.....94

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ТОЧКИ НА РАБОЧЕЙ ПЛОСКОСТИ БОРТОВОЙ АРТС.....96

4.1 Математическая формализация задачи разработки алгоритма повышения точности позиционирования точки на рабочей плоскости бортовой АРТС.....96

4.2 Выбор метода построения регрессии.....98

4.3 Выбор параметров алгоритма Случайного леса по каждой выходной переменной.....102

4.4 Построение двумерной регрессии по двум выходным переменным. Алгоритм повышения точности целевой операции позиционирования точки на рабочей плоскости бортовой АРТС.....106

4.5 Реализация метода повышения точности позиционирования исполнительных органов антропоморфных робототехнических систем в системе копирующего управления манипуляторами бортовой АРТС.....112

Заключение по Главе 4.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118
Приложение А Текст Программного модуля 1 «Обучение».....	132
Приложение Б Текст Программного модуля 2 «Позиционирование».....	138
Приложение В Методика проведения эксперимента и построения регрессионных зависимостей.....	139
Приложение Г Акты внедрения диссертационной работы.....	142

ВВЕДЕНИЕ

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 повышение 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., Махдавьян М., Хурс С.П., Cela A.F., Javier Y.J., Kanoun O., Lamiraux 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 повышение 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 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;
- 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 и обеспечения 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 подтверждаются 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 Годичной 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.

ГЛАВА 1 ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА, СОСТОЯНИЯ И АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОЛЛАБОРАЦИИ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКИПАЖЕЙ В ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПЛАНИРУЕМОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЕ

1.1 Особенности взаимодействия коллаборативных робототехнических систем с человеком-оператором

Развитие Индустрии 4.0 (4-й промышленной революции), происходящее в настоящее время в мире, характеризуется бурной роботизацией во всех сферах человеческой деятельности, начиная с бытовой области и заканчивая областью космических исследований. Роботизация человеческой деятельности приводит к росту производительности труда и снижению негативных происшествий на производстве.

Значительное внимание в настоящее время в промышленном секторе уделяется роботам-манипуляторам, (т.н. функциональные роботы). В течении последних лет важными направлениями развития функциональной робототехники являлись:

- расширение функционала робота и повышение возможности применения искусственного интеллекта в принятии решений для выполнения технологических операций;
- оптимизация размеров робототехнических средств;
- повышение автономности работы, связанной с управлением и планированием деятельности, средствами коммуникации с оператором и системами поддержки принятия решения [1].

Таким образом, речь идет не столько о роботизации производства, сколько о широком использовании роботов во всех сферах жизни и деятельности человека. Это означает смещение фокуса внедрения роботов от специальных производственных к коллаборативным и социальным [2].

На Рисунке 1.1 представлена классификация робототехнических систем (РТС) [3].

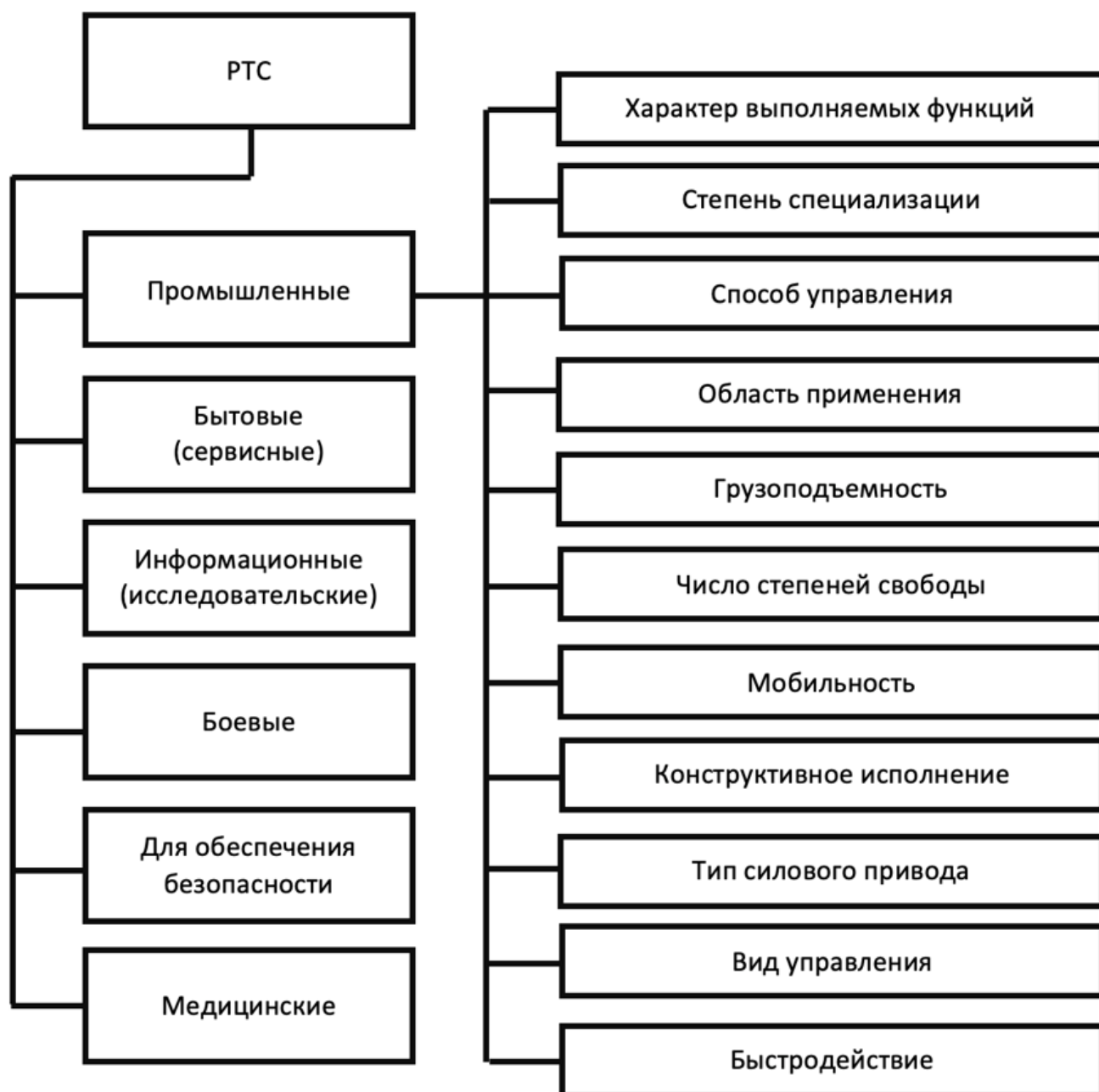


Рисунок 1.1 – Классификация робототехнических систем

Кроме того, активное развитие получили так называемые социальные роботы – роботы чаще антропоморфного или зооморфного типа, ориентированные на

социальное взаимодействие с человеком, и, имеющие функции и черты, присущие как коллаборативным, так и сервисным роботам [24].

Существует ряд видов деятельности, где полное замещение человеческого труда в настоящее время невозможно. Но частичная роботизация способна привести к повышению производительности производственно-технологического процесса [5].

В соответствии с указанным, широко внедрилось понятие взаимодействия человека и робототехнической системы, или, другими словами, коллаборативное взаимодействие – безопасная и целенаправленная деятельность человека и РТС. Участвующие в этой деятельности робототехнические системы называют коллаборативными. В настоящее время производится работа по повышению эффективности коллаборативных РТС.

Понятие «коллаборативное взаимодействие» обозначает процесс безопасного производственного сотрудничества человека и робота, а класс роботов, работающих таким образом – коллаборативными роботами (или коботами) [6, 7].

Область, используемая коллаборативной РТС и оператором, подразделяется на четыре зоны [8]:

1. максимальная зона – максимальная зона пространства с учетом объема предметов, которое используется робототехнической системой;
2. запретная зона – часть максимальной зоны пространства, работа в которой для человека ограничена при функционировании РТС;
3. зона операций – часть запретной зоны, в которой РТС производит действия [9];
4. коллаборативная зона – часть зоны операций, служит для безтравматичной совместной работой человека-оператора и РТС.

Вектор развития роботов на современном этапе направлен на управление множеством гетерогенных коботов в коллаборативном пространстве. К коботу, как интеллектуальному агенту предъявляются требования активности, сетевой самоорганизации, прогнозирования запросов пользователя, надежности и некоторые другие [10].

При разработке коллаборативных робототехнических систем используют следующие основные принципы [1]:

1. работы, выполняемые РТС, не должны быть опасными по отношению к другим РТС или человеку-оператору при действии в совместной зоне, а также, к объектам окружающей среды [12];

2. робототехническая система должна в своей работе ориентироваться на человека, а не наоборот (т.е., если коллаборативная РТС работает функционирует не эффективно, то следует заниматься доработкой РТС, а не проводить мероприятия с оператором);

3. требуется выполнять условия, в которых оператор в рабочей зоне мог бы максимально использовать потенциал РТС;

4. при разработке робототехнической системы целью разработчика является повышение производительности труда и снижение погрешностей в работе [13].

Из перечисленных принципов следуют ключевые отличия коботов от других классов робототехнических систем. Так называемые сервисные роботы, в отличие от РТС, не учитывают находящихся в общей зоне, так как для них предусмотрена возможность автономной работы или дистанционного управления [14].

Используемые в промышленности промышленные роботы в процессе работы не предполагают совместную деятельность с оператором. Подобные роботы становятся перепрограммируемыми универсальными манипуляторами с автоматическим управлением [15]. Коллаборативная робототехническая система предназначена для обязательной совместной работы с оператором, а область работы значительно шире [16]. Коллаборативные РТС в своей работе менее точны и допускают больше ошибок, движения их происходят медленнее по соображениям безопасности, а их рабочая зона меньше [17].

Для выполнения указанных задач, робототехническая система в тандеме робот-оператор не должна представлять опасность. РТС должна быть удобной в применении и проста в управлении. Отсутствие опасности определяет защищенность оператора от повреждений при работе с РТС. Удобство применения означает то, что работа РТС должна соответствовать когнитивным

привычкам людей, и люди смогут распознавать ее намерения [18, 19]. Адаптивность определяется возможностью РТС распознавать требования оператора и учитывать траектории движения оператора при решении задач [20]. Простота управления определяется тем, что оператор может легко менять логику управления при работе с роботом. Важным моментом во взаимодействии человека с коллаборативными РТС в едином рабочем пространстве является обеспечение безопасности [21]. Отсутствие опасности операторов при работе с коллаборативными роботами рассматривается в следующих аспектах [22]:

- отсутствие опасности столкновения обеспечивается тем, что столкновения между РТС, операторами и ограждениями были «некритичными», то есть контролируемые. Важной задачей становится ограничение воздействий, оказываемых на оператора [23];

- РТС должна вовремя обнаружить возможное столкновение между операторами и роботом и, в этом случае, прекратить работу. Для реализации указанного аспекта используются датчики приближения, наблюдательные системы и датчики усилия;

- возможность адаптации при работе робототехнической системы с оборудованием для коррекций, которые приводят к отсутствию столкновений без прекращения деятельности РТС.

Для обеспечения безопасности работы с коллаборативными РТС разработаны национальные и международные стандарты [24]. Ввиду того, что совместно используемая зона включает в себя не только оператора и РТС, но и прочее используемое оборудование (к примеру, дрели, шуруповерты, паяльные устройства и т. д.), каждая зона включает возможность определенного риска, который требуется снижать.

Коллаборативные роботы имеют дополнительные функции [25], которые регламентируются в стандартах робототехнических решений, в том числе и специально для вопросов безопасности;

«Отсутствие опасности при контролируемой остановке» – РТС прекращает работу в том случае, когда оператор появляется в совместной рабочей зоне, и

возобновляет движения, когда рабочая зона освобождается (что позволяет человеку непосредственно работать с роботом в различных ситуациях);

«Под ручным управлением» подразумевается случай, когда работа РТС производится под контролем оператором (человек пользуется ручным управлением для подачи сигналов команд);

«Под контролем скорости и разделения» понимается следующее – человек и РТС находятся вместе в совместно используемой зоне;

«Под ограничением мощности и силы» понимается, что усилия контакта, возникающие между оператором и работающей РТС искусственно ограничиваются уровнем, обеспечивающим безопасность (поскольку воздействие робототехнической системы на человека возникает как специально, так и случайно).

Анализ работы позволяет выделить две группы методов, обеспечивающих требуемый уровень безопасности во всех обозначенных выше аспектах. Во-первых, это методы управления в технических системах, к которым отнесены следующие [26]:

Управление движением – до контакта с человеком и после. Цель указанных методов состоит в ограничении возможных действий робототехнической системы (скорость, мощность, и т. п.) или в возможности недопущения контактов с использованием методов, заключающихся в ограничении пространства безопасности, мониторинг дистанции разделения и действий робототехнической системы в сторону от операторов.

Так называемые постколлизии методы заключаются в использовании различных путей нанесения травм за счет перекоммутирования различных методов управления при появлении возможности контакта. Кроме указанного, для эффективной совместной деятельности можно определить преднамеренный и случайный контакт и допустить безопасное физическое воздействие.

Планирование движения. Целью указанного движения является расчет безтравматичных путей робототехнической системы для того, чтобы избежать возможность контакта. Для достижения указанной цели происходит учет

разнообразных параметры, связанных с оператором (дистанция между РТС и оператором, вектор взгляда при планировании действий и др.) [27].

Предсказание движений человека. Прогнозирование действий состоит в просчете возможных вариантов работ оператора и производится с помощью разнообразных методов, в том числе включая сопоставление последовательностей, расчет вероятности узнавания плана действий и обработке данных по предполагаемому движению. Следует просчитывать предполагаемые действия РТС, так как при функциональном взаимодействии роль РТС так же важна, как роль человека.

Далее, так называемые методы организационного управления. В [26] предложено проведение анализа психофизиологических параметров человека используя физиологическое зондирование, опросники и поведенческие показатели. Отмечено, что следует учитывать психофизиологическое состояние оператора в период работы с робототехнической, при котором возможно предотвращения нанесения вреда. Такими факторами являются, например, испуг при взаимодействии с РТС, усталость, недостаточный опыт совместных действий и другие.

Принципиально, совместная коллаборативная работа оператора и РТС подразделяется на следующие группы [28, 29]:

- простое сосуществование;
- совместная кооперация;
- сама коллаборация.

На Рисунке 1.2 предложена возможная классификация взаимодействия человека и робота.

На представленном рисунке разряд совместных действий определяется четырьмя характеристиками [28, 29]:

- так называемое рабочее время;
- используемое рабочее пространство;
- общая цель взаимодействия;
- физический контакт РТС с оператором.



Рисунок 1.2 – Классификация взаимодействия человека и робота [1]

В предложенной классификации совместных действий под рабочим временем понимается диапазон времени, когда оператор и робототехническая система совместно работают в рабочей зоне. При существовании совместного общего времени в одной рабочей зоне, указанное совместное действие называется сосуществованием оператора и РТС. Если у оператора и робототехнической системы совпадают цели работы, то происходит сотрудничество, а если наблюдается непосредственное взаимодействие (к примеру, тактильное или слуховое), то подобная совместная работа называется коллаборацией оператора и РТС.

В работе [30] авторы предлагают введение дополнительного основания определения совместных действий как автономность коллаборативной робототехнической системы. Выстраиваются отношения типа ведущий – ведомый, которые определяют взаимодействие РТС и оператора, или определяется, кто принимает на себя ведущую роль в решении данной задачи.

Возможны иные варианты классификации совместной работы оператора и РТС [31].

Возможна классификация по типу задачи. Проектирование и эксплуатация РТС происходит в соответствии с поставленной задачей. Таким образом, задача должна быть идентифицирована как часть классификации системы. В зависимости от постановки задачи можно судить о среде РТС [23].

По уровню критичности задачи. С точки зрения критичности, поставленная задача определяет правильность, оценивая негативные последствия в случае появления проблем. Возникающие ошибки в деятельности коллаборативной РТС приводят к летальному исходу при совместной работе оператора и РТС. В связи со сказанным, критичность задачи является субъективной с точки зрения коллаборативной робототехники.

Морфология робота. С точки зрения компоновки робототехнических систем, внешность РТС различается, в зависимости от поставленной задачи, для которой РТС создается или факторов окружающей среды. Социальные ожидания определяются при этом внешним видом и структурой РТС.

Отношение людей к роботу. Отношение людей к роботам напрямую влияет на взаимодействие человека и робота в системе. Классификация с точки зрения таксономии напрямую не определяет взаимодействие между человеком и РТС, но выражает количество каждого из них и представлена в дробном виде.

По составу команды. Состав может иметь значения однородные или разнородные. Гетерогенность может быть дополнительно уточнена с помощью списка, содержащего типы роботов в команде и количество каждого типа роботов, используемых в команде.

По уровню совместного взаимодействия между командами. В зависимости от состава команды возможны различные сценарии взаимодействия.

Роль взаимодействия. Согласно [32], распределение ролей со стороны человека при взаимодействии с роботом может быть на следующих позициях: супервайзер, оператор, член команды, программист и наблюдатель.

По типу физической близости человека и робота. Как показано в [33], различают пять видов отношений оператора и РТС при совместной работе: избегание, прохождение, следование, приближение и прикосновение.

Принятие решений. Знание о местах расположения, виде сенсоров на РТС и обрабатываемой информации, собираемой с датчиков, позволяют спроектировать интерфейс для общения оператора и РТС.

Пространство и время. Пространственно-временная таксономия [34] подразделяет совместную оператора и РТС на четыре типа, определяемых тем, используются ли вычислительные системы операторами и РТС одновременно (синхронно) или произвольно в разное время (асинхронно) и местом нахождения - в одном и том же месте (совместно) или находясь в различных местах (несогласованно).

Уровень автономности или степень вмешательства. Автономность или степень вмешательства при взаимодействии человека и робота может быть измерена тем, насколько человек может пренебречь системой [35].

1.2 Обобщение опыта и состояния проведения с участием космонавтов научно-прикладных, экспериментальных исследований и космических экспериментов по отечественной космической робототехнике

Условно существующие и перспективные бортовые РТС для поддержания деятельности экипажей при реализации ППКП можно разбить на две укрупненные группы:

- существующие бортовые РТС в составе МКС [36];
- экспериментальные перспективные бортовые РТС для ППКП [36].

В свою очередь существующие бортовые РТС в составе МКС могут подразделяться на бортовые РТС с накопленным опытом эксплуатации и новые бортовые РТС на начальной стадии эксплуатации.

С учетом условного разделения в рамках проводимого исследования состояния и перспектив внедрения бортовых РТС для поддержания деятельности экипажей при реализации ППКП проанализируем их применительно к использованию российскими космонавтами на российском сегменте (РС) и партнерами на американском сегменте (АС) в ходе полетов экипажей экспедиций по программе МКС:

- существующие бортовые РТС с накопленным опытом эксплуатации на МКС;

- новые бортовые РТС начальной эксплуатации на МКС;
- опытные образцы бортовых РТС космических экспериментов на МКС.

Рассмотрим существующие бортовые РТС в составе МКС, Рисунок 1.3.

Канадский манипулятор «Canadarm-2». Манипулятор «Canadarm-2» или SSRMS – Space Station Remote Manipulator System в составе МКС используется для обслуживания внешней поверхности станции, замены оборудования, транспортировки грузов и космонавтов, а также «ловли» космических кораблей для их присоединения к МКС. Он может управляться как экипажем станции, так и наземными специалистами. С точки зрения эволюции развития, «Canadarm-2» стал продолжением системы «Canadarm» (SSRMS – Space Station Remote Manipulator System), который спроектирован и произведен в Канаде [37].

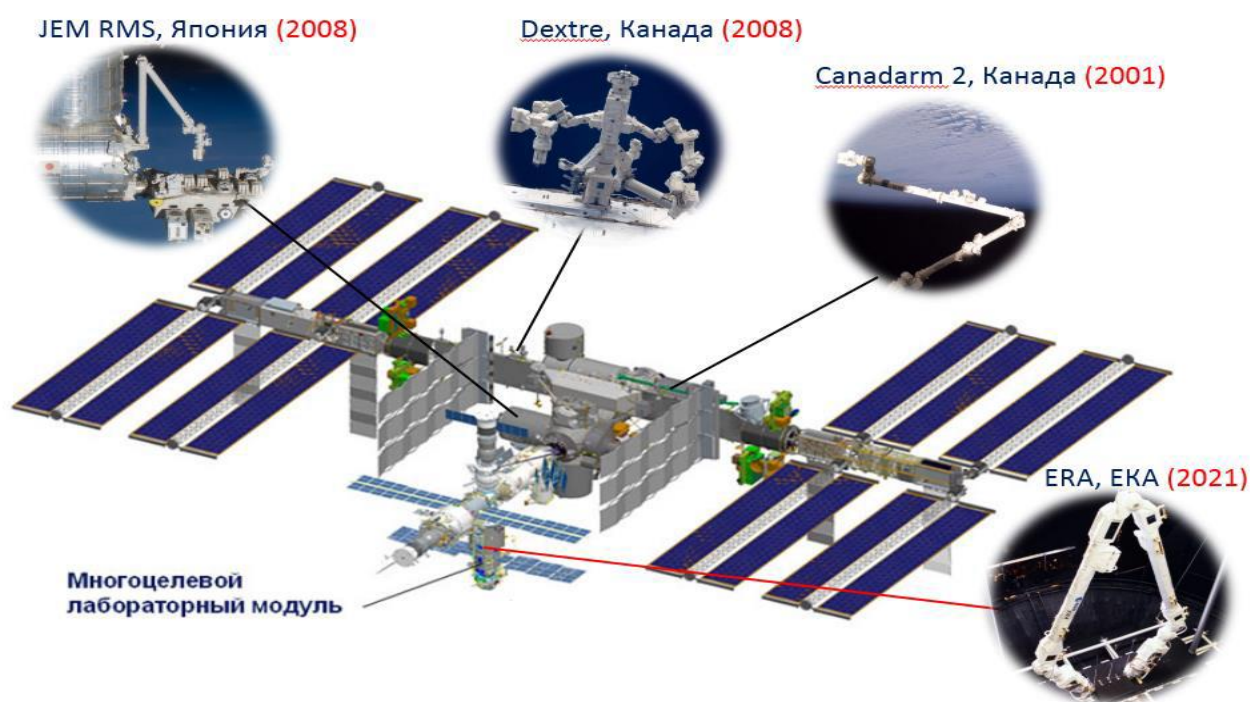


Рисунок 1.3 – Существующие бортовые РТС в составе МКС

Основные компоненты манипулятора (Components of the Shuttle Robotic Arm): звенья манипулятора (Arm Booms), двигатели приводов степеней подвижности (Joint Motor), тормозные устройства шарниров (Joint Brakes),

встроенная электроника (Arm Electronics), теплозащитные покрытия (Thermal Blankets). В составе захватного устройства – концевого эффектора (End Effector) выделены блок электроники (End Effector Electronics Unit) и механизм захвата и удержания полезного груза (End Effector Brakes and Clutches). Из оборудования, расположенного в кабине экипажа (Crew Compartment), отдельно выделены органы управления поступательным (Translation Hand Controller) и вращательным (Rotational Hand Controller) перемещениями полезного груза, а также контроллер (Manipulator Controller Interface Unit), обеспечивающий обмен данными с бортовым компьютером (Data From/To Shuttle General Purpose Computer). Длина манипулятора «Canadarm-2» около 17,6 м, масса – более тонны. Предназначен для манипулирования грузами массой более 100 т. Скорость выполнения операций манипулятором «Canadarm-2» зависит от типа и массы переносимого груза, а также от характера операции. Без груза схват манипулятора может передвигаться со скоростью до 38 см/с (у шаттла – около 60 см/с).

Манипулятор для специальных целей «Dextre». Разработан по заказу Канадского космического агентства (ККА). Год ввода в эксплуатацию в составе МКС – 2008. Специализированная робототехническая система «Dextre» или SPDM – Special Purpose Dexterous Manipulator, используется при производстве точных работ, например, таких операций, как работа с малыми полезным нагрузками вроде буферных батарей, источников питания и компьютеров.

Манипулятор для специальных целей «Dextre» выглядит как безголовое туловище, оснащённое двумя подвижными руками длиной в 3,35 м, Рисунок 1.4.

Корпус длиной в 3,5 метра имеет ось вращения в «талиии». На одной стороне корпуса «Dextre» расположен механизм захвата, который используется «Canadarm-2» для транспортировки SPDM к требуемому месту проведения работ на МКС. С другого конца корпуса имеется исполнительный орган робота, практически повторяющий рабочий орган «Canadarm-2», так что SPDM закрепляется на рабочих площадках МКС или используется для расширения функций «Canadarm-2».

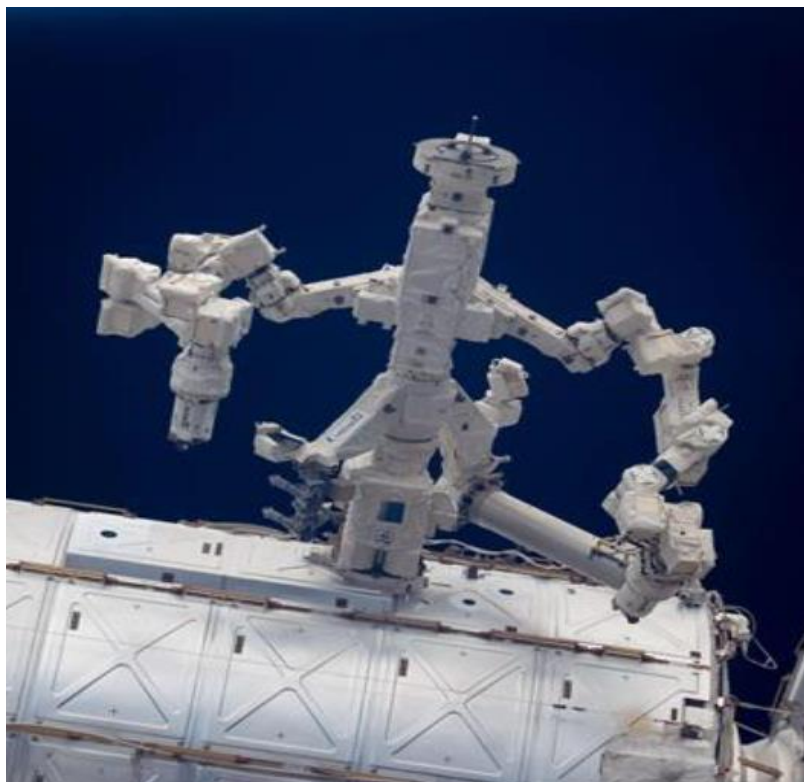


Рисунок 1.4 – Манипулятор для специальных целей «Dextre»

Манипуляционная система «Japanese Experiment Module Remote Manipulator System» («JEM RMS»).

Разработан по заказу Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA). Год ввода в эксплуатацию в составе МКС – 2008.

Манипуляционная система «JEMRMS» (JEM – Japanese Experiment Module (японский экспериментальный модуль), RMS – Remote Manipulator System (управляемая манипуляторная система)) установлена над шлюзом модуля «Kibo» и позволяет загружать оборудование внутрь или извлекать его наружу, а также осуществлять совместные работы с манипулятором «Canadarm-2». Манипуляционная система «JEMRMS» состоит из двух элементов – основной роботизированной «руки» (Main Arm, MA) и вспомогательной, предназначенной для тонких работ (Small Fine Arm, SFA). Малая роботизированная «рука» устанавливается на большую – точно так же, как «Dextre» может быть продолжением «Canadarm-2» [38].

Бортовые РТС начальной эксплуатации на МКС.

Европейский роботизированный манипулятор «European Robotic Arm» «ERA», Рисунок 1.5.

Европейский роботизированный манипулятор «ERA» разработан в 2004 году по заказу Европейского космического агентства консорциумом европейских космических фирм с Dutch Space в качестве главного подрядчика и 22 фирм-субподрядчиков ещё из восьми стран ЕС [36].

В мае 2021 года манипулятор «ERA» был установлен на многоцелевом лабораторном модуле (МЛМ) «Наука» и в июле 2021 г. был пристыкован к РС МКС. Европейский манипулятор «ERA» (англ. European Robotic Arm) – дистанционно управляемый космический робот-манипулятор, созданный ЕКА для сборочных работ и обслуживания РС МКС.

В состав «ERA» входит автономный перемещаемый манипулятор, и система управления, состоящая из пунктов управления, размещённых на станции, на наружной поверхности МКС для управления космонавтом - оператором во время внекорабельной деятельности (ВнеКД) и наземного пункта управления.

Опытные образцы РТС космических экспериментов на МКС.

Выполнялся по заказу NASA. Год начала бортовой реализации на АС МКС – 2011. Экспериментальный антропоморфный робот «Robonaut-2» планировался для проведения серии испытаний и отработки на МКС с совместно российскими космонавтами технологии управления и применения в ходе космического эксперимента (КЭ) «Robonaut-2» [37].

Данный космический эксперимент (КЭ) проводился в условиях невесомости. Однако, в силу ряда причин и обстоятельств российские космонавты так и не были допущены к участию в космическом эксперименте «Robonaut-2».

Робот впервые прибыл на станцию в феврале 2011 года и в основном выполнял простые задания, такие как рукопожатие с астронавтов Дэном Бербанком (Dan Burbank) в 2012 году (первое рукопожатие человека и гуманоида в космосе) и сказал "Привет" миру с помощью жестов, а также выполнял функции, такие как поворот ручки и щелчок выключателем. Во время Экспедиции

34/35 в 2012-2013 годах астронавт Том Маршберн даже заставил «Robonaut-2» поймать свободно летающий объект с помощью дистанционного управления [39, 40].



Рисунок 1.5 – Европейский роботизированный манипулятор «European Robotic Arm»

Экспериментальные программируемые спутники «SPHERES».

Выполнялся по заказу NASA. Год начала бортовой реализации на АС МКС – 2009. Экспериментальные спутники «SPHERES» (Сферы) использовались в ходе КЭ «SPHERES – Zero Robotics» для проведения испытания и отработки совместно с российскими космонавтами технологии программирования и применения в условиях невесомости. Сферы определяли свое местоположение, осуществляли перемещения в пространстве и относительно друг друга согласно задаваемым программам [41, 42].

Экспериментальный робот «Киробо».

Выполнялся по заказу JAXA. Год начала бортовой реализации на АС МКС – 2013. Экспериментальный робот «Киробо» (в переводе с японского языка

«надежда» и «робот») – первый робот-астронавт. В разработке робота «Киробо» приняли участие Dentsu – научно-исследовательский центр передовой науки и техники Токийского университета, фирма Robo Garage, Toyota и JAXA. Проект был назван Kibo Robot project. Робот «Киробо» высотой 34 сантиметра и весом всего 1 кг [43, 44] выполнен в полном соответствии с человеком. Его основное предназначение связано с общением. Основные особенности робота «Киробо»: распознавание голоса, жестов и речи; автоматическая обработка естественного языка (имеет голосовой синтезатор, запрограммированный для общения на японском языке); распознавание лиц; запись видео.

Робот «Киробо» разговаривает, отвечает на вопросы и понимает все, что ему было сказано. Робот наделен искусственным интеллектом, в результате чего он отлично понимает язык, но пока только японский. Важно отметить, что встроенная система отлично распознает людей, с которыми уже общался, запоминает их эмоции, жесты и мимику. Сам робот оснащен двадцатью степенями свободы, именно это позволяет ему общаться с людьми и при помощи жестов.

Экспериментальный дрон «Internal Ball Camera» («Int-Ball»).

Выполнялся по заказу Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA). Год начала бортовой реализации на АС МКС – 2017. Экспериментальный дрон «Int-Ball» со встроенной камерой, изготовленный японскими специалистами, использовался в ходе космического эксперимента, который заключался в проведении испытания и отработки на МКС технологии управления дроном с Земли [45,46].

Интерактивный робот-помощник «CIMON».

Изготовлен по заказу Германского центра авиации и космонавтики. Год начала бортовой реализации на АС МКС – 2018. Интерактивный робот-помощник «CIMON» предназначался для использования в разработанном в Германии технологическом эксперименте для поддержки астронавтов и увеличения эффективности работы на орбите. «CIMON» способен демонстрировать и объяснять информацию для проведения научных экспериментов и ремонта на

станции. Астронавты также могут использовать голосовой доступ к документации и прессе. Робот выполняет функции портативной камеры, что экономит время экипажа. В частности, «CIMON» подходит для рутинных задач: документирование экспериментов, поиск объектов, инвентаризация. «CIMON» может видеть, слышать, понимать и говорить. Помощник ориентируется в пространстве при помощи «глаз» – стереокамеры и камеры высокого разрешения для распознавания лиц и двух камер, расположенных по бокам для фото- и видео документации. Ультразвуковые сенсоры определяют расстояние до препятствий и помогают избежать столкновений. «Ухо» робота состоит из восьми микрофонов для определения источника звука и дополнительного микрофона для более точного распознавания голоса. «Рот» представляет собой громкоговоритель, который также служит для прослушивания музыки. Для распознавания языков используется технология IBM Watson AI на базе сервиса IBM Cloud". На Земле «CIMON» весит 5 кг, но в невесомости он может парить и передвигаться по станции с помощью встроенных роторов.

Роботизированная система «Astrobee».

Выполнялся по заказу NASA. Год начала бортовой реализации на МКС – 2019. «Astrobee» – новая свободно летающая роботизированная система [47, 48], реализуемая в ходе космического эксперимента «Astrobee», поможет астронавтам сократить время, которое они тратят на рутинные обязанности, позволив им больше сосредоточиться на вещах, которые могут делать только люди. Роботы, работающие автономно или с помощью дистанционного управления астронавтами, диспетчерами полета или исследователями на Земле, предназначены для выполнения таких задач, как инвентаризация, документирование экспериментов, проводимых астронавтами, с помощью встроенных камер или совместная работа для перемещения грузов по станции.

Космический эксперимент «Контур-2» по отработке технологий телеуправления напланетными роботами с борта орбитального космического аппарата (КА). Разработчиком научной аппаратуры и постановщиком

космического эксперимента: ЦНИИ РТК (г. Санкт-Петербург, Россия). Год начала бортовой реализации на МКС – 2015.

В период с 2013 по 2016 год был поставлен КЭ «Контур-2» [49, 50] на РС МКС по отработке технологий телеуправления напланетными роботами с борта орбитального космического аппарата. Целью эксперимента явилась отработка технологий телеуправления напланетным роботом, находящимся в условиях микрогравитации, оператором с борта орбитального космического аппарата по комбинированным каналам связи с ограниченной пропускной способностью и случайными задержками [51, 52].

Разработан план проведения эксперимента:

- разработка и изготовление дистанционной системы управления бортовой АРТС, находящейся на поверхности Земли, управляющим устройством, размещенным на РС МКС в позиционно-скоростном и силомоментном режимах;
- разработка и изготовление специального, снабженного средствами автоматики пульта управления космонавта-оператора;
- определение возможностей человека-оператора дистанционно работать с напланетной робототехнической системой в условиях космического полета с использованием человеко-машинного интерфейса;
- определение степени воздействия структуры информационных потоков между Российским сегментом МКС и бортовой АРТС роботом на качественные и количественные характеристики системы управления.

В ходе проведения КЭ космонавт-оператор, находящийся на борту РС МКС, выполнял сеансы удалённого телеуправления РТС, расположенными на Земле. В качестве объектов управления использовались кинематически избыточный манипулятор (змеевидный робот) «Сурикат», двухзвенный робот «ROBOTIC» («ROKVISS»), робот «Юла», робот «Justin» и робот «Рябина». Основными средствами управления, входящими в автоматизированное рабочее место оператора на борту МКС, являлись задающий манипулятор и бортовой лэптоп. Связь между РС МКС и Землей осуществлялась по прямому радиоканалу S-диапазона с использованием антенного комплекса Германского центра

космических операций (GSOC, г. Вальхайм), расположенного в Германском центре авиации и космонавтики (DLR). Связь между наземными объектами осуществлялась через открытые сегменты сети Интернет.

Антропоморфная робототехническая система «Федор». Антропоморфная робототехническая система (АРТС) «Федор» была использована в ходе проведения КЭ «Испытатель» [53, 54] в 2019 году. Разработчик АРТС и постановщик КЭ АО «НПО «Андроидная техника», г. Магнитогорск, Россия.

Для подтверждения возможности применения телеоператорного управления АРТС, в условиях операционной поддержки космонавтов, при воздействии факторов космического полета Роскосмосом было принято решение о проведении КЭ «Испытатель», в результате которого должны были быть получены ответы на следующие вопросы [55]:

1) возможно ли принципиально управлять АРТС дистанционно в копирующем режиме с помощью управляющего задающего устройства копирующего типа (ЗУКТ) в условиях невесомости?

2) как изменится качество выполнения тестовых полетных операций роботом (по сравнению с наземными условиями), когда роботом управляет космонавт в беспорном пространстве?

3) как изменятся параметры системы управления АРТС и её исполнительных устройств в условиях воздействия факторов космического полета?

4) как повлияет на работоспособность АРТС повышенный уровень радиационного и электромагнитного воздействий, свойственные космическому полету?

В 2019 году был проведен анализ, позволивший сформулировать нижеперечисленные выводы:

1) бортовые антропоморфные робототехнические системы интегрируются в пилотируемые космические аппараты для обеспечения определенной функциональности:

2) использование бортовой антропоморфной робототехнической системы для работы внутри пилотируемого космического корабля признано актуальным;

3) выявленные в результате проведения эксперимента в космосе замечания позволили установить необходимость проведения модернизации бортовой АРТС и станции.

1.3 Анализ потенциальных направлений и задач обеспечения коллаборации в РТС для поддержки деятельности экипажей в перспективных пилотируемых космических программах

Принятые ГК «Роскосмос» актуальные направления развития РТС на МКС с учетом экспертного мнения космонавтов об их роли в планируемой динамике их реализации представлены на Рисунке 1.6.

Принятые ГК «Роскосмос» направления развития РТС на МКС коррелируют с актуальными трендами мировой пилотируемой космонавтики с учетом приемлемости в отечественных достижений в науке и технике позволяют создать аккумулированный и апробированный в условиях космоса научно-технический задел для решения задач поддержания деятельности экипажей при реализации ППКП [56]:

- на Международной космической станции;
- по исследованию и освоению Луны до 2030 года и на дальнейшую перспективу;

На МКС планируется продолжение действующей целевой работы (ЦР) «Теледроид». ЦР «Теледроид» [57, 58] на тему «Исследование возможностей использования дистанционно-управляемого антропоморфного робота для операционной поддержки деятельности космонавтов в условиях орбитального полета» проводится с целью апробации технологий телеуправления копирующим антропоморфным роботом при выполнении им операций на борту орбитальной станции и взаимодействия его с космонавтами при осуществлении совместной внутри-и-внекорабельной деятельности. Срок проведения: 2024 г.

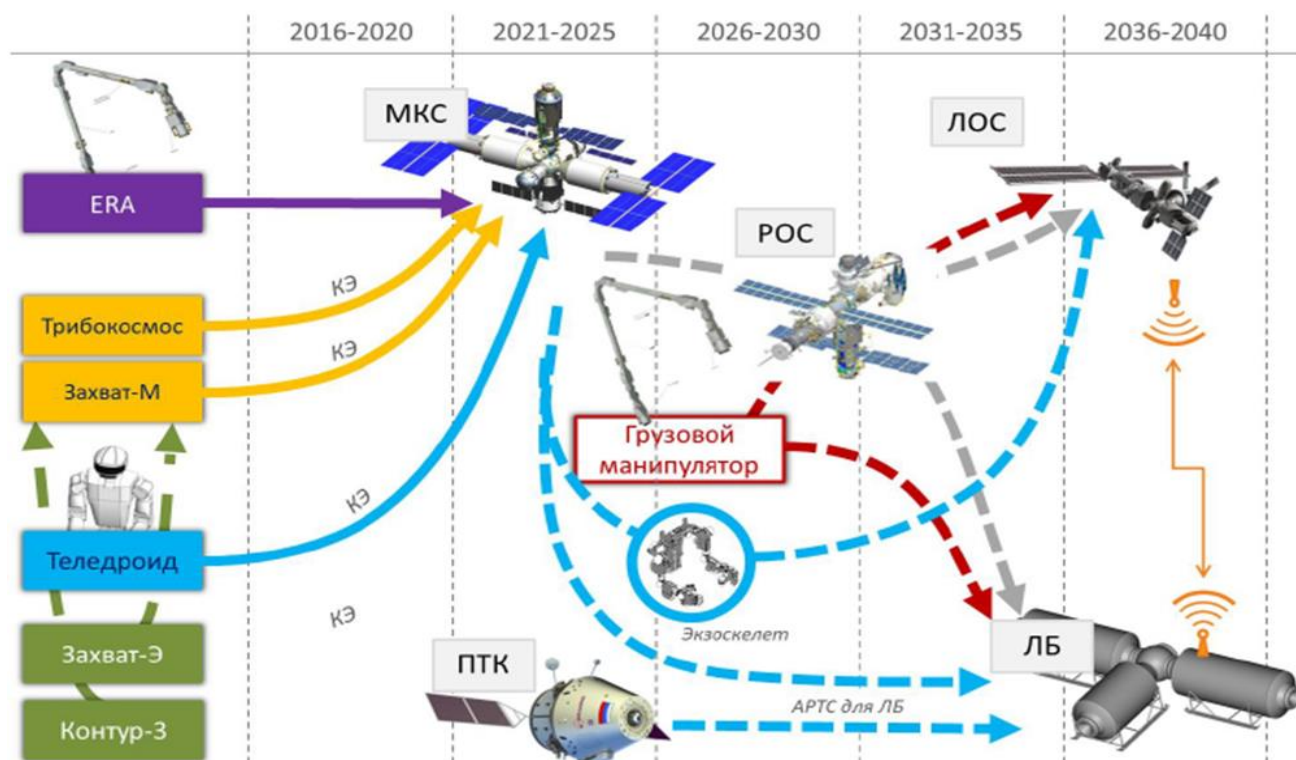


Рисунок 1.6 – Принятые ГК «Роскосмос» актуальные направления развития робототехнических систем

С целью разработки технологий дистанционного управления робототехническими системами при отработке экспериментальных задач на орбитальных станциях, обслуживания КА на околоземных, высоких и геостационарных орбитах, а также работы биологических и прочих систем на лунной базе предполагается проведение коимического эксперимента на борту Российского сегмента МКС с применением бортовой антропоморфной робототехнической системы с целью учета влияния вредных факторов космического полёта на процессы управления АРТС и совместной работы ее с космонавтом-оператором при осуществлении совместной внутри-и-внекорабельной деятельности [59, 60].

В АО «НПО «Андроидная техника» разработана и произведена бортовая антропоморфная робототехническая система «SAR-400» с возможностью дистанционного управления. Бортовая АРТС модернизирована с учетом

использования в условиях космоса. Данная система будет использоваться в космических экспериментах. Необходимые исследования в этом направлении выполнены в ЦР «Испытатель».

В ходе КЭ будут решаться следующие задачи:

1) Отработка технологий телеуправления копирующим АРТС с помощью экзоскелета оператором, находящимся как на борту РС МКС, так и на Земле.

2) Исследование возможностей выполнения роботом операций внутри-и-внекорабельной деятельности с использованием штатных бортовых инструментов.

3) Отработка процессов взаимодействия робота с космонавтами при совместном выполнении операций внутрикорабельной и внекорабельной деятельности.

4) Определение особенностей и перспектив практического применения телеуправляемого бортового АРТС для выполнения операционной, информационной и психологической поддержки деятельности экипажа в условиях орбитального полёта на борту РС МКС.

КЭ будет проводиться в три этапа [61]:

1-ый этап – отработка каналов телеуправления с использованием наземного прототипа робота и системы управления (совместно с DFKI), а также изготовление аппаратуры робота;

2-ой этап – лётная отработка с использованием созданного лётного образца робота, установленного внутри РС МКС;

3-ий этап – лётная отработка с использованием созданного лётного образца робота, установленного снаружи РС МКС.

Научная новизна КЭ «Теледроид» заключается в:

- разработке и изготовлении первого отечественного АРТС, предназначенного для эксплуатации в условиях открытого космического пространства;

- результатах исследования возможностей и особенностей интерактивного копирующего управления роботом космонавтом-оператором в условиях

невесомости при помощи ЗУКТ с силомоментной обратной связью и тактильным ощущением;

- разработке методик дистанционного копирующего управления АРТС с борта МКС и с Земли;

- результатах исследования возможности выполнения АРТС различных операций ВнеКД и внутрикорабельной деятельности (ВнуКД) с использованием штатного бортового инструментария при копирующем управлении роботом с борта МКС и с Земли;

- результатах исследования взаимодействия космонавта с АРТС в условиях орбитального полёта при совместном выполнении внутри-и-внекорабельной деятельности;

- результатах исследования возможностей и перспектив использования АРТС андроидного типа для информационной и психологической поддержки экипажей в условиях длительного космического полета.

Разработка и внедрение в космической технике АРТС позволит создать инновационную базовую технологию для освоения ближнего и дальнего космоса, отличающуюся многофункциональностью за счет широкого перечня выполняемых такими роботами операций и возможности использования их как на пилотируемых, так и на автоматических КА. Создание АРТС, выполняющих функции помощника человека, будет иметь также большой социальный эффект.

На основании вышеизложенного, представляется целесообразным и актуальным проведение КЭ, направленного на исследование возможностей использования АРТС для обеспечения поддержки внутри-и-внекорабельной деятельности космонавтов на РС МКС, а также определения перспектив использования их в дальнейшем в составе элементов перспективной космической инфраструктуры и напланетных (лунных) баз [62].

Рассмотрены примерные варианты коллаборативного взаимодействия космонавтов экспедиции МКС с антропоморфным роботом космического эксперимента «Теледроид» и европейским роботизированным манипулятором ERA для операционной поддержки внекорабельной деятельности. Исследование и

анализ изложенных в статье подходов о совместном использовании антропоморфной и манипуляционной робототехнической системы, экспериментальной отработки их коллаборативного применения (в рамках потенциально возможной интеграции европейского роботизированного манипулятора ERA с антропоморфным роботом космического эксперимента «Теледроид»), представляет интерес для дальнейшего развития и применения в перспективных космических программах [63, 64].

Запланирована программа робототехнического освоения Луны автоматами и перехода к «комбинированному» управлению лунным ровером с участием космонавта. Рассматривая вопросы коллаборации космонавтов с лунным ровером на предмет его использования как транспортного средства на поверхности Луны, необходимо принимать во внимание отечественные разработки в области автономных роботов для экстремальной среды, поскольку в ближайшей и среднесрочной перспективе именно этот класс роботов с высокой вероятностью будет использоваться для целей разведки в тех районах, которые будут выбраны для пилотируемых миссий к Луне. На Рисунке 1.7 представлена совмещенная АРТС и мобильная платформа.

Для работы в экстремальных условиях мало изученной среды для начального этапа робототехнического освоения Луны, как следует из проводимых научных экспериментов на МКС, рассматривается удалённое взаимодействие в режиме телеуправления, в котором человеку отводится роль оператора и/или контролёра [65, 66].

Одним из вариантов обеспечения преемственности этапов разведки поверхности Луны автоматами и перехода к типу управления со смешанной инициативой с участием космонавтов является использование способности современных РТК вести разведку территории, определение рисков коллизий с одновременным построением точной электронной карты маршрута. Это означает возможность реализации варианта поддержки оператора при контроле навигацию робота за счет построения в режиме реального времени перемещения на основе бортовой датчиковой информации карты окружающей среды, что даёт

возможность оператору быстрее и качественнее решить задачу навигации и уделить больше внимания выполнению других задач.

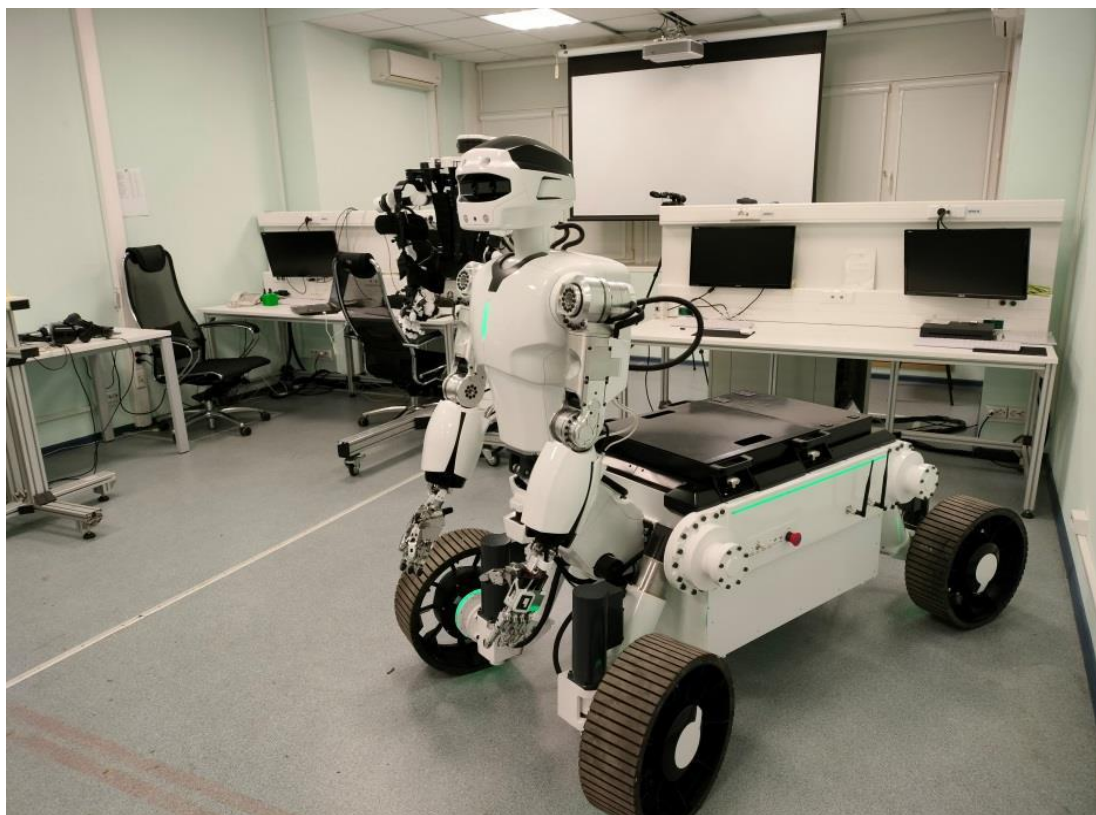


Рисунок 1.7 – Совмещенная АРТС и мобильная платформа

Распределение функций в этом случае выглядит таким образом, что робот может наносить на карту траекторию движения, свое текущее положение и контролируемые объекты, а оператор использует эту информацию для принятия решений о дальнейших действиях.

Взаимодействие человека с роботизированными системами на принципах коллаборации требует организации поддержания диалога в системе «человек-робот» и представляет собой сложную научную проблему, которая на прикладном уровне требует специальных исследований по разработке человеко-машинного интерфейса.

Для Российской орбитальной станции (РОС) в области «Исследование робототехнических и интеллектуальных систем для пилотируемых космических полетов» возможны следующие направления ЦР [67, 68]:

1) отечественных компонентов и материалов (элементов мехатроники и электроники, программного обеспечения, смазок, подшипников и т.п.), потребных с последующей сертификацией и унификацией для создания экспериментальных образцов и штатных робототехнических и интеллектуальных систем (РИС);

2) объектов и процессов для оценки адекватности их моделей, используемых при создании, испытании и исследовании экспериментальных образцов для ППКП, а также при подготовке космонавтов;

3) отечественных экспериментальных образцов роботов-помощников с элементами искусственного интеллекта, обеспечивающих деятельности космонавтов (в частности, при управлении др. бортовым оборудованием, научной аппаратурой и в составе групп);

4) отечественных экспериментальных образцов роботов-партнеров космонавтов, обеспечивающих бигеминальность и коллаборацию в процессе выполнения совместной деятельности;

5) отечественных экспериментальных образцов роботов-заместителей космонавтов, обеспечивающих замещение деятельности космонавтов (особенно актуально для орбитальных космических станций посещения, в перспективе – для напланетных баз).

6) интеллектуальных систем виртуальной, дополненной и смешанной реальности для обеспечения безопасной деятельности экипажей пилотируемых космических аппаратов;

7) операторских качеств космонавтов по применению в ручных режимах АРТС (в частности, для управления др. бортовым оборудованием, научной аппаратурой и в составе групп) в интересах адаптации подготовки космонавтов и усовершенствования этих систем для выполнения перспективных пилотируемых космических программ по исследованию и освоению объектов Солнечной системы;

8) отечественных ЛА для информационной поддержки экипажей после посадки спускаемого аппарата на Землю с орбитальной космической станции в рамках создания комплекса поиска и спасения космонавтов при старте пилотируемого транспортного корабля с космодрома «Восточный»;

9) отечественных роботизированных технологий и средств для лиц с ограниченными возможностями в условиях пилотируемого космического полета.

Рассматриваются потенциальные направления и перспективные варианты проведения ЦР по робототехнике в проекции на РОС, пилотируемого освоения и использования Луны, включающие [69, 70]:

1) обобщенный анализ основных направлений построения человеко-машинных интерфейсов в области робототехники на современном этапе позволяет сделать вывод, что эта область является одним из ключевых направлений развития искусственного интеллекта и она интенсивно развивается в последние годы в высокоразвитых странах мира;

2) возможнее наиболее перспективные для взаимодействия пользователей, операторов и разработчиков с компьютерными системами можно считать многомодальные интерфейсы, основанные на одновременной обработке разнородной информации (речевой, жестовой, текстовой, тактильной, миоэлектрических потенциалов мышц, вызванных потенциалов головного мозга и т.д.);

3) основные принципы организации многомодальных пользовательских интерфейсов, достоинства их применения и сложности разработки, подходы к объединению многомодальной информации, а также примеры разработанных в мире многомодальных интерфейсов и систем;

4) обобщенный анализ концептуальных подходов и особенностей построения интерфейса современных систем интеллектуального управления автономными мобильными АРТС (программных, адаптивных, экспертных, семиотических), а также возможностей их использования при разработке космических АРТС [71];

5) основные фундаментальные и прикладные задачи, которые должны способствовать скорейшему развитию в нашей стране научно-технической

области интеллектуальных интерфейсов человеко-машинного взаимодействия и их масштабному внедрению в реальные компьютерные системы;

6) обобщенный анализ тенденций развития робототехники, показывающий актуальность создания и применения сервисных роботов, предназначенных для оказания помощи и поддержки деятельности космонавтов, работающих внутри и на внешней поверхности пилотируемых космических станций и на Луне;

7) направления внедрения роботов-помощников и принципы их использования в пилотируемой космонавтике, концептуальные подходы к построению интерфейса взаимодействия космонавта с РТС в различных условиях применения;

1.4 Постановка задачи исследования

До настоящего времени в области пилотируемой космонавтики остается актуальной и недостаточно исследованной на реальных изделиях робототехники задача, каким образом можно наиболее рационально управлять действиями антропоморфного робота в дистанционном режиме с учетом коллаборации с АРТС. Ответы на эти вопросы могут дать эксперименты и испытания на наземных моделях и реальный космический эксперимент, отдельные составляющие которого уже к сегодняшнему дню апробированы участниками программы полетов на МКС.

Обобщая результаты анализа теоретических и прикладных исследований в области экстремальной робототехники, можно заключить, что проектирование бортовых АРТС, предназначенных для работы в экстремальных, опасных для человека условиях: в космическом полете и напланетных базах – одно из ведущих направлений развития науки и техники на современном этапе.

Можно выделить общую тенденцию развития робототехники в направлении увеличения автономности работы, точности манипулирования, движений и позиционирования роботов при учете неидеальных характеристик роботов, в условиях все более усложняющегося, не полностью определенного и

изменяющегося в процессе функционирования рабочего пространства. В существующих и проектируемых АРТС точность перемещения исполнительных звеньев роботов существенно зависит от датчиков программного движения, величины запаздывания в управляющем контуре, качества настройки коэффициентов обратной связи и др. В то же время, при увеличении сложности, разнообразия конструкций и выполняемых АРТС операций в условиях освоения космического пространства появляется ряд факторов, без учета которых ухудшается качество выполнения операций (точность, производительность) вплоть до невозможности их выполнения. Такими факторами являются: силовые воздействия от объектов манипулирования, упругие отклонения манипуляторов, инерционные воздействия при управляемом движении и остановке, препятствия на пути следования, зашумление сигнала, неточности или сбои датчиков обратной связи, несоответствие датчиков обратной связи разнообразным выполняемым задачам, накапливающиеся погрешности интегральных датчиков позиционирования в системе навигации мобильных платформ роботов [72].

В настоящее время при планировании пилотируемых космических программ перспективным видом управления бортовыми антропоморфными робототехническими системами является управление типа «копирующего режима» [73, 74, 75]. Принцип действия указанного типа управления заключается в копировании бортовой АРТС движений человека-оператора, одетого в ЗУКТ. Управление бортовой АРТС посредством ЗУКТ перспективно для использования в агрессивных и опасных средах, работа в которых опасна для здоровья человека. Управление бортовых АРТС с помощью ЗУКТ позволяет обеспечить безопасное проведение работ в открытом космосе. При этом осуществляется гибкий подход к реализации полетного задания [76].

Важной задачей управления бортовой АРТС в копирующем режиме является обеспечение точности управления, достижение полного подобия между движениями космонавта-оператора, облаченного в ЗУКТ, Рисунок 1.8 а, и кинематическими звеньями бортовой АРТС, Рисунок 1.8 б, образцы которых, например, применяются в универсальном компьютерном стенде

робототехнических систем (УКС РТС) ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» [77].



а)



б)

Рисунок 1.8 – Образцы применяемых в ЗУКТ и АРТС в УКС РТС:

а) космонавт-испытатель, облаченный в мобильный ЗУКТ;

б) технологический макет АРТС

Универсальный стенд бортовой АРТС с использованием технологического макета № 1 использовался ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» при выполнении тренировок космонавтов-испытателей по проведению экспериментальных работ по программе «Испытатель» [78]. Следует отметить, что движение бортовой АРТС не является абсолютно повторяющим движение человека-оператора, управляющего роботом посредством ЗУКТ. Данное рассогласование вызывается влиянием ошибок (ошибки возникают при погрешностях калибровки перед началом работы, в работе – систематические, так называемые, и накапливаемые). Происходит накопление ошибок при работе датчиков углового положения шарниров кинематических звеньев ЗУКТ

универсального стенда бортовой АРТС. Данные датчики используются при управлении приводах бортовой АРТС. Рассогласование вызывает также характеристики точной работе двигателей пространственного изменения кинематических звеньев бортовой АРТС. Накапливаются ошибки вычислений в управляющем контуре, Рисунок 1.9.

Перчатка ЗУКТ-М представляет собой исполнительную группу звеньев (ИГЗ), закреплённую опорными пластинами на перчатке.

На исполняющей группе звеньев пальцев перчатки располагаются датчики углового положения. Пять вибродвигателей закреплены на перчатке в районе фаланги пальцев. Указанные двигатели образуют обратную тактильную связь. Проводится проверка параметров калибровки точности установки углового положения соединения универсального узла и датчика углового положения.

Следует отметить, что присутствует гарантированное рассогласование данных управления движением от ЗУКТ с положением подобных модулей бортовой АРТС [72].

В случае управления бортовой АРТС на удалении точность управления рабочими органами обеспечивается с помощью технического зрения. Осуществление технического зрения производится с помощью шлема виртуальной реальности (ШВР). Шлем используется для представления космонавту-оператору ЗУКТ визуального пространства перед бортовой АРТС.

В состав ШВР включен контроллер ЗУКТ. Контроллер предназначен для сбора данных об угловых положениях шарниров ЗУКТ. Угловые положения шарниров отслеживают датчики. Данные от датчиков и ШВР передаются в ноутбук по интерфейсу.



Рисунок 1.9 – Классификация ошибок, возникающих при управлении бортовой АРТС с использованием ЗУКТ

Обратная тактильная связь в ЗУКТ реализуется с помощью вибродвигателей, установленных в перчатках, которые начинают воздействовать на пальцы рук оператора при манипулировании предметами АРТС или 3D-моделью АРТС.

Сложность оценки точности управления и позиционирования кинематических звеньев АРТС заключается в том, что количество звеньев,

линейные размеры, компоновка ЗУКТ с одной стороны, и управляемого АРТС с другой, как правило, отличаются.

В том случае, если мы пренебрегаем указанными ошибками, то, возможно предположить, что полное кинематическое подобие режима копирования достигается при получении полной аналогии числа кинематических участков и совпадения их длин бортовой АРТС с числом кинематических звеньев и размерами задающего устройства. Поскольку каждый космонавт-оператор обладает индивидуальным набором антропометрических параметров, достигнуть полное кинематическое подобие при режиме копирования невозможно, из-за несовпадения антропометрических параметров человека и задающего устройства.

При применении копирующего режима управления рабочими органами бортовой АРТС основной проблемой является неудовлетворительная точность исполнения целевых операций. ОА «НПО «Андроидная техника» изготовила отечественное управляющее устройство бортовой АРТС с точностью отработки рабочими органами базовой целевой операции около 9,8 см. В настоящее время данные о точности исполнения базовых целевых функций иностранных задающих устройств экзоскелетного типа отсутствуют. Требования по точности исполнения базовых целевых операций исполнительными органами бортовых АРТС достаточно высоки. Область использования российского АРТС SkyBot-F850, имеющего возможность работы в копирующем режиме, составляет реализация космических исследований [79].

Одним из возможных способов компенсации недостаточной точности исполнения базовых целевых операций, выполняемых бортовой АРТС с использованием копирующего режима, является визуальное наблюдение космонавтом-оператором окружающей робототехническую систему среды [80]. К сожалению, визуальное наблюдение увеличивает трудоёмкость и понижает эффективность исполнения базовых целевых операций. Некоторые тонкие работы при визуальном наблюдении становятся невыполнимыми [81, 82]. Причин указанного затруднения несколько. Из ряда причин выделяют: различие антропоморфных данных руки космонавта-оператора, задающего устройства и

рабочего органа бортовой АРТС; неадекватность векторов кинематических пар задающего устройства и векторов суставов рук оператора; передача угла поворота рычагов задающего устройства вместо угла поворота рук космонавта-оператора. Приоритетной задачей копирующего управления манипуляторами АРТС является повышение точности выполнения целевых операций, которое может быть достигнуто за счет осуществления копирования манипулятором АРТС не углов поворота рычажной системы ЭК, а специально введенных искусственных параметров, рассчитываемых на основе углов поворота руки оператора [83, 84].

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

Для достижения этой 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 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.

Решение основных задач опирается на использование и суммирование опыта в проектировании и эксплуатации коллаборативных робототехнических систем, математическом моделировании, методах обработки экспериментальных данных, и математическом программировании [85, 86]. В основу проведенных исследований легли методы математической статистики, дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа, методы машинного обучения.

Заключение по Главе 1

Анализ теоретических и прикладных исследований в области экстремальной робототехники позволил заключить, что проектирование АРТС, предназначенных для работы в экстремальных, опасных для человека условиях – одно из ведущих направлений развития науки и техники на современном этапе.

Выявлена общая тенденция развития робототехники в направлении увеличения автономности работы, точности манипулирования, движений и позиционирования роботов при учете неидеальных характеристик роботов, в условиях все более усложняющегося, не полностью определенного и изменяющегося в процессе функционирования рабочего пространства.

Для ППКП востребованным способом управления бортовой АРТС, в которых в качестве исполнительных устройств используются АРТС, остается управление в «копирующем режиме», реализуемое с помощью ЗУКТ посредством копирования действий космонавтов-операторов. Задачей в области управления бортовой АРТС в копирующем режиме является обеспечение точности управления, достижение полного подобия между движениями космонавта-оператора, облаченного в ЗУКТ, и кинематическими звеньями бортовой АРТС.

В соответствии с вышеизложенным сделан вывод, что разработка расчетно-экспериментального метода повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС, реализуемого на предварительных этапах, проводимых в наземных условиях и на этапе выполнения космической программы в перспективной планируемой космической программе, является актуальной научной задачей.

Определена цель работы и основные задачи, решаемые для достижения цели.

ГЛАВА 2 РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ БОРТОВОЙ АРТС

2.1 Формализация задачи разработки расчетно-экспериментального метода повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС

При управлении космонавтом-оператором бортовой АРТС с использованием копирующего режима управления, наблюдается несогласованность в движениях управляющего космонавта и бортовой АРТС.

Причинами рассогласования движений космонавта-оператора и бортовой АРТС является влияние неустраняемых аппаратными средствами ошибок в АРТС, которые были проанализированы в разделе 1.4.

Для повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС предлагается разработка математического и программного обеспечения по определению искусственных параметров базовых целевых операций. Данный метод состоит в определении аппроксимирующих регрессий между координатами, задаваемыми рукой человека-оператора в задающем устройстве, и координатами, получаемыми в процессе деятельности манипулятором бортовой АРТС. Для определения аппроксимирующих регрессий проводятся наземные эксперименты. В наземном эксперименте для каждой базовой целевой операции разрабатывается алгоритм повышения точности. С использованием определенных аппроксимирующих регрессий предполагается использование и перерасчет искусственных координат, посылаемых через программный модуль на персональном компьютере (ПК) оператора к бортовой АРТС, что дает возможность увеличить точность выполнения базовой целевой операции. Повышение точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС происходит за счет последовательного применения алгоритмов повышения точности базовых целевых операций бортовой АРТС при управлении с использованием ЗУКТ. На рисунке 2.1 представлен расчетно-

экспериментальный метод повышения точности позиционирования исполнительных органов 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.

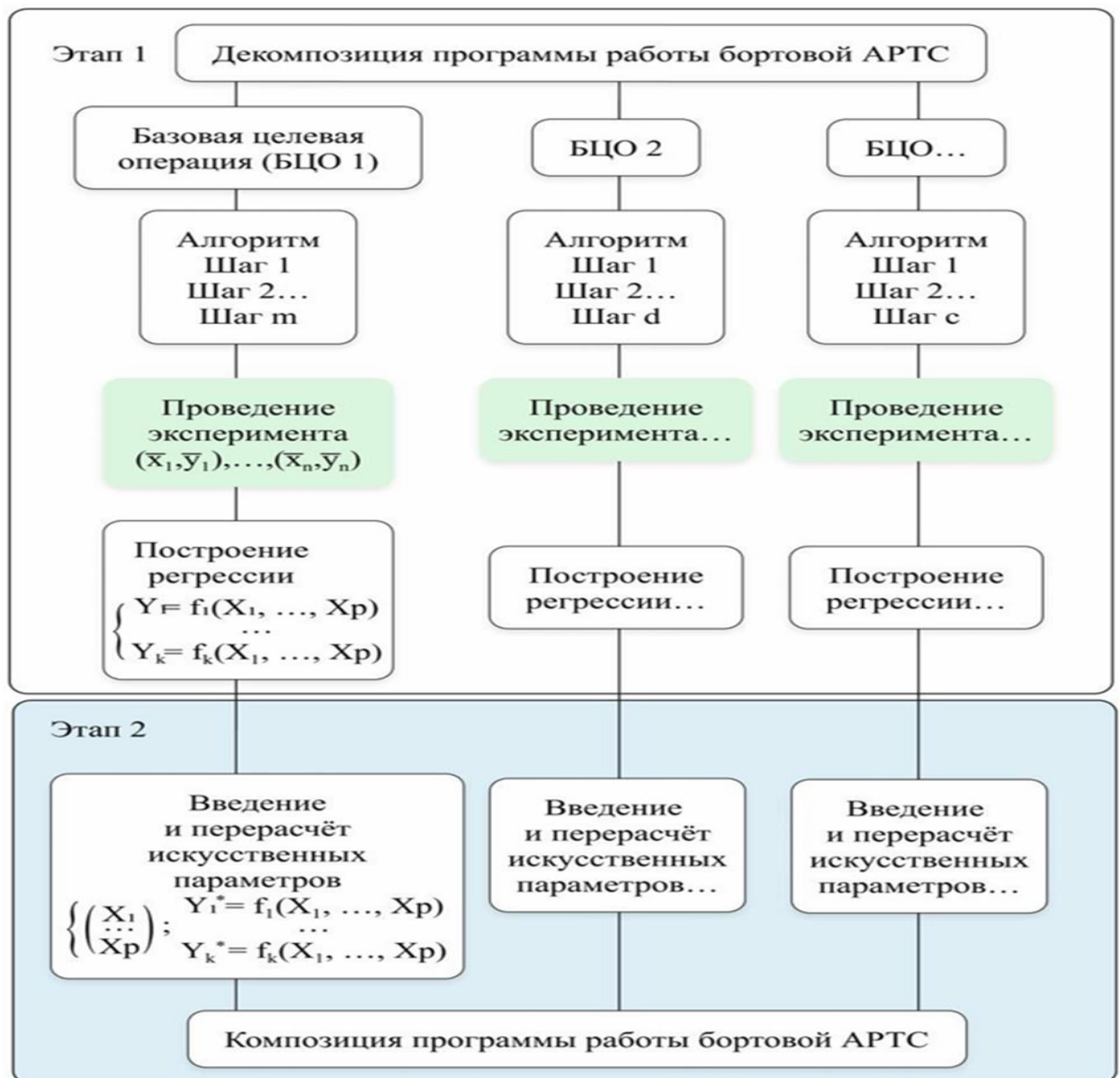


Рисунок 2.1 – Расчетно-экспериментальный метод повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС

Расчетно-экспериментальный метод повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС состоит из двух этапов: первый этап проводится на Земле во время предполетной подготовки, второй этап проводится во время космического полета.

На первом этапе происходит 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 вводятся следующие переменные:

$X = (X_1, \dots, X_p)$ – входная векторная переменная с компонентами $X_j, j = 1, \dots, p$, характеризующая бортовую АРТС;

$Y = (Y_1, \dots, Y_k)$ – 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.

С использованием экспериментальных данных записывается регрессионная зависимость, аппроксимирующая зависимость между координатами, определяемыми космонавтом-оператором в ЗУКТ, и координатами, полученными в результате работы манипулятора бортовой антропоморфной робототехнической системы:

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

Второй этап проходит в космическом полете. На этом этапе с помощью полученных регрессий проводится заведение и перерасчет искусственных

координат, передаваемых через программный модуль на ПК космонавта-оператора к бортовой АРТС:

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

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

2.2 Проведение экспериментального исследования точности управления оператором бортовой АРТС с помощью задающего устройства копирующего типа

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 2.2. Представленная робототехническая система управляется двумя космонавтами-операторами. Первый космонавт-оператор управляет мобильной платформой. В задачу космонавта-оператора входит доставка совмещенного АРТС в нужную точку лунной поверхности.

Второй космонавт-оператор управляет совмещенной АРТС с целью проведения базовых целевых операций. В качестве базовых целевых операций, выполняемых совмещенной с мобильной платформой АРТС, предполагается работа с различными видами управляющих органов, строительные работы, ремонтные работы и работы, связанные с проведением научной деятельности.

На базе ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина» проведено экспериментальное исследование по изучению точности управления космонавтом-оператором совмещенной АРТС при проведении базовых целевых

операций с помощью ЗУКТ. Совмещенная АРТС аналогична бортовой АРТС, используемой в ППКП. На Рисунке 2.3 изображено мобильное автоматизированное рабочее место управления оператором бортовой АРТС с использованием ЗУКТ.



Рисунок 2.2 – Совмещенные АРТС и мобильная платформа

На Рисунке 2.3 приняты следующие обозначения: 1 – шлем виртуальной реальности, который предназначен для передачи оператору ЗУКТ стереоизображения рабочей зоны АРТС; 2 – ЗУКТ; 3 – ноутбуки, преобразующие сигнал об угловых положениях шарниров ЗУКТ с 32 датчиков углового положения и передающие его АРТС.

В рамках экспериментального исследования проводилось две серии экспериментов. Первая серия экспериментов заключалась в исследовании точности базовой целевой операции попадания рукой бортовой АРТС рычага управляющего устройства в заданный угол поворота, вторая серия экспериментов заключалась в исследовании точности базовой целевой операции попадания рукой бортовой АРТС в требуемую точку.

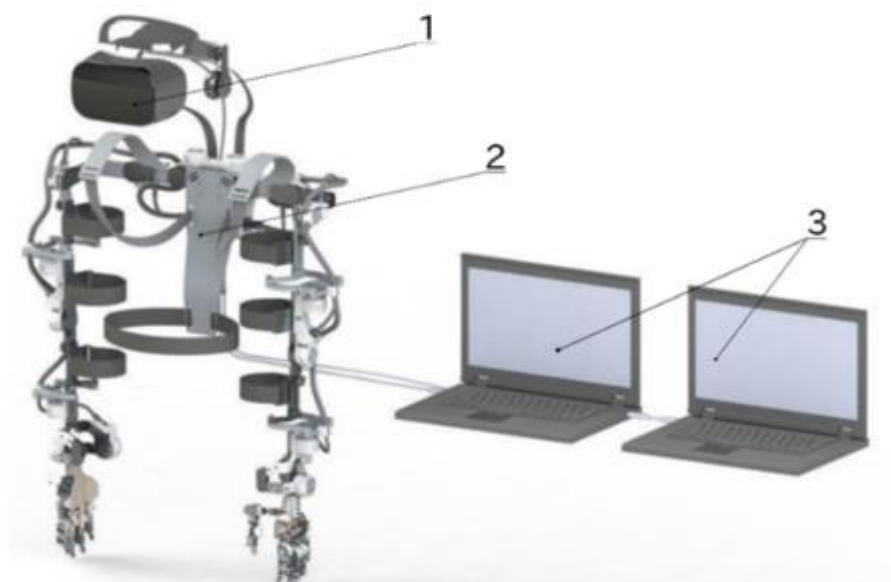


Рисунок 2.3 – Мобильное автоматизированное рабочее место управления оператором бортовой АРТС с использованием ЗУКТ

Первая серия экспериментов состояла в получении информации для формирования регрессии, аппроксимирующей соотношения между углами поворота управляющего рычага, обрабатываемыми человеком-оператором с помощью задающего устройства и углами поворота управляющего рычага, полученными в результате действий бортовой АРТС. Вторая серия экспериментов состояла в получении информации для формирования регрессии, аппроксимирующей соотношения координат точек, обрабатываемых человеком-оператором с помощью задающего устройства и координат точек, полученными в результате действий бортовой АРТС.

Рычаги управляющего устройства специально изготовлены для проведения первой серии эксперимента.

Эксперимент по получению информации для формирования регрессии, аппроксимирующей соотношения между углами поворота управляющего рычага, обрабатываемыми человеком-оператором с помощью задающего устройства и углами поворота управляющего рычага, полученными в результате действий бортовой АРТС проходил по следующему алгоритму. Космонавт-оператор и

АРТС отклоняли на определенный угол рычаги управляющего устройства, которые находились на уровне их таза, Рисунок 2.4. Перед началом эксперимента каждое рычаги управляющего устройства калибровалось для установки на 0° по всем осям, чтобы зафиксировать начальное положение, от которого в дальнейшем отсчитываться отклонения. После калибровки космонавт-оператор начинал процесс управления: он захватывал свой рычаг управляющего устройства и следил за тем, чтобы робот одновременно захватывал свой [87].

После захвата рычага управляющего устройства космонавт-оператор отклонял его на 20° по вертикали в заданном направлении. Для фиксации вертикального угла отклонения был использован фиксированный упор.

Система управления роботом должна была обеспечить повторение движений роботом с минимальной погрешностью. Это означает, что при каждом отклонении рычага управляющего устройства космонавтом-оператором, робот должен был повторить его движения. Для каждого направления отклонения рычага управляющего устройства эксперимент повторялся 40–50 раз, чтобы собрать достаточное количество данных для последующего анализа. Рычаг управляющего устройства после каждого отклонения возвращался в исходное положение с помощью пружинного механизма.

Эксперимент проводится с изменением угла в горизонтальной плоскости на 45° , что составляет в общем случае серию из 8 экспериментов, Рисунок 2.4.

Эксперимент разработан так, что космонавт-оператор и робот действуют в идентичных условиях [88]. Это позволяет проводить анализ с минимизацией случайных факторов, которые могли бы повлиять на точность движений робота. Полученные данные отражают отклонения рычага управляющего устройства космонавта-оператора и бортовой АРТС в разных плоскостях.

Во время проведения эксперимента данные с рычагов управляющего устройства записываются в реальном времени с помощью программы Simulink, установленной на компьютер.



Рисунок 2.4 – Проведение эксперимента с рычагом управляющего устройства

Поскольку запись данных осуществляется непрерывно, на этапе обработки проводится выборка моментов, когда джойстик находился в активном отклонении, чтобы исключить периоды, когда джойстик находится в покое. Это позволяет сосредоточиться на данных, которые непосредственно отражают динамику взаимодействия космонавта-оператора и робота [89].

После первичной выборки данные поступают на дальнейшую обработку. Для анализа используется программное обеспечение Minitab, в котором проводится проверка выборки на нормальность распределения.

Нормальное распределение является базовым предположением для многих статистических методов анализа данных, и в случае успешной проверки этого предположения, можно продолжать анализ с использованием соответствующих математических моделей.

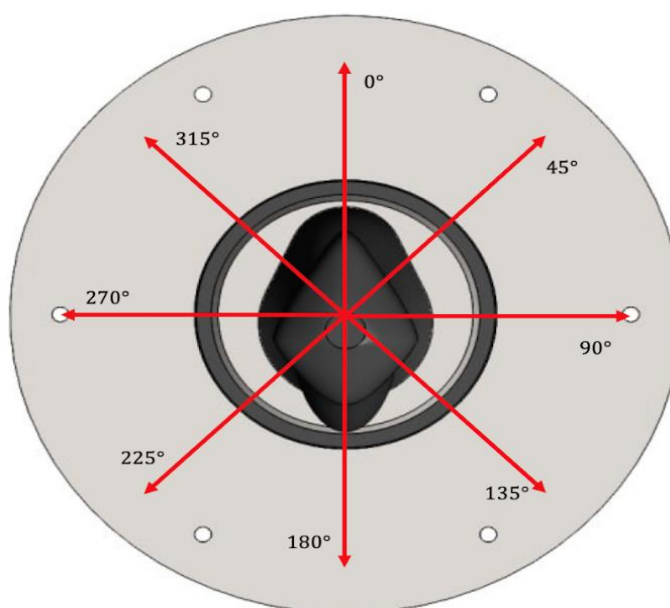


Рисунок 2.5 – Схема проведения эксперимента по исследованию точности целевой операции попадания рукой бортовой АРТС рычага управляющего устройства в заданный угол поворота

Проверка на нормальность позволяет убедиться, что отклонения углов рычага управляющего устройства космонавта-оператора и робота имеют форму распределения, близкую к нормальной, что делает возможным дальнейшее построение моделей для анализа зависимости между этими углами.

После проведения анализа на нормальность данных производится построение регрессионной модели, которая описывала зависимость между отклонениями рычага управляющего устройства космонавта-оператора и бортовой АРТС. Для этого используется метод наименьших квадратов, обеспечивающий минимизацию ошибок между реальными и предсказанными значениями отклонений робота. Полученная регрессия позволяет сделать вывод о степени точности воспроизведения движений АРТС. После построения модели оценивается её точность с помощью коэффициента детерминации R^2 , который показывает, насколько хорошо модель объясняет вариацию отклонений рычага управляющего устройства роботом на основе данных об отклонениях джойстика космонавтом-оператором.

Полученные в результате эксперимента регрессии будут использованы для введения и перерасчета искусственного угла отклонения рычага управляющего устройства космонавта-оператора, передаваемого через программный модуль на ПК оператора к бортовой АРТС.

Эксперимент проводится с тремя операторами. Оператор 1 – космонавт Д.А. Петелин, имеет опыт работы по управлению АРТС с помощью ЗУКТ, имеет близкие к ЗУКТ антропометрические характеристики. Оператор 2 – космонавт А.Ю. Кикина, имеет опыт работы по управлению АРТС с помощью ЗУКТ, имеет расхождение антропометрических характеристик с параметрами ЗУКТ. Оператор 3 – А.И. Ермоленко не имеет опыт работы по управлению АРТС с помощью ЗУКТ, имеет расхождение антропометрических характеристик с параметрами ЗУКТ.

Эксперимент проводился с целью формирования базы регрессий, аппроксимирующих отношения между углами поворота управляющего рычага, отрабатываемыми человеком-оператором с помощью задающего устройства и углами поворота управляющего рычага, полученными в результате действий бортовой АРТС для трех космонавтов-операторов.

Вторая серия экспериментов заключалась в исследовании точности целевой операции попадания рукой бортовой АРТС в требуемую точку. Космонавт-оператор в режиме копирующего управления устанавливает манипулятором бортовой точки на рабочей плоскости. Полученные в ходе эксперимента результаты использованы для построения аппроксимирующей зависимости между координатами точек, устанавливаемых рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и точек, устанавливаемых рукой бортовой АРТС.

2.3 Разработка рычага управляющего устройства

Для проведения экспериментальных исследований на базе лаборатории робототехники в ФГБН «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» по копированию АРТС движений космонавта-оператора в ЗУКТ при установке угла рычага

управляющего устройства на рабочих плоскостях разработаны требования и изготовлен рычаг управляющего устройства.

Рычаг управляющего устройства относится к классу специализированных инструментов, способных выполнять сложные и точные операции. В ходе подготовки эксперимента рассмотрен процесс разработки рычага управляющего устройства, включая выбор материалов, конструирование механизма, разработку программных средств для взаимодействия с рычагом, а также тестирование и оптимизацию.

Требования, предъявляемые к рычагу управляющего устройства, зависят от конкретной области применения и типа проводимых экспериментов. Предъявляемые к рычагу управляющего устройства требования формулируются следующим образом. Рычаг управления должен обеспечивать:

- перемещение в пространстве с минимальным возможным отклонением (люфтом), позволяющее обеспечить точное позиционирование;
- автоматическое возвращение в начальное положение по окончании нагрузки. Возвращение рычага управляющего устройства в начальное положение позволяет оператору быстрее осуществлять переход между задачами без необходимости выполнения ручной операции возвращения рычага в исходное положение;
- при разработке рычага управления должна учитываться эргономика работы с устройством. Это означает, что при проектировании рычага управляющего устройства должен быть использован понятный пользователю;
- прочностные характеристики; рычаг управляющего устройства должен быть достаточно легким и компактным, чтобы быть удобным в использовании, но при этом достаточно прочным, чтобы выдерживать нагрузки, возникающие при выполнении задач;
- запись данных; рычаг управляющего устройства должен иметь возможность записи данных в ходе проведения эксперимента, таких как координаты перемещения, скорость, сила и другие параметры. Эти данные могут

быть использованы для анализа результатов эксперимента, а также для настройки и калибровки устройства;

– низкая стоимость, рычаг управляющего устройства должен быть разработан таким образом, чтобы его стоимость была минимальной при сохранении функциональных качеств.

Рычаг управляющего устройства представляет собой качающуюся в двух плоскостях вертикальную ручку.

Управляющий рычаг дает возможность работать с виртуальным объектом в области двух или трех координат. Координатные оси «X» и «Y» определяют область работы с объектом в плоскости, а вертикальная координатная ось «Z» дает возможность пространственного позиционирования объекта. Вертикальная координатная ось «Z» определяется вращением рукоятки рычага вокруг вертикальной оси. Используемые рычаги управляющего устройства представлены на Рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Рычаги управляющего устройства

Программное обеспечение, получив информацию о координатах «X-Y-Z», позволяет пользователю управлять неким виртуальным объектом, отображаемым на мониторе. На ручке рычага управляющего устройства и на его основании

обычно располагаются кнопки, переключатели, слайдеры, крестовина и другие управляющие элементы различного назначения.

По принципу действия рычаги управляющего устройства можно разделить на следующие виды:

Дискретные – сенсоры таких рычагов управляющего устройства могут принимать два значения: «0» или «1», включён/выключен. Для задания одного информационного кода определенного направления управляющий рычаг перемещают в крайние положения. Для бесконечного повторения кода рычаг удерживается в крайнем положении.

Аналоговые – в этом случае управляющие рычаги позволяют оперировать информационными кодами в полном диапазоне в зависимости от угла отклонения рукоятки: большее отклонение рычага управляющего устройства вызывает большее цифровое значение кода. Разрешение используемых сенсоров и ход рычага управления определяют поле цифрового значения кода. После калибровки подобные Применение аналоговых рычагов управления, при соответствующей калибровки устройства, возможно для определения абсолютной позиции.

Аналоговые рычаги управляющего устройства бывают одноосными и двухосными. При креплении рычага на карданном шарнире устанавливается одноосный сенсор: для примера, шарнир перемещается влево-вправо, а соединенный с ней рычаг – вверх-вниз. Перемещение рукояти относительно шарнира и шарнира относительно основания рычага фиксируется сенсорами.

Чертёж рычага управляющего устройства, Рисунок 2.7, выполнен в программе CAD для 3D-проектирования SolidWorks. Для изготовления основных элементов рычага управляющего устройства выбран метод 3D печати PETG пластиком, Рисунок 2.8.

Использованный метод 3D-печати при производстве составляющих частей конструкции рукояти управления обладает рядом преимуществ:

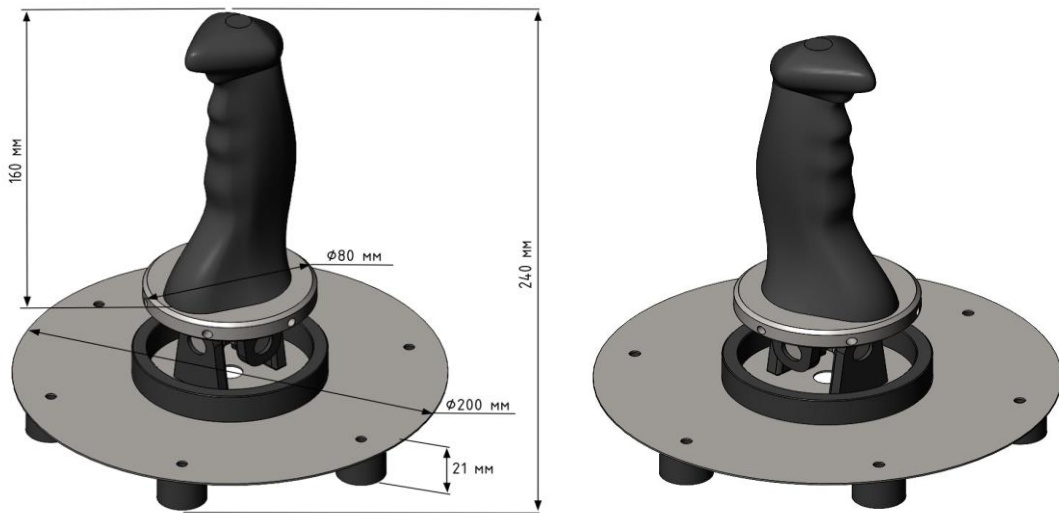


Рисунок 2.7 – Чертёж рычага управляющего устройства

– скорость производства, 3D-печать позволяет быстро создавать прототипы и конечный продукт, что сокращает время разработки;

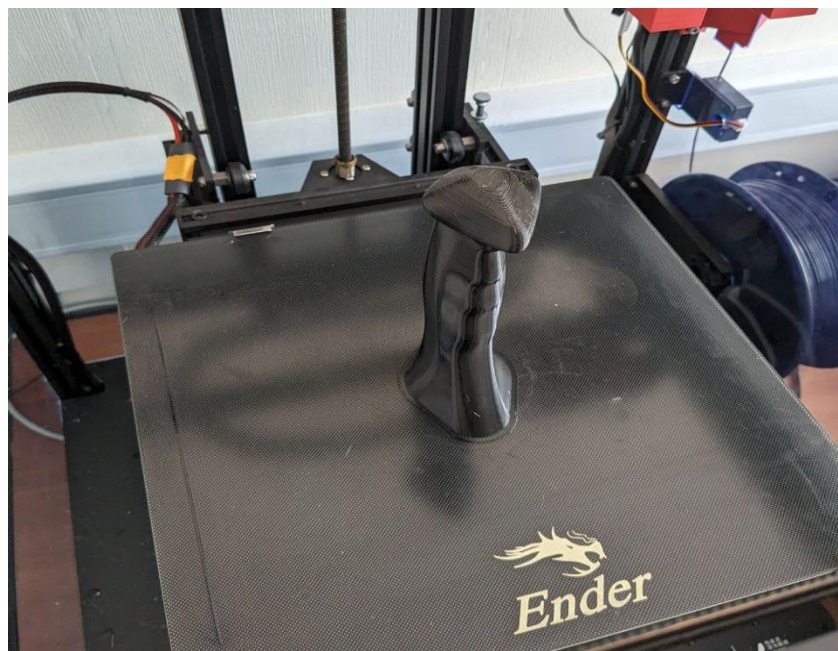


Рисунок 2.8 – Метод 3D печати PETG пластиком

– гибкость дизайна, технология 3D-печати позволяет создавать сложные формы и геометрии, которые трудно или невозможно изготовить традиционными

методами, что дает большую свободу в дизайне и возможность адаптировать устройство под конкретные задачи;

- простота модификации, изменения в дизайне можно внести быстро и легко, просто изменив файл 3D-модели. Это позволяет оперативно реагировать на отзывы пользователей и улучшать устройство;

- экономия затрат, 3D-печать может быть более экономичным способом производства небольших партий или индивидуальных заказов, чем традиционное массовое производство;

- точность и качество, современные 3D-принтеры способны создавать детали с высокой точностью и хорошим качеством поверхности, что важно для функциональности и внешнего вида устройства.

Для производства рычага управляющего устройства использован PETG пластик, обладающий прочностью и способный выдержать высокие нагрузки. Указанные свойства обосновывают выбор PETG пластика для изготовления рычага управляющего устройства.

Для обеспечения экспериментальному устройству необходимой прочности и устойчивости рычаг управляющего устройства крепится на стальной пластине. Шарнир рукояти управляющего устройства выполнен в виде карданного соединения, прикрепленного к стальному основанию.

Для обеспечения автоматического возвращения шарнирного устройства в начальное состояние после окончания воздействия, экспериментальное устройство оснащено конструкцией, состоящей из шести пружин. Расположенные на рычаге управляющего устройства пружины создают равное усилие по всем направлениям, позволяющее осуществить плавное и точное возвращение в исходную позицию.

На Рисунке 2.9 представлены изображения итоговой сборочной единицы – рычага управляющего устройства.

Для определения положения рычага управляющего устройства в пространстве использован акселерометр.

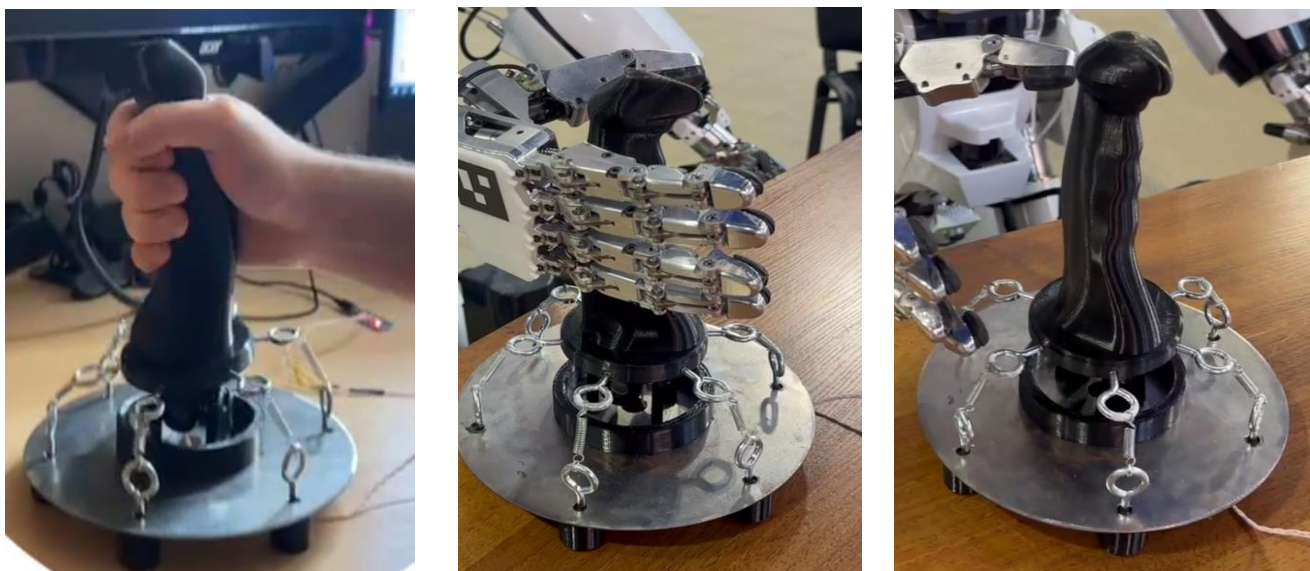


Рисунок 2.9 – Сборочная единица рычага управляющего устройства

Этот датчик позволяет измерять ускорение вдоль трех осей, что дает возможность точно определить угол поворота ручки относительно вертикальной оси вращения. Акселерометр обеспечивает высокую точность позиционирования и позволяет избежать использования сложных механических систем.

Основная микросхема – модуль GY-521 (MPU-6050), который содержит в себе акселерометр и гироскоп, а также датчик температуры, Рисунок 2.10.

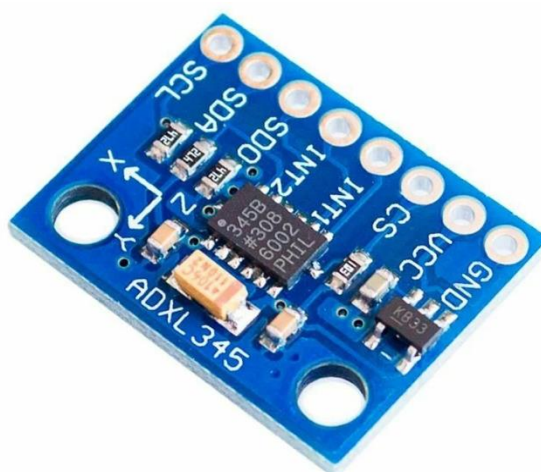


Рисунок 2.10 – Модуль GY-521

Гироскоп используется для измерения угловых скоростей, а акселерометр – линейных ускорений. Совместное использование акселерометра и гироскопа позволяет полноценно определить движение тела в трехмерном пространстве.

Характеристики модуля GY-521 (MPU6050):

- питание: 3,5 – 6 В;
- ток потребления: 500 мкА;
- акселерометр диапазон измерений: $\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16g$;
- гироскоп диапазон измерений: $\pm 250 \ 500 \ 1000 \ 2000^\circ / s$;
- интерфейс: I2C.

Для обработки снимаемой информации используется 16-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Для измерения температуры встроен датчик температуры с диапазоном измерений от $-40^\circ C$ до $+85^\circ C$.

Для связи с модулем используется плата Arduino Nano V3, которая связывает ПК с датчиком и записывает получаемые данные.

В экспериментальной установке использована шина I2C, для связи с Arduino. В качестве вспомогательного устройства используется датчик MPU-6050. Для считывания исходных данные и для определения требуемого диапазона измерений выходы SDA и SCL соединяются с выходами на плате Arduino. Принципиальная схема подключения Arduino и датчика шины I2C представлена на Рисунке 2.11.

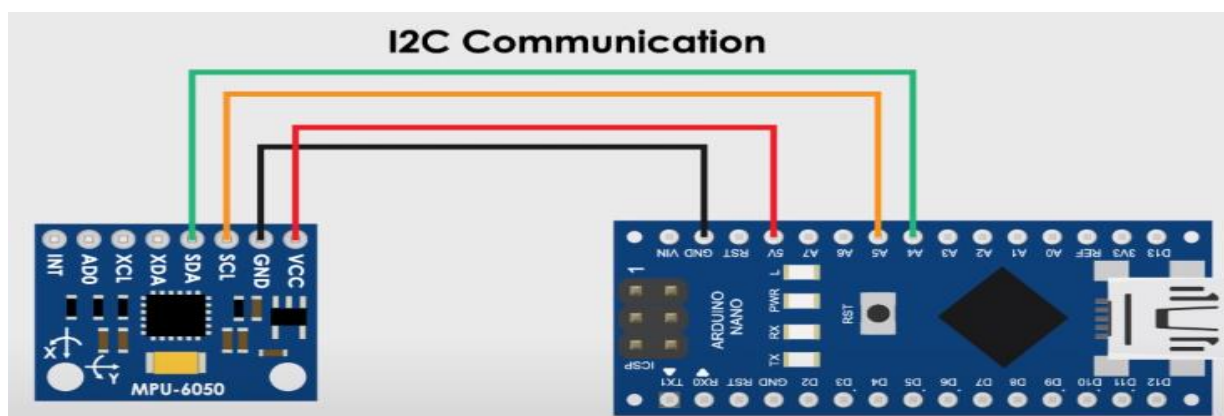


Рисунок 2.11 – Схема соединения Arduino и датчика шиной I2C

Назначение выводов:

VCC – «+» питание модуля 3.3 В до 5 В;

GND – «-» питание модуля;

SCL – линия синхронизации для протокола I2C;

SDA – линия передачи данных протокола I2C.

Если прибор размещен строго горизонтально и не движется, то проекции ускорения силы тяжести на оси X и Y равны нулю. Сила тяготения воспринимается только чувствительными элементами вертикальной оси Z .

Во время движения объект постоянно то ускоряется, то замедляется, идеально равномерного движения не существует. Это и позволяет использовать акселерометр не только для определения положения объекта, но и для определения динамических параметров при движении.

Акселерометр регистрирует сумму ускорения при движении и гравитационные проекции ускорения на оси X , Y и Z , которые преобразуются в угол отклонения с точностью до 1° .

Разработка программного обеспечения для удобного взаимодействия с рычагом управляющего устройства является неотъемлемой частью процесса создания этого устройства. Программное обеспечение играет ключевую роль в управлении и настройке рычага, а также в сборе и анализе данных, полученных в ходе экспериментов.

Среда Matlab Simulink использована в качестве программного обеспечения. Matlab Simulink является удобным инструментом при моделировании системы управления. Для обеспечения удобного взаимодействия с рычагом управляющего устройства среда дает возможность использовать графический интерфейс.

Для управления платой Arduino, являющейся связующим звеном компьютера и рычага управляющего устройства, используется модель в Matlab Simulink. На Arduino поступают данные от ПК и передаются на рычаг, а также собираются сведения для передачи на ПК.

Моделью в среде Matlab Simulink, разработанной для управления экспериментальной установкой, принимаются значения с акселерометра, который подключен к плате Arduino посредством шины I2C. С помощью акселерометра происходит измерение проекций ускорения вдоль трех осей. На основании измеренных проекций ускорения определяются углы поворотов рычага управляющего устройства относительно оси вращения.

Встроенные в модель математические функции пересчитывают проекции ускорений в виде градусов. Это позволяет точно определить положение рычага.

Определенные в градусах положения рычага фиксируются в файле для дальнейшего анализа и, при необходимости, повторения эксперимента. Накопленные материалы дают возможность проведения анализа полученных результатов и сравнения различных сценариев.

Заключение по главе 2

При управлении космонавтом-оператором бортовой АРТС с использованием копирующего режима управления, наблюдается несогласованность в движениях управляющего космонавта и бортовой АРТС.

Для минимизации рассогласования движений космонавта-оператора и бортовой АРТС проведена разработка расчетно-экспериментального метода, который повышает точность позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС. Суть метода состоит в декомпозиции рабочих программ бортовой АРТС на базовые целевые операции. Для повышения точности выполнения бортовой АРТС базовых целевых операций метод полагает разработку специальных алгоритмов. Следующий шаг заключается в проведении наземного эксперимента для получения данных по рассогласованию движений космонавта-оператора и бортовой АРТС.

На основании результатов эксперимента устанавливается регрессия, аппроксимирующая зависимость между параметрами, полученными в результате

работы человека-оператора с использованием копирующего управления, и параметрами, полученными при работе манипулятором бортовой АРТС.

Следующим шагом, предусмотренным методом, является расчет искусственных параметров с использованием полученных аппроксимирующих регрессий и ввод их с помощью программного модуля, установленного на ПК оператора к бортовой АРТС. Данный шаг метода проходит в режиме реального времени. Заключительным шагом является композиция базовых целевых операций в программу работы и проведение программы работы бортовой АРТС.

Проведена разработка программы проведения экспериментов. Проведены наземные эксперименты по исследованию точности базовых целевых операций, заключающихся в попадании манипулятором бортовой АРТС рычага управляющего устройства в требуемый угол поворота и попадания манипулятором бортовой АРТС в заданную точку.

Целью проводимого эксперимента являлся сбор данных, с помощью которых были записаны аппроксимирующие регрессии, устанавливающие зависимости между углами отклонений рычага управляющего устройства, устанавливаемыми человеком-оператором с использованием копирующего режима, и углами отклонений рычага управляющего устройства, полученными в результате выполнения целевой операции манипулятором бортовой АРТС, а также, записаны аппроксимирующие регрессии, устанавливающие зависимости между координатами точек, задаваемых человеком-оператором с использованием копирующего режима, и точек, выставляемых манипулятором бортовой АРТС.

Для проведения экспериментов разработан и изготовлен на 3 – D принтере рычаг управляющего устройства, адаптированный к захвату рукой космонавта-оператора в перчатке ЗУКТ и рукой бортовой АРТС. С помощью рычага управляющего устройства формируется сигнал и передается в ПК, в котором генерируются команды управления для передачи их бортовой АРТС в копирующем режиме.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ УГЛОВ ПОВОРОТА РЫЧАГОМ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА БОРТОВОЙ АРТС

3.1 Разработка алгоритма повышения точности базовой целевой операции попадания рукой бортовой АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота

Проведены экспериментальные исследования первой серии на базе лаборатории робототехники в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» по копированию бортовой АРТС движений космонавта-оператора в ЗУКТ по отклонению рычага управляющего устройства. Отклонения производили в горизонтальной плоскости основания рычага на заданный угол в 20 градусов от вертикального исходного нулевого положения рычага управляющего устройства по 40-50 раз в каждой из 8 рабочих вертикальных плоскости. В каждом из направлений отклонений рычага управляющего устройства были выявлены значительные рассогласования от его требуемого положения. На Рисунке 3.1 представлены рассогласования (ошибки), определенные как углы отклонения от заданного положения, выраженные в градусах в виде красных и синих точек. Левая вертикальная прямая моделирует рассогласования угла отклонения от руки оператора космонавта-оператора в ЗУКТ, а правая вертикальная прямая моделирует рассогласования угла отклонения, отработанные рукой бортовой АРТС в копирующем режиме работы. Видно, что рассогласования достигают 5-7 градусов. Точность выполнения различных сложных работ бортовой АРТС обуславливается базовой целевой операцией попадания манипулятором бортовой АРТС рычагом управляющего устройства в требуемый угол отклонения.

Проведенное экспериментальное исследование позволило собрать данные для записи регрессионных зависимостей углов отклонения рычага управляющего устройства космонавтом-оператором от углов отклонения рычага управляющего устройства манипулятором бортовой АРТС для восьми горизонтальных

направлений отклонения устройства для трех операторов, описанных в предыдущем разделе.

Регрессионные зависимости относятся к классу моделей полиномиальной регрессии.

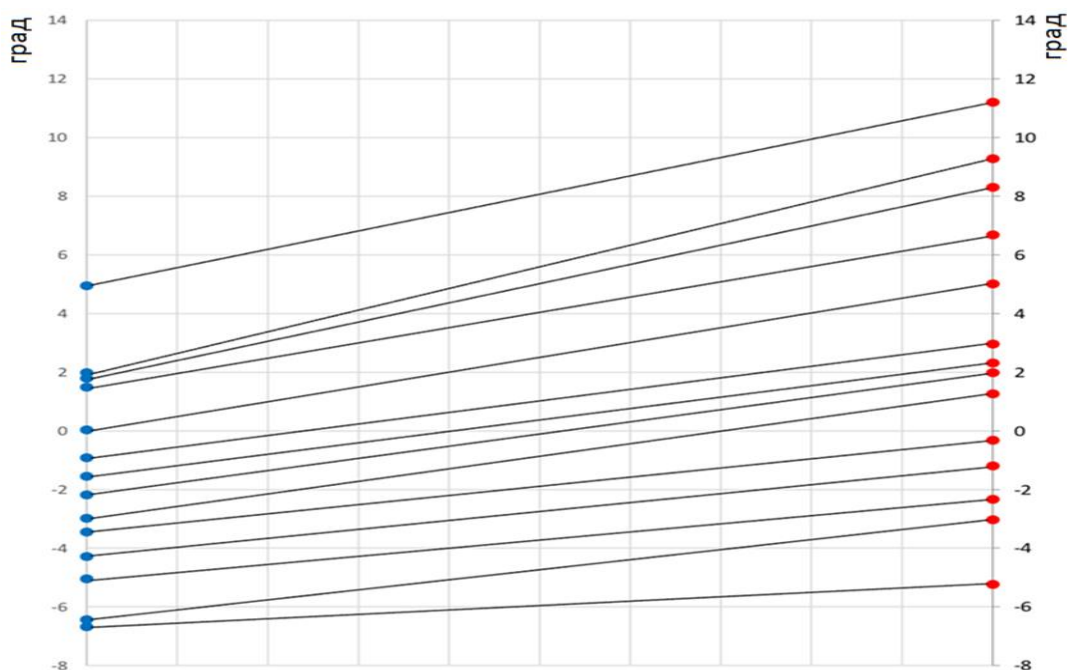


Рисунок 3.1 – График соответствия между отклонениями рычага управляющего устройства, производимого космонавтом-оператором (синего цвета) и отклонениями рычага управляющего устройства, производимого бортовой АРТС (красного цвета)

Для математической формализации задачи построения регрессии и выбора статистической метрики для оценки ее точности вводятся следующие переменные:

x – фактическое значение угла отклонения рычага управления у бортовой АРТС от заданного, y – фактическое значение угла отклонения рычага управления у космонавта-оператора; $\hat{y}(x)$ – предсказанное регрессионной моделью искусственного значения угла отклонения рычага человека от фактического значения угла отклонения рычага АРТС.

В результате проведения n экспериментов получено множество измерений $x(i), y(i); i = 1, \dots, n$. $\bar{y}$ – среднее значение угла отклонения рычага управления у космонавта-оператора.

Оценка соответствия регрессионных зависимостей экспериментальным данным проводилась с использованием статистической метрики – скорректированный коэффициент R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

представляет собой единицу за вычетом доли необъяснимой дисперсии (или дисперсии случайной ошибки в модели регрессии) в дисперсии зависимой переменной. Коэффициент представляет собой универсальный показатель, который характеризует уровень качества записанной аппроксимирующей регрессии. Скорректированный коэффициент определяет значение уровня точности прогноза. Приближение значения скорректированного коэффициента R^2 к единице означает уменьшение дисперсии случайной ошибки аппроксимирующей регрессии и указывает на высокую точность аппроксимации.

В ракетно-космической отрасли регрессионные модели относят к трем группам. Группы различаются по уровню качества регрессионной модели, определяемому в соответствии с скорректированным коэффициентом R^2 . Группы приведены в Таблице 3.1.

Качество модели 0 – 0,6 свидетельствует о недопустимости ее применения для прогнозирования.

Записанные регрессии позволяют определить для каждого человека-оператора углы поворота рычага управляющего устройства человека по заданному значению угла поворота рычага устройства, которым управляет бортовая АРТС. С этой целью на языке программирования Матлаб записан Программный модуль. Модуль называется «Определение угла».

Таблица 3.1 – Уровни качества регрессионной модели

R^2	Уровень качества модели
0,8 – 1	Модель хорошего качества
0,6 – 0,8	Модель приемлемого качества
0 – 0,6	Модель плохого качества

Разработан алгоритм, использование которого повышает точность целевой операции установки манипулятором бортовой АРТС рычага управляющего устройства в требуемый угол поворота. Алгоритм представляет собой три этапа, показанные на схеме на Рисунке 3.2. Рассмотрим подробнее содержание этапов.

На этапе 1 в наземных условиях проводится обучение космонавта-оператора работе в ЗУКТ с бортовой АРТС. При отсутствии необходимости предварительного обучения, первый этап пропускается.

Второй этап осуществляется также в наземных условиях. Предполагается проведение серии экспериментов для позиционирования углов поворотов рычага управляющего устройства, отрабатываемых рукой человеком-оператором и манипулятором бортовой АРТС с целью получения выборки. Экспериментальные Выбор горизонтальных углов отклонения рычага проводился таким образом, чтобы они равномерно покрывали рабочую область человека-оператора. Формирование аппроксимирующей регрессии проводится с использованием сформированной выборки подэтапе 2.3 с использованием программы Minitab 19.

Если необходимая точность по скорректированному коэффициенту $R^2 \geq 0,8$ не достигается, предполагается возвращение на этап 1 для проведения дополнительной подготовки оператора. В случае достижения требуемой точности наземные работы заканчиваются.

Выполнение космической программы происходит на третьем этапе. После выбора космонавтом-оператором требуемого угла поворота рычага управляющего устройства манипулятором бортовой АРТС в горизонтальном направлении, значение угла отправляется на ПК в Программный модуль «Определение угла».

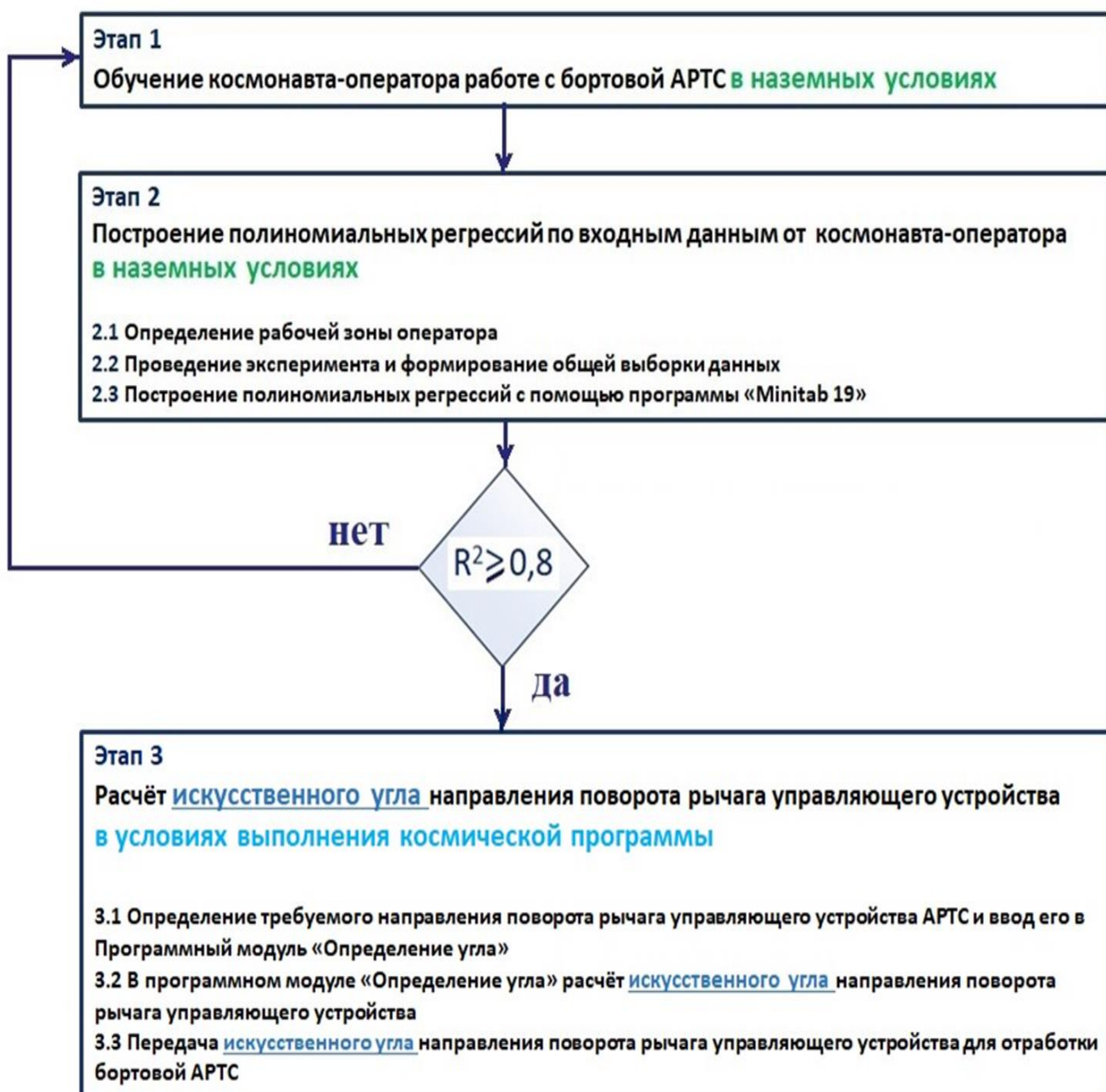


Рисунок 3.2 – Схема алгоритма повышения точности целевой операции попадания рукой бортовой АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота

В Программном модуле «Определение угла» с использованием базы данных с полиномиальными регрессиями, сформированной для конкретных космонавтов-операторов, производится определение искусственного угла

поворота рычага управляющего устройства на рабочей плоскости космонавта-оператора. Далее рассчитанный искусственный угол поворота рычага управляющего устройства, управляемого космонавтом-оператором, загружается в бортовую АРТС для выполнения базовой целевой операции. Операции, связанные с манипуляциями рычагом управляющего устройства, проводятся в реальном масштабе времени, так как Программный модуль «Определение угла» обладает высоким быстродействием.

3.2 Выбор метода оценки параметров распределения рассогласования движений космонавта-оператора и бортовой АРТС, при задаче угла поворота рычага управляющего устройства

Экспериментальное исследование по управлению бортовой АРТС в копирующем режиме, направлено на исследование совместной работы космонавта-оператора и робототехнической системы. Космонавту-оператору предлагается провести отклонение рычага управляющего устройства на 20° в вертикальном направлении, изменяя угол по горизонту с шагом 45° . Бортовая АРТС должна направить манипулятором рычаг управляющего устройства в требуемый угол. Эксперимент заключался в фиксации отклонений рычага, управляемого роботом по направлению, перпендикулярному движению рычага управляющего устройства. Предварительные исследования позволили предположить, что отклонение рычага управляющего устройства от требуемого угла при управлении человеком-оператором и бортовой АРТС подчиняется нормальному распределению. Запись аппроксимирующих регрессионных моделей, описывающих взаимодействие человека-оператора и бортовой АРТС, также определяется нормальным законом распределения.

Основой для предположения, что данные будут подчиняться нормальному распределению, является центральная предельная теорема [90]. Эта теорема утверждает, что если на систему воздействуют множество независимых случайных факторов, то их сумма приближается к нормальному распределению.

В эксперименте точность управления бортовой АРТС зависит от множества мелких случайных факторов, таких как точность движений космонавта-оператора, ошибки системы управления и механические колебания. Эти факторы, действуя совместно, дают нормальное распределение отклонений бортовой АРТС.

При копирующей системе управления предполагается, что распределение случайных ошибок подчиняется нормальному закону. Когда космонавт-оператор управляет роботом, мелкие ошибки управления могут быть симметрично распределены относительно оси движения. Это характерно для систем управления, в которых случайные колебания и отклонения часто подчиняются нормальному закону.

Ещё одним аргументом в пользу нормального распределения является его удобство для математической обработки данных. Многие методы статистического анализа, такие как линейная регрессия и построение доверительных интервалов, предполагают, что данные нормально распределены. Это предположение значительно упрощает вычисления и делает результаты анализа более точными [91].

Одной из задач эксперимента было построение регрессионных моделей для описания зависимости между отклонениями робота и действиями космонавта-оператора.

Для построения регрессии, особенно в контексте метода наименьших квадратов, который используется при обработке результатов эксперимента, важно, чтобы данные, то есть независимые переменные (предикторы) и зависимые переменные, регрессионной модели были нормально распределены.

Два параметра, описывающих нормальное распределение: математическое ожидание μ и среднеквадратическое отклонение σ . Плотность вероятности при нормальном распределении описывается следующей зависимостью:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Здесь x — случайная переменная, μ — математическое ожидание, σ — среднеквадратическое отклонение. Математическое ожидание μ означает среднее значение случайной переменной, а среднеквадратическое отклонение σ показывает расхождение значений случайной переменной относительно среднего.

Существуют следующие методы оценки математического ожидания μ с использованием данных, полученных в результате эксперимента:

1. среднее арифметическое;
2. медиана;
3. оценка методом максимального правдоподобия;
4. оценка по центральным квартилям;
5. простая оценка Диксона.

Выбрана простая оценка Диксона, поскольку она позволяет работать с массивами данных, содержащих выбросы или экстремальные значения [92]. Эти выбросы могут существенно искажать среднее арифметическое, делая его менее надёжным показателем центральной тенденции. Оценка Диксона предлагает исключить два крайних значения (максимальное и минимальное) из выборки перед тем, как вычислить среднее. Такой подход позволяет устранить влияние экстремальных значений и даёт более устойчивую оценку, которая лучше отражает основные закономерности данных.

Одним из главных преимуществ простой оценки Диксона является её способность сглаживать влияние аномальных данных. Если в выборке есть одно или несколько экстремальных значений, они могут значительно сместить среднее арифметическое, делая его ненадёжным показателем. Простая оценка Диксона позволяет снизить этот эффект, исключив два самых больших и два самых малых значения, и таким образом обеспечивает более устойчивую оценку среднего, которая отражает тенденции основной массы данных.

Кроме того, простота метода делает его удобным для использования в условиях, когда требуется быстро получить надёжную оценку без сложных вычислений. Например, при анализе небольших выборок (выборка в данном эксперименте составляет 40) или в ситуациях, когда выбросы очевидны и их

влияние нужно минимизировать, оценка Диксона даёт быстрый и эффективный результат. В то время как другие методы требуют более сложных вычислений, например, оценки по квартилям или медианным значениям, метод Диксона остаётся интуитивно понятным и легко применимым.

Из возможных методов оценки среднеквадратического отклонения σ :

1. стандартное отклонение;
2. оценка с использованием выборочного размаха;
3. медианная абсолютная ошибка;
4. оценка на основе квартилей.

Выбрана оценка среднеквадратического отклонения с помощью выборочного размаха, так как с ее помощью возможно получение простой, но при этом достаточно надёжной оценки разброса данных, особенно в случаях, когда данные искажаются выбросами, или выборка данных ограничена.

Размах данных – это диапазон между максимальным и минимальным значениями в выборке. Этот подход очень прост в реализации и интерпретации. Для его применения не нужно сложных вычислений или применения дополнительных статистических методов.

Если в данных присутствуют выбросы, этот метод позволяет избежать их чрезмерного влияния. Выбросы могут сильно искажать стандартные методы расчёта среднеквадратического отклонения, особенно в небольших выборках. Оценка по выборочному размаху особенно полезна для предварительной диагностики данных. Например, на начальных этапах анализа данных этот метод может служить индикатором того, насколько сильно данные разбросаны и насколько велики различия между максимальными и минимальными значениями. Это помогает быстро получить представление о том, какова структура данных и как они распределены, прежде чем прибегать к более сложным и точным методам анализа. Ещё одним преимуществом этого метода является то, что он независим от предположений о распределении данных. В отличие от методов, требующих предположений о нормальности или других формах распределения, выборочный размах можно использовать при любом распределении. Это делает метод

универсальным и пригодным для анализа данных с различными типами распределений, особенно в ситуациях, когда структура данных заранее неизвестна. Таким образом, оценка среднеквадратичного отклонения с использованием выборочного размаха является удобной за счёт своей простоты, устойчивости в малых выборках и универсальности. Она позволяет быстро и без сложных вычислений получить важную информацию о разбросе данных, что делает её хорошим выбором в тех случаях, когда требуется быстрая и надёжная оценка вариативности выборки.

3.3 Определение вида распределения данных, полученных в результате проведения эксперимента

Важным аспектом статистического анализа является определение вида распределения данных, которым определяются методы и подходы, используемые при анализе выборки. Ключевая роль в классической математической статистике принадлежит нормальному распределению из-за его математических свойств и простоте использования. Перед использованием моделей, основанных на нормальности распределения, следует провести проверку данных на соответствие нормальности распределения. Для этой цели используются разнообразные критерии подтверждения нормальности распределения.

При проведении экспериментального исследования требуется подтверждение того, что данные по направлению, перпендикулярному отклонениям, распределены согласно нормальному закону. Подтверждение нормальности представляет возможность корректного использования линейных моделей и других методов, предполагающих нормальность распределения данных. Хорошим инструментом для проверки распределения на нормальность является критерий Колмогорова-Смирнова (К-С). Ниже представлены аргументы в пользу выбора критерия Колмогорова-Смирнова для оценки результатов эксперимента

Существуют несколько методов для проверки, соответствует ли распределение выборки нормальному закону. Каждый из них имеет свои особенности и области применения.

1. Визуальные методы

– Гистограмма. Построение гистограммы выборки даёт наглядное представление о том, как данные распределены. В случае нормального распределения гистограмма должна иметь характерную колоколообразную форму.

– Q-Q (квантиль-квантиль) график. Этот график сравнивает квантили выборки с теоретическими квантилями нормального распределения. Если данные распределены нормально, точки на графике будут лежать на прямой линии.

Визуальные методы полезны для начального анализа, но они не дают точного ответа на вопрос, являются ли данные нормально распределёнными.

2. Статистические критерии.

– Критерий Колмогорова-Смирнова. Этот критерий проверяет, насколько эмпирическая функция распределения данных соответствует теоретической функции нормального распределения. Он основан на максимальном отклонении между этими функциями.

– Критерий Шапиро-Уилка. Один из наиболее мощных тестов для проверки нормальности, особенно для малых выборок. Он проверяет, насколько хорошо выборка согласуется с нормальным распределением, вычисляя отношение дисперсии данных к дисперсии теоретического нормального распределения.

– Критерий Андерсона-Дарлинга. Расширение теста Колмогорова-Смирнова, которое придаёт большее значение отклонениям в хвостах распределения. Он более чувствителен к экстремальным значениям и может быть предпочтительным в некоторых ситуациях.

3. Оценки симметрии и эксцесса.

– Коэффициент асимметрии (симметрии). Для нормального распределения коэффициент асимметрии должен быть близок к нулю. Положительное или

отрицательное отклонение от нуля указывает на смещение распределения в ту, или иную, сторону.

– Коэффициент эксцесса (сжимаемости). Для нормального распределения коэффициент эксцесса равен 3. Значения выше 3 указывают на более узкие пики, а значения ниже 3 – на более плоские распределения.

4. Тесты на дисперсию.

– F -тест на равенство дисперсий. Этот тест проверяет, являются ли дисперсии выборки и нормального распределения равными. Он полезен для проверки гомоскедастичности (равенства дисперсий) данных, особенно в контексте линейной регрессии.

5. Выборочный коэффициент вариации.

– Этот метод основан на сравнении среднего и стандартного отклонения выборки с теоретическими значениями для нормального распределения. Значительные отклонения могут указывать на ненормальность распределения.

При обработке экспериментальных данных следует подтвердить их соответствие нормальному распределению, так как используемые статистические методы основаны на свойстве нормальности. Критерий Колмогорова-Смирнова (К-С) является одним из лучших инструментов для решения этой задачи по нескольким причинам [93].

Во-первых, критерий К-С проверяет, насколько эмпирическая функция распределения (которая построена на наших данных) отклоняется от теоретической функции нормального распределения. Этот тест хорошо подходит для проверки распределений с любым объёмом данных, что особенно важно для нашего эксперимента, так как выборки могут варьироваться по размеру.

Во-вторых, этот критерий является непараметрическим, то есть он не делает строгих предположений о структуре данных, кроме той, что мы проверяем их на соответствие нормальному распределению. Это полезно в условиях, когда мы не уверены в характере распределения данных и не хотим вводить дополнительные предположения.

Ещё одним важным фактором является то, что критерий К-С чувствителен ко всем типам отклонений – как к сдвигу средней, так и к различиям в форме и дисперсии распределений [94]. Это важно в нашем эксперименте, так как отклонения могут происходить не только по средней линии, но и в хвостах распределения.

Чтобы применить критерий Колмогорова-Смирнова для проверки нормальности распределения, необходимо выполнить следующие шаги [95]:

1. Построение эмпирической функции распределения. Для начала на основе выборочных данных строится эмпирическая функция распределения $F_n(x)$, которая описывает накопленное количество данных до каждой точки x .

Выбор теоретической функции распределения. В нашем случае это будет функция нормального распределения с математическим ожиданием и дисперсией, равными оценкам из выборки.

2. Вычисление максимального отклонения. С помощью критерия К-С вычисляется максимальное вертикальное отклонение между полученной функцией распределения $F_n(x)$ и теоретической функцией $F(x)$. Это отклонение обозначается как D_n и вычисляется по формуле:

$$D_n = \sup_x | F_n(x) - F(x) | .$$

Здесь $\sup$ обозначает супремум, то есть максимальное значение разности между двумя функциями на всём интервале наблюдаемых данных.

3. Проверка значимости. Проводится сравнение найденного значения D_n и критического значения при заданном уровне значимости α . В случае превышения D_n критического значения, гипотеза о нормальности распределения отвергается. В ином случае предположение о нормальности принимается.
4. Интерпретация результата. Если критерий показывает, что максимальное отклонение между эмпирической и теоретической функцией распределения

невелико, то мы можем сделать вывод о том, что данные подчиняются нормальному распределению.

В проводимом эксперименте критерий Колмогорова-Смирнова является предпочтительным инструментом для проверки нормальности распределения данных, поскольку он прост в применении, не требует строгих параметрических предположений и чувствителен к различным типам отклонений. Его использование позволяет объективно оценить, соответствуют ли данные нормальному распределению, что является важным шагом перед применением линейных моделей или других методов анализа, предполагающих нормальность данных.

3.4 Выбор метода построения аппроксимирующей полиномиальной регрессии

Цель экспериментального исследования состоит в построении аппроксимирующей регрессии, устанавливающей взаимосвязь параметров, полученных при работе космонавта-оператора в копирующем режиме управления и параметров, полученных путем действия манипулятора бортовой АРТС.

Рассмотрены методы аппроксимации наборов данных:

1. интерполяция, в том числе, Лагранжева интерполяция, интерполяция Ньютона, сплайны;
2. метод наименьших квадратов;
3. локально взвешенная регрессия;
4. кусочная аппроксимация;
5. экспоненциальная и логарифмическая аппроксимация;
6. многочлены Чебышева;
7. метод наивысших порядков,

Для построения полиномиальной регрессии выбран метод наименьших квадратов (МНК), так как:

1. С помощью МНК производится минимизация суммы квадратов отклонений экспериментальных данных от аппроксимирующей функции. Это позволяет учитывать все точки, обеспечивая равномерное распределение ошибки:

$$\min_{\text{коэффициенты}} \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2.$$

Минимизация квадратичной ошибки делает метод устойчивым к случайным флуктуациям и шуму в данных, потому что большие ошибки штрафуются сильнее (квадрат отклонения увеличивает вес больших ошибок).

2. МНК получил широкое распространение при нормальном распределении экспериментальных данных. При нормальном распределении отклонений от аппроксимирующей функции метод наименьших квадратов минимизирует вероятность ошибок. В такой ситуации МНК даёт несмещённые, состоятельные и эффективные оценки параметров [96].

3. МНК прост в реализации и использует линейные уравнения, что делает его вычислительно эффективным. Несмотря на то, что он обычно применяется для линейных моделей (например, линейная регрессия), МНК можно расширить для нелинейных моделей и использовать в более сложных случаях.

4. С помощью МНК обеспечивается гладкая аппроксимация, игнорирующая случайные выбросы. Этим свойством МНК отличается от методов, интерполирующих все данные (например, полиномиальной интерполяции). Это особенно полезно, когда данные содержат шум: МНК не стремится точно пройти через каждую точку, что предотвращает переобучение и делает модель более обобщённой.

5. МНК используется для работы с различными типами моделей:

- Линейная регрессия: С помощью МНК записывают линейные аппроксимирующие модели.
- Полиномиальная аппроксимация: можно использовать полиномы любой степени для минимизации ошибок.

– Экспоненциальные и логарифмические модели: Метод также применим к моделям нелинейной зависимости.

6. МНК может быть использован при наличии случайных выбросов данных. Интерполяционные методы обладают чувствительностью даже к небольшим изменениям в данных. В МНК минимизируются значения отдельных выбросов.

7. Для оценки качества аппроксимации можно использовать различные метрики, такие как коэффициент детерминации R^2 , который показывает, какая часть изменчивости данных объясняется аппроксимирующей моделью. В МНК такие метрики легко вычисляются, что упрощает анализ результатов.

8. МНК легко расширяется на многомерные данные, что позволяет использовать его для многомерной линейной регрессии, где аппроксимирующая функция зависит от нескольких переменных.

9. МНК имеет сильную математическую основу и является частью классической теории регрессии. Он также часто используется в более сложных моделях машинного обучения, где может комбинироваться с другими методами для улучшения точности и качества прогнозирования.

Коэффициент детерминации R^2 – это статистический показатель, который демонстрирует, какую долю дисперсии зависимой переменной объясняет модель регрессии. Значение R^2 варьируется от 0 до 1 и интерпретируется следующим образом:

– $R^2 = 1$ означает, что модель полностью объясняет вариацию зависимой переменной (идеальная модель).

– $R^2 = 0$ указывает на то, что модель не объясняет вариацию зависимой переменной (модель не лучше средней).

Формула для вычисления R^2 в контексте линейной регрессии:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}},$$

где:

– SS_{res} – сумма квадратов остаточных ошибок (необъясненная моделью дисперсия),

– SS_{tot} – общая сумма квадратов (общая дисперсия зависимой переменной).

Увеличение значения R^2 означает улучшение качества модели. Но высокое значение R^2 может означать, так же, случай переобучения модели.

Общая сумма квадратов (Total Sum of Squares, SS_{tot}):

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 ,$$

где:

– y_i – фактические значения зависимой переменной,

– $\bar{y}$ – среднее значение зависимой переменной,

– n – количество наблюдений.

Это показывает общую вариацию данных относительно их среднего значения.

Сумма квадратов остаточных ошибок (Residual Sum of Squares, SS_{res}):

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 ,$$

где:

– $\hat{y}_i$ – предсказанные моделью значения зависимой переменной.

3.5 Построение полиномиальной регрессии

Целью работы является построение аппроксимирующих регрессий взаимосвязи координат рычага управляющего устройства, полученных в результате работы космонавта-оператора в копирующем режиме и координат рычага, полученных в результате управления манипулятором бортовой АРТС.

Проведенный эксперимент позволил собрать базу данных с углами отклонений рычага управляющего устройства, полученными в результате работы космонавта-оператора в копирующем режиме, и углами отклонения рычага управляющего устройства, полученными при работе манипулятором бортовой АРТС. Построение регрессионной зависимости представим на примере отработки наклона рычага управляющего устройства в одном горизонтальном направлении.

Следующий этап заключается в проверке массива углов отклонений рычага управляющего устройства, отрабатываемых человеком-оператором и манипулятором бортовой АРТС на нормальность с использованием критерия Колмогорова-Смирнова. Проверка на нормальность была проведена с использованием программы Minitab 19. Графическое представление проверки на нормальность углов отклонений рычага управляющего устройства, отрабатываемых человеком-оператором представлено на Рисунке 3.3.

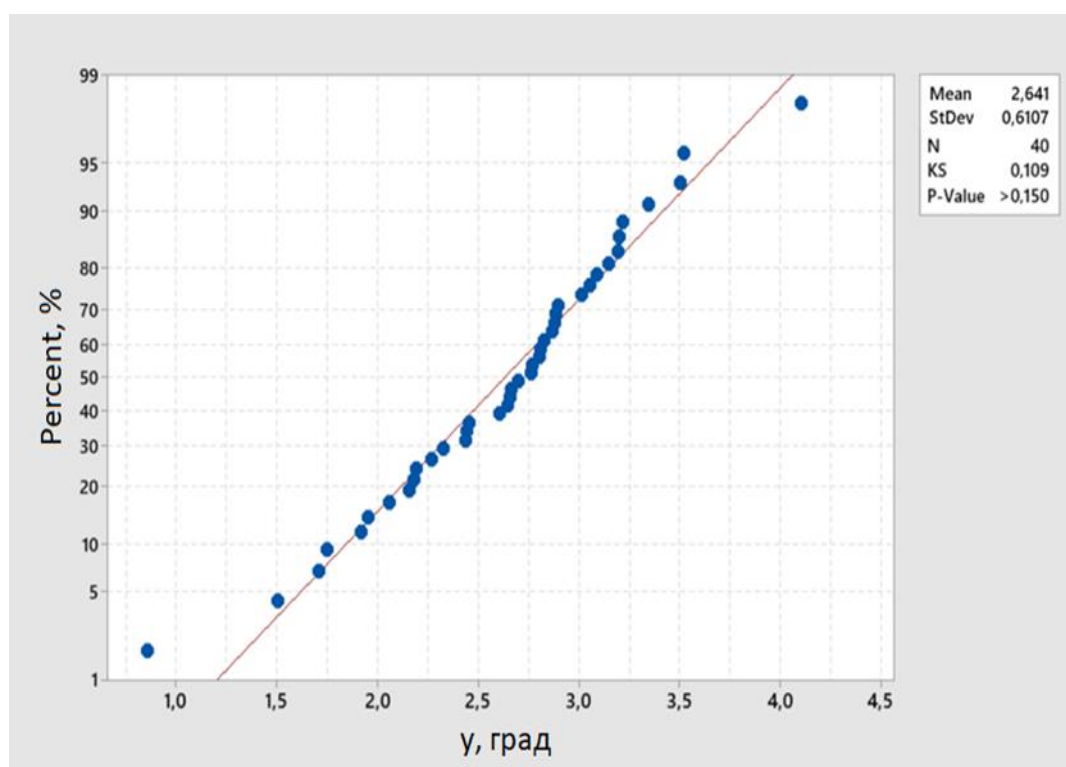


Рисунок 3.3 – Графическая интерпретация проверки на нормальность углов отклонения рычага управляющего устройства, устанавливаемого космонавтом-оператором

Графическое представление проведения проверки на нормальность углов отклонений рычага управляющего устройства, отрабатываемых манипулятором бортовой АРТС, представлено на Рисунке 3.4.

Результаты проверки позволили сделать вывод, что данные выборки подчиняются закону нормального распределения.

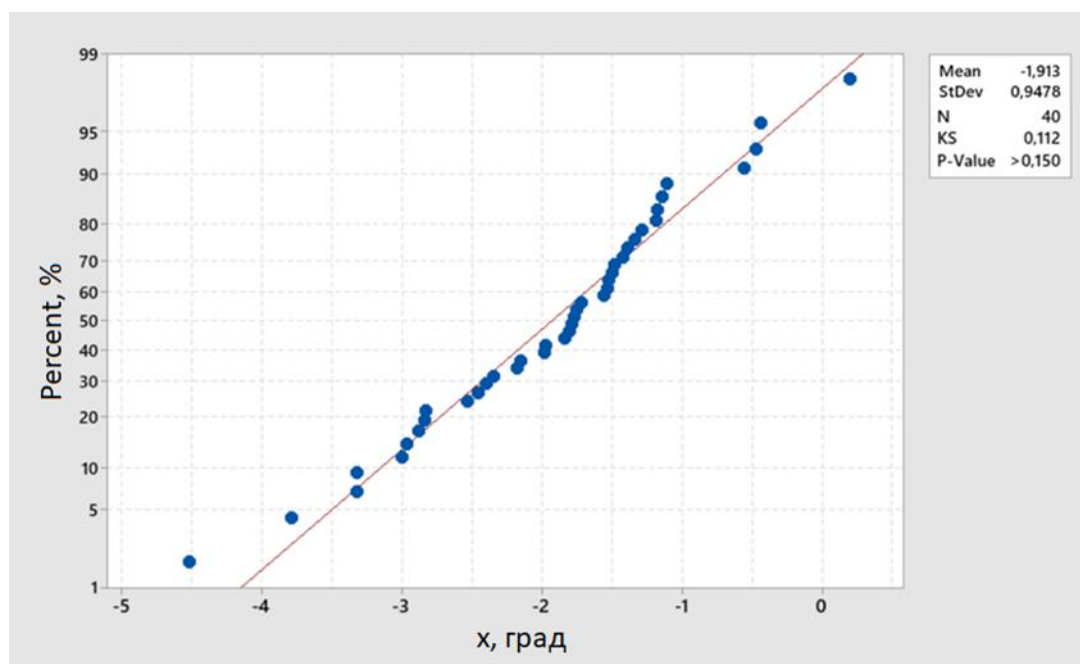


Рисунок 3.4 – Графическая интерпретация проверки на нормальность углов отклонения рычага управляющего устройства, устанавливаемого бортовой АРТС

Следующим шагом явилось определение параметров нормального распределения. В таблице 3.2 представлены параметры нормального распределения углов отклонения рычага управляющего устройства, устанавливаемых космонавтом-оператором и параметры нормального распределения углов отклонения рычага управляющего устройства, устанавливаемых АРТС.

На Рисунке 3.5 изображены зависимости распределения вероятности для человека-оператора: красным цветом представлена зависимость нормального распределения с рассчитанными параметрами, синим цветом — зависимость

распределения, записанная по экспериментальным данным. На Рисунке 3.6 изображены зависимости распределения вероятности при работе манипулятором бортовой АРТС: красным цветом представлена зависимость нормального распределения с рассчитанными параметрами, синим цветом – зависимость распределения, записанная по экспериментальным данным.

Таблица 3.2 – параметры нормального распределения углов отклонения рычага управляющего устройства, устанавливаемого космонавтами-операторами и параметры нормального распределения углов отклонения рычага управляющего устройства, устанавливаемого АРТС.

Градус отклонения	ПЕТЕЛИН Д.А.				КИКИНА А.Ю.				ЕРМОЛЕНКО А.И.			
	μ		σ		μ		σ		μ		σ	
	Оператор	АРТС	Оператор	АРТС	Оператор	АРТС	Оператор	АРТС	Оператор	АРТС	Оператор	АРТС
0	2.64	-1.91	0.61	0.95	2.93	-1.08	3.98	3.11	-1.66	-0.94	1.36	5.10
45	0.75	3.67	0.13	4.84	2.81	-1.45	1.39	4.98	-0.73	2.68	3.21	4.54
90	0.05	-4.12	1.28	3.54	0.49	0.81	2.91	3.66	1.09	0.57	3.67	5.68
135	-1.20	-0.30	4.49	7.52	1.23	2.64	1.85	3.19	-2.83	-2.83	1.02	1.80
180	0.38	0.68	3.56	4.23	1.44	2.44	2.07	3.15	0.41	1.89	1.79	2.82
225	-1.03	-3.06	0.23	0.37	2.59	-4.43	5.90	2.30	0.90	0.98	1.28	0.94
270	1.96	-0.87	3.82	5.38	0.06	-0.59	3.63	3.02	0.16	2.46	2.29	4.83
315	-0.60	2.70	2.41	4.89	-1.81	2.45	2.92	4.15	2.31	-2.54	0.25	2.89

Гистограмма и график плотности вероятности углов отклонений рычага управляющего устройства, обрабатываемых человеком-оператором, изображена на Рисунке 3.7. Гистограмма и график плотности вероятности углов отклонений рычага управляющего устройства, устанавливаемых манипулятором АРТС, изображены на Рисунке 3.8.

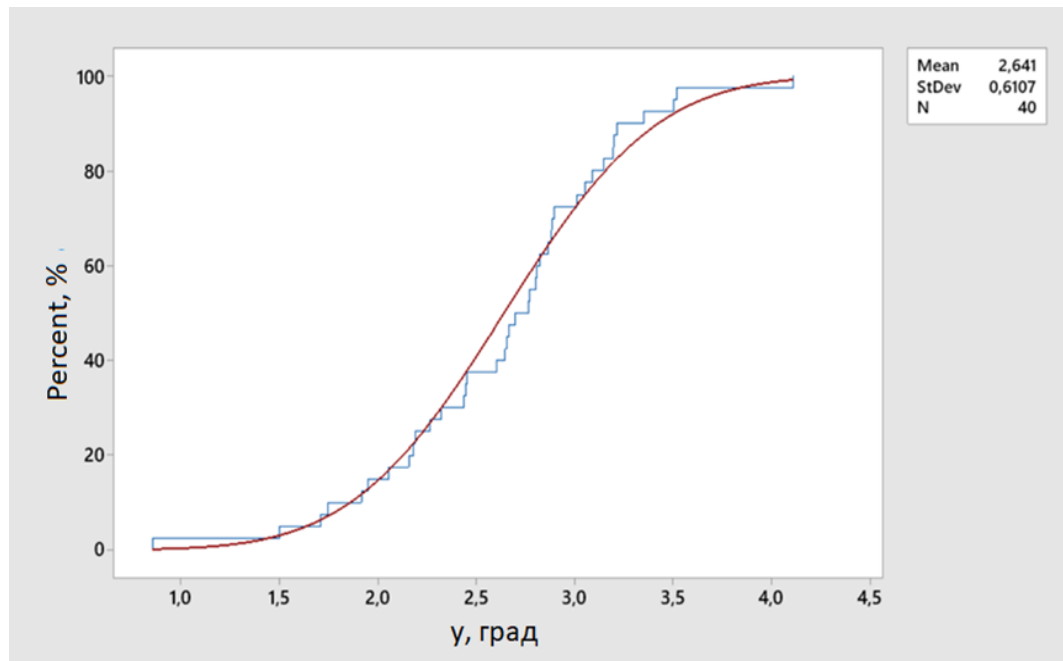


Рисунок 3.5 – Функции распределения вероятности для космонавта-оператора

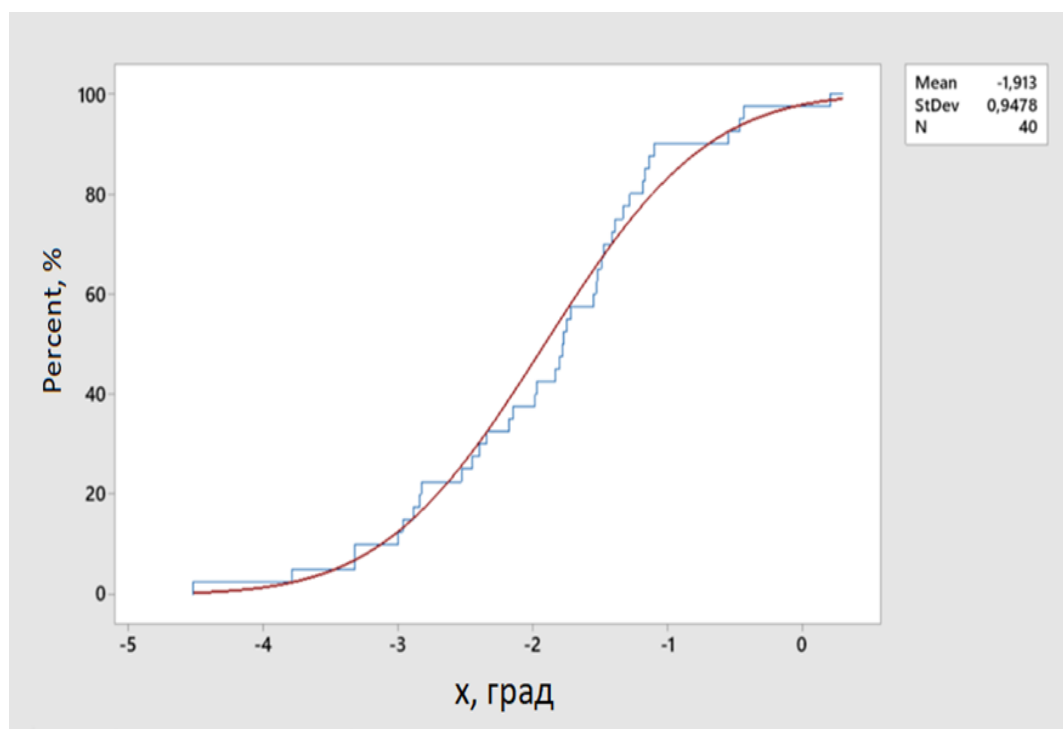


Рисунок 3.6 – Функции распределения вероятности для АРТС

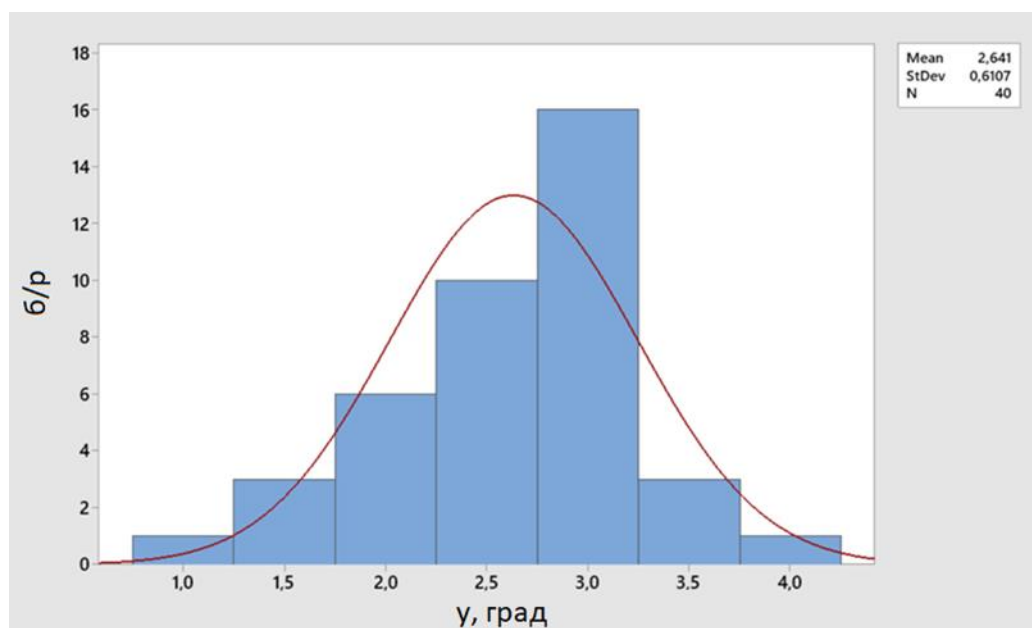


Рисунок 3.7 – Гистограмма и график плотности вероятности углов отклонения рычага управляющего устройства, устанавливаемого космонавтом-оператором

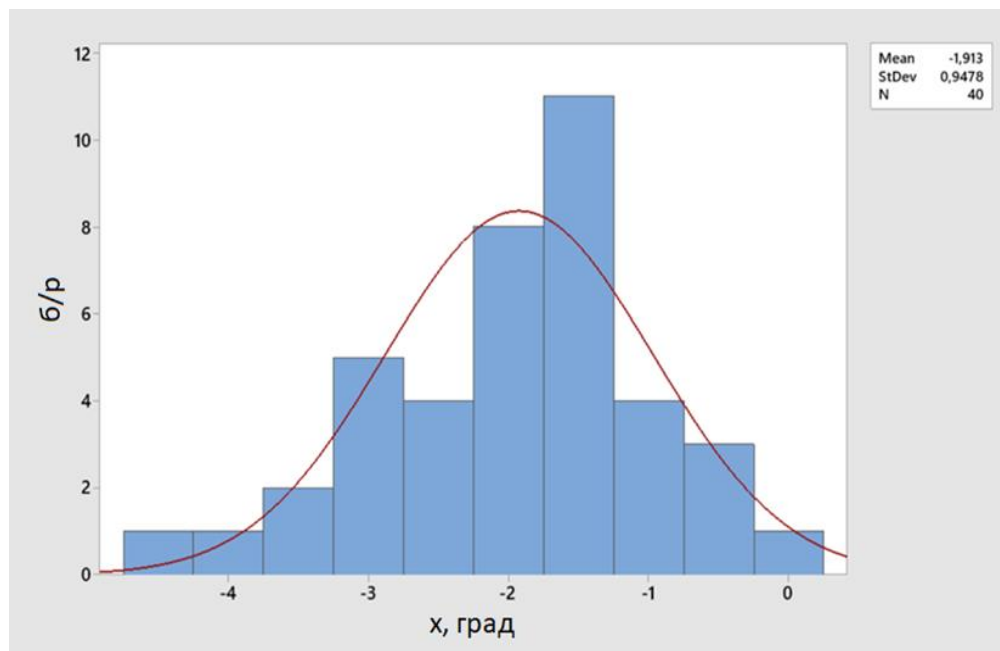


Рисунок 3.8 – Гистограмма и график плотности вероятности углов отклонения рычага управляющего устройства, устанавливаемого АРТС

Следующим шагом является построение полиномиальной регрессии с помощью программы Minitab 19. На Рисунке 3.9 показана регрессионная зависимость угла отклонения рычага управляющего устройства оператора от угла отклонения рычага управляющего устройства АРТС.

В результате проеденных экспериментальных работ записаны восемь аппроксимирующих регрессий углов отклонений рычага управляющего устройства при работе человека-оператора от углов отклонений рычага управляющего устройства при работе АРТС для восьми горизонтальных направлений наклона рычага управляющего устройства. Для регрессионных зависимостей рассчитан показатель качества R^2 . В Таблице 3.3 представлены указанные значения.

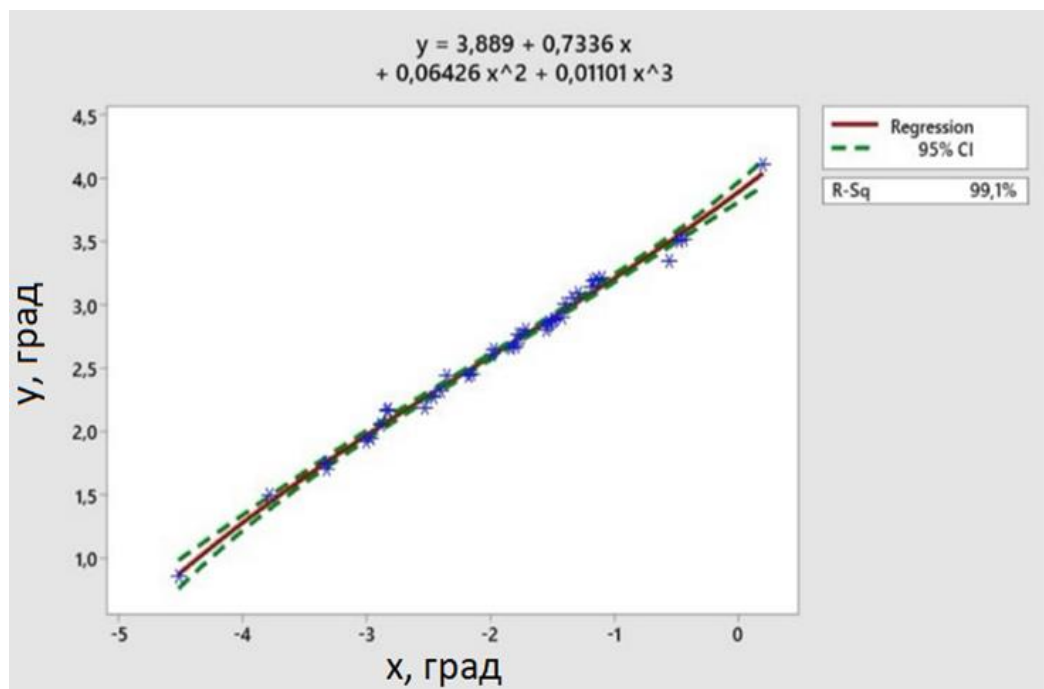


Рисунок 3.9 – Регрессионная зависимость угла отклонения рычага управляющего устройства оператора от угла отклонения рычага управляющего устройства АРТС

Таблица 3.3 – Регрессионные зависимости

Оператор	Угол отклонения	Регрессия $y(x)$	R^2
K1	0	$y = 3,889 + 0,733 x + 0,064 x^2 + 0,011 x^3$	99,11
	45	$y = 0,648 + 0,028 x + 0,002 x^2 - 0,001 x^3$	98,82
	90	$y = 1,440 + 0,314 x + 0,004 x^2 + 0,001 x^3$	98,31
	135	$y = -1,049 + 0,675 x + 0,002 x^2 - 0,001 x^3$	96,88
	180	$y = 0,181 + 0,817 x - 0,025 x^2 + 0,002 x^3$	97,24
	225	$y = -7,071 - 7,482 x - 2,712 x^2 - 0,297 x^3$	97,61
	270	$y = 2,612 + 0,883 x - 0,001 x^2 - 0,001 x^3$	98,02
	315	$y = -2,057 + 0,674 x - 0,016 x^2 - 0,001 x^3$	98,36
K2	0	$y = 4,249 + 1,371 x + 0,009 x^2 - 0,003 x^3$	97,97
	45	$y = 3,198 + 0,292 x + 0,001 x^2 - 0,001 x^3$	97,65
	90	$y = -0,2653 + 1,025 x + 0,006 x^2 - 0,004 x^3$	97,49
	135	$y = -0,194 + 0,579 x - 0,011 x^2 + 0,001 x^3$	96,04
	180	$y = 0,414 + 0,471 x - 0,138 x^2 + 0,025 x^3$	96,39
	225	$y = 15,09 + 3,068 x + 0,033 x^2 - 0,002 x^3$	96,77
	270	$y = 0,272 + 1,230 x + 0,084 x^2 + 0,005 x^3$	97,27
	315	$y = -3,490 + 0,753 x - 0,001 x^2 - 0,001 x^3$	97,57
K3	0	$y = -1,274 + 0,228 x - 0,007 x^2 + 0,001 x^3$	97,43
	45	$y = -2,676 + 0,732 x + 0,001 x^2 - 0,001 x^3$	96,46
	90	$y = 0,613 + 0,504 x + 0,007 x^2 + 0,001 x^3$	96,32
	135	$y = -1,273 + 0,574 x + 0,021 x^2 + 0,003 x^3$	95,13
	180	$y = -0,645 + 0,653 x - 0,033 x^2 + 0,002 x^3$	95,85
	225	$y = -0,532 + 1,543 x + 0,118 x^2 - 0,088 x^3$	96,06
	270	$y = -1,103 + 0,447 x + 0,012 x^2 - 0,001 x^3$	96,4
	315	$y = 2,561 + 0,083 x - 0,006 x^2 - 0,001 x^3$	96,54

Результатом проведенных экспериментальных исследований является база регрессионных зависимостей углов отклонений рычага управляющего устройства при работе человека-оператора от углов отклонений рычага управляющего устройства при работе бортовой АРТС для восьми горизонтальных направлений наклона рычага управляющего устройства для трех космонавтов-операторов, представленных в предыдущем разделе.

Полученных результаты показывают изменение уровня качества регрессионной зависимости от величины угла поворота рычага управляющего устройства в горизонтальном направлении. Указанное изменение уровня качества вызвано анатомическим свойством кисти человека-оператора. На Рисунке 3.10 представлена зависимость уровня качества регрессии от горизонтального угла поворота.

На рисунке 3.10 синим цветом представлена зависимость уровня качества регрессии от горизонтального угла поворота Д.А. Петелина, красным цветом – А.Ю. Кикиной, серым – А.И. Ермоленко.

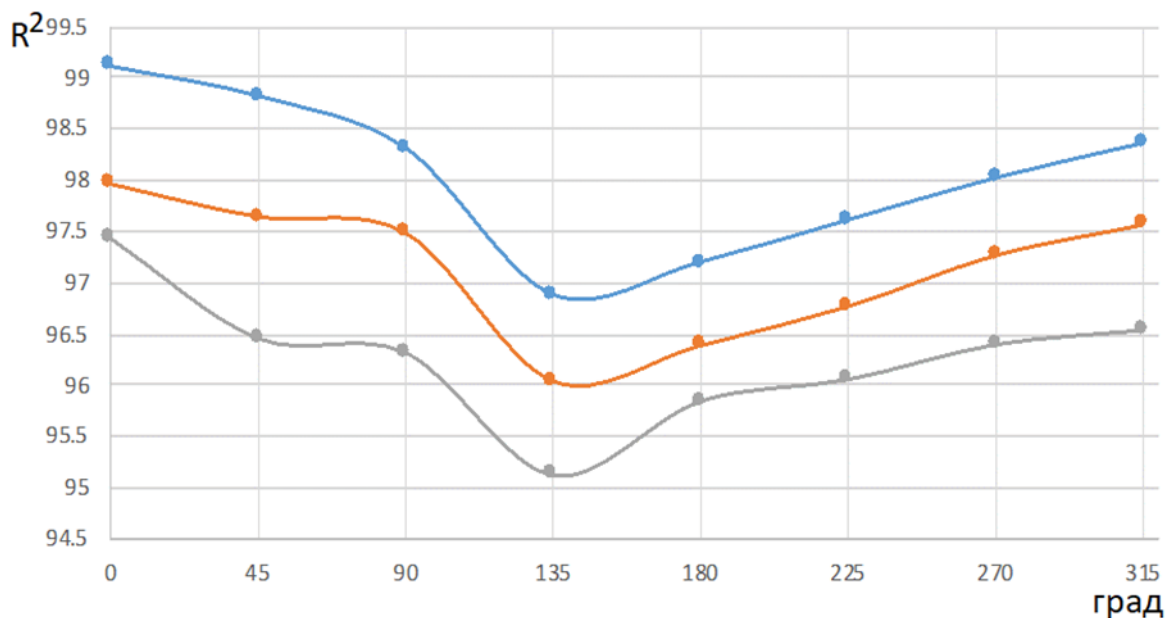


Рисунок 3.10 – Зависимость уровня качества регрессии от горизонтального угла поворота

Из представленных зависимостей следует, что уровень качества регрессии повышается у операторов, имеющих специальную физическую подготовку и опыт работы в робототехнической системе, а также увеличивается при приближении антропометрических параметров человека к параметрам ЗУКТ.

Заключение по Главе 3

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при управлении космонавтом-оператором бортовой АРТС с использованием копирующего режима управления, наблюдается несогласованность в движениях управляющего космонавта и бортовой АРТС. Эксперименты с поворотом рычага управляющего устройства показали значительное рассогласование горизонтальных углов поворота рычага при управлении космонавтом-оператором в копирующем режиме и манипулятором бортовой АРТС.

Предложено разработанное математическое и программное обеспечение для записи искусственных параметров, определяемых на основании углов поворота рычага управляющего устройства рукой человека-оператора, использующего копирующий режим управления, позволяющее повысить точность базовой целевой операции позиционирования угла поворота рычага управляющего устройства на рабочей плоскости. Представлен разработанный алгоритм, повышающий точность базовой целевой операции поворота манипулятором бортовой АРТС рычага управляющего устройства на требуемый угол. Алгоритм основан на установлении регрессионной зависимости между углом наклона рычага управляющего устройства, заданного космонавтом-оператором в копирующем режиме управления и углом наклона рычага управляющего устройства, выполненным манипулятором бортовой АРТС. Разработанная математическая модель предлагает расчет искусственного значения угла поворота рычага управляющего устройства, устанавливаемого космонавтом-оператором и передачи его через программный модуль, установленный на ПК оператора к бортовой АРТС. Представленный алгоритм повышает точность выполнения

базовой целевой операции позиционирования угла поворота рычага управляющего устройства.

В результате анализа проведен выбор метода оценки параметров распределения рассогласования действий человека-оператора и бортовой АРТС при установке углов поворота рычага управляющего устройства – «Простой оценки Диксона» и оценки с использованием выборочного размаха.

Методом оценки распределения экспериментальных данных по несогласованности действий человека-оператора и бортовой АРТС в результате анализа выбран критерий Колмогорова-Смирнова.

Построение аппроксимирующих полиномиальных регрессий, описывающих зависимости углов поворота рычага управляющего устройства манипулятором бортовой АРТС от углов поворота рычага управляющего устройства человеком-оператором в копирующем режиме управления предлагается проводить методом наименьших квадратов.

Экспериментальные работы проведены с бортовой АРТС, заводского номера БПАГ.442468.005, с совмещенной мобильной платформой, заводского номера БПАГ.452838.004 и с задающим устройством копирующего типа номером 426471.005.001. Для указанных устройств и определенных выше космонавтов-операторов записана база полиномиальных регрессионных зависимостей, аппроксимирующих взаимосвязь угла отклонения рычага управляющего устройства, устанавливаемого космонавтом-оператором в копирующем режиме управления, и угла отклонения рычага, полученного в результате работы манипулятором бортовой АРТС. Полиномиальные регрессионные зависимости обеспечивают выполнение базовой целевой операции попадания манипулятором бортовой АРТС рычагом управляющего устройства в требуемый угол поворота с точностью не менее 90 %.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ТОЧКИ НА РАБОЧЕЙ ПЛОСКОСТИ БОРТОВОЙ АРТС

4.1 Математическая формализация задачи разработки алгоритма повышения точности позиционирования точки на рабочей плоскости бортовой АРТС

Наличие рассогласованности движений космонавта-оператора, облаченного в ЗУКТ, и движений бортовой АРТС в копирующем режиме управления имеет место, в том числе, при нахождении местоположения начальной точки на рабочей плоскости АРТС. Выполнение базовой целевой операции попадания манипулятором бортовой АРТС в заданную точку на рабочей плоскости обуславливает точность исполнения прочих сложных операций антропоморфной бортовой системы.

На Рисунке 4.1 представлено рассогласование координат точек, выявленное при проведении экспериментальных исследований в лаборатории робототехники в ФГБН «НИИ Центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина», по изучению копирования бортовой АРТС действий человека-оператора при установке точки на рабочей плоскости в копирующем режиме управления. Плоскость с координатами (x, y) моделирует рабочую плоскость космонавта-оператора, и точки синего цвета изображают точки, проставленные на ней рукой космонавта-оператора в ЗУКТ. Аналогично, плоскость (z, w) моделирует рабочую плоскость бортовой АРТС с точками красного цвета, проставленными на ней рукой бортовой АРТС в копирующем режиме работы. Видно, что рассогласования в координатах некоторых точек достигают 10-15 см. Причинами рассогласования координат точек является влияние неустраняемых аппаратными средствами ошибок в АРТС, которые были проанализированы в разделе 1.4.

Для повышения точности целевой операции по позиционированию точки на плоскости предлагается разработка математического и программного обеспечения по обработке информации, поступающей от космонавта-оператора в ЗУКТ к

бортовой АРТС при копирующем управлении. Суть данного подхода заключается в проведении наземных экспериментов для установления аппроксимирующей зависимости между координатами точек, устанавливаемых рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и точек, устанавливаемых рукой бортовой АРТС. Полученная математическая модель предполагает введение и расчет искусственных координат задаваемой точки, транслируемых через программный модуль на ПК человека-оператора бортовой АРТС, что повышает точность выполнения базовой целевой операции.

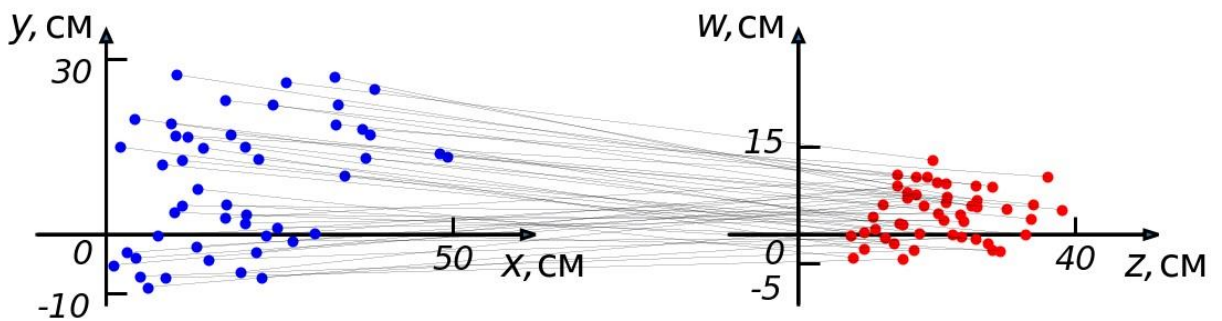


Рисунок 4.1 – Графики соответствия между точками, проставляемыми оператором (синего цвета), и точками, проставляемыми АРТС (красного цвета)

В основе предлагаемого подхода лежит многомерная аппроксимирующая зависимость между координатами точек на рабочих плоскостях космонавта-оператора и бортовой АРТС, которая относится к классу моделей множественной регрессии с множественными выходными переменными (откликами). Для математической формализации задачи построения множественной регрессии и выбора статистической метрики для оценки ее точности вводятся следующие переменные:

$X = (X_1, \dots, X_p)$ – входная векторная переменная с компонентами $X_j, j = 1, \dots, p$;

$Y = (Y_1, \dots, Y_k)$ – выходная векторная переменная с количественными значениями $Y_j, j = 1, \dots, k$.

В результате проведения n экспериментов получено множество измерений $(x_i, y_i); i = 1, \dots, n$,

где $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})^T$ – вектор i -го наблюдаемого в эксперименте значения входного вектора X ; $y_i = (y_{i1}, \dots, y_{ik})^T$ – вектор i -го наблюдаемого в эксперименте значения выходного вектора Y .

Введем обозначения:

$\hat{y}_i = (\hat{y}_{i1}, \dots, \hat{y}_{ik})^T$ – вектор предсказания по модели регрессии i -го значения вектора Y ;

$\bar{y} = (\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_k)^T$ – вектор среднего значения выходного вектора Y ,

где $\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_{ji}; j = 1, \dots, k$.

Тогда для оценки того, насколько регрессия хорошо представляет данные, используется статистическая метрика – скорректированный коэффициент R^2 [97]:

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

Постановка задачи требует построения регрессионной зависимости, которая связывает координаты точек, устанавливаемых бортовой АРТС и космонавтом-оператора на рабочей плоскости, с прогнозируемой точностью по значению скорректированного коэффициента $R^2 \geq 0,8$ при $p = 2; k = 2$.

4.2 Выбор метода построения регрессии

Для построения модели множественной регрессии с многими выходными переменными проведем анализ возможности использования методов машинного обучения, применимых к небольшим входным выборкам экспериментальных данных, характерных для дорогостоящего и уникального оборудования. В качестве общей выборки принимаются измерения, полученные в результате

проведенных экспериментов и показанные на Рисунке 4.1. Общую выборку разбиваем на две выборки: обучающую и тестовую выборки, следуя стандартным рекомендациям методов машинного обучения [97]. Обучающая выборка используется для настройки моделей регрессии и включает 80% экспериментальных измерений, а тестовая выборка используется для оценки точности предсказания по модели и включает 20% экспериментальных измерений. В Таблице 4.1 показан полученный состав обеих выборок.

Таблица 4.1 – Состав обучающей и тестовой выборок

Обучающая выборка				Тестовая выборка			
x	y	z	w	x	y	z	w
9,8	3,8	7,5	-0,2	13,2	7,8	7,8	-3,9
14	14,9	9,4	-2,4	8	12	9,5	0,5
11,7	16,7	10,8	3,1	9	11,7	16,7	10,8
11	12,7	11	1	17,2	23	14,2	10,4
9,4	19,1	12,1	5,1	8,50	-7,40	15,10	-4,20
20,10	15,00	12,5	-0,5	4,90	-7,10	16,70	-2,70
2	15	13,8	-1,5	24	22,2	25,8	4,8
10,2	27,4	14,3	8,5	37,5	13,1	33,5	2,7
4,1	19,9	14,5	2	49,2	13,4	38	4,3
6,00	-9,00	15,00	1,70				
1,10	-5,20	15,70	6,30				
7,40	-0,20	15,70	7,30				
3,00	-3,10	17,00	6,90				
10,00	17,00	17,00	10,00				
22	13	17,5	0,3				
4,20	-4,00	18,00	4,90				
17,10	2,80	18,50	9,90				

26	26,1	19,4	12,8				
21,70	-3,00	20,00	8,90				
20,00	2,00	20,10	3,70				
24,60	1,20	21,00	2,50				
23,10	-0,10	21,20	8,70				
13,00	-2,00	21,30	5,50				
19,40	-6,40	21,50	6,60				
14,80	-4,30	22,30	0,00				
11,00	5,00	23,3	3,5				
22,40	-7,30	23,50	-0,40				
20,20	3,40	23,80	2,30				
33	27	25	4,9				
26,90	-1,10	25,50	-0,70				
33,5	22,3	25,5	8,5				
38,7	25	25,8	5,9				
38,1	17,1	27,3	-1,4				
30,10	0,20	27,90	-2,70				
33,10	18,90	28,00	8,30				
17,30	5,10	29,10	-2,80				
18	17,2	30	4,5				
34,4	10,2	32,8	0				
48,2	14	33,9	5,2				
36,90	18,10	36,00	9,90				
9,8	3,8	7,5	-0,2				

Рассматриваем следующие методы построения регрессии:

1. Линейная регрессия по каждой выходной переменной [97].
2. Метод Случайного леса (Random Forest) [97].

3. Метод Случайного леса по каждой выходной переменной [97].

4. *SVR-RBF* – Регрессия на основе метода опорных векторов с ядром *RBF* (радиальные базисные функции) [98].

Использование модели Перцептрона (простейшей искусственной нейронной сети) не рассматривалось, так как для ее использования требуется во много раз большая выборка экспериментальных данных.

Расчеты проводим с помощью библиотеки *Scikit-learn (sklearn)*, написанной на языке программирования *Python* и распространяемой в виде свободного программного обеспечения. В ее состав входят, в том числе, перечисленные алгоритмы для задач регрессионного анализа данных. Все алгоритмы включают оценку точности регрессии по скорректированному коэффициенту R^2 [97].

В результате предварительных расчетов на основе обучающей и тестовой выборок получены следующие значения точности аппроксимации:

1. для линейной регрессии $R^2 = 0,3$;
2. для метода Случайного леса $R^2 = 0,7$;
3. для метода Случайного леса по каждой выходной переменной $R^2 = 0,81$;
4. для *SVR-RBF* $R^2 = 0,42$.

Следовательно, делаем вывод о том, что аппроксимирующая регрессия – нелинейная, и единственный метод, который обеспечивает требуемый уровень точности, — это метод Случайного леса по каждой выходной переменной.

Метод Случайного леса один из самых эффективных универсальных алгоритмов машинного обучения, применимых во многих задачах, и обладает следующими достоинствами [99]:

- имеет высокую точность предсказания;
- практически не чувствителен к случайным выбросам в экспериментальных данных;
- сохраняет хорошую точность, если часть экспериментальных данных пропущена;
- способен обрабатывать данные с множественными входными и выходными переменными;

- с помощью настройки параметров можно достичь прироста точности в зависимости от задачи и данных.

Основные недостатки Случайного леса не характерны для решаемой в работе задачи аппроксимации.

Далее для алгоритма Случайного леса следует подобрать параметры настройки, при которых можно устойчиво построить регрессионные модели с требуемым уровнем точности.

4.3 Выбор параметров алгоритма Случайного леса по каждой выходной переменной

Метод Случайного леса состоит в составлении крупного комплекса деревьев решений. Каждое дерево не обеспечивает высокое качество аппроксимации, но большое количество деревьев позволяет получить результирующую регрессию высокой точности [99].

Предварительно пространство значений независимой переменной X разбивается на области, в каждой из которых зависимой переменной Y присваивается среднее значение по области. Результатом этого процесса является разбиение на $R_1, \dots, R_M$ областей, в каждой из которых алгоритм регрессии предсказывает значение выходной переменной с помощью константы C_j в области R_j :

$$\hat{f}(X) = \sum_{j=1}^M C_j \chi_{R_j}(X),$$

где χ_{R_j} – характеристическая функция множества R_j .

Структура дерева принятия решений имеет вид связанного ориентированного корневого графа без циклов, все ребра которого направлены от единственной корневой вершины. В вершинах (узлах) графа записаны признаки, по которым

производится отнесение входных переменных X к той или иной области. Из каждой вершины (за исключением терминальных вершин или листьев) выходит ровно два ребра и, поэтому дерево называется бинарным. Терминальные вершины – финальные, и в них записаны оценочные значения выходной переменной $Y = \hat{f}(X)$ [98].

Процесс принятия решений начинается с корневой вершины и состоит в последовательном применении правил, связанных с признаками в вершинах дерева. В результате указанного процесса определяется терминальный узел, такой, что $X \in R_j$. Под глубиной дерева решений понимается максимальное количество вершин в дереве.

Для построения ансамбля деревьев применяется алгоритм баггинга (или бутстрэп-агрегирования), что позволяет повысить точность моделей регрессий [97].

Предположим, что имеется обучающая выборка $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$, где n – длина обучающей выборки с экспериментальными измерениями:

$$g_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}, y_i).$$

Хотим оценить значение выходной переменной в точке $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$. Для оценки значения выходной переменной происходит формирование ансамбля из B деревьев. Деревья строятся на основе бутстрэп-выборки B^{*b} ($b = 1, \dots, B$) из начальной обучающей выборки G . Каждая бутстрэп-выборка создается путем случайного извлечения набора данных из обучающей выборки с возвращением, чтобы ее длина имела размер n . При этом 63% измерений должны быть уникальными, а остальные могут быть с повторениями. На Рисунке 4.2 показана схема баггинга построения прогноза на входном векторе x по ансамблю деревьев.

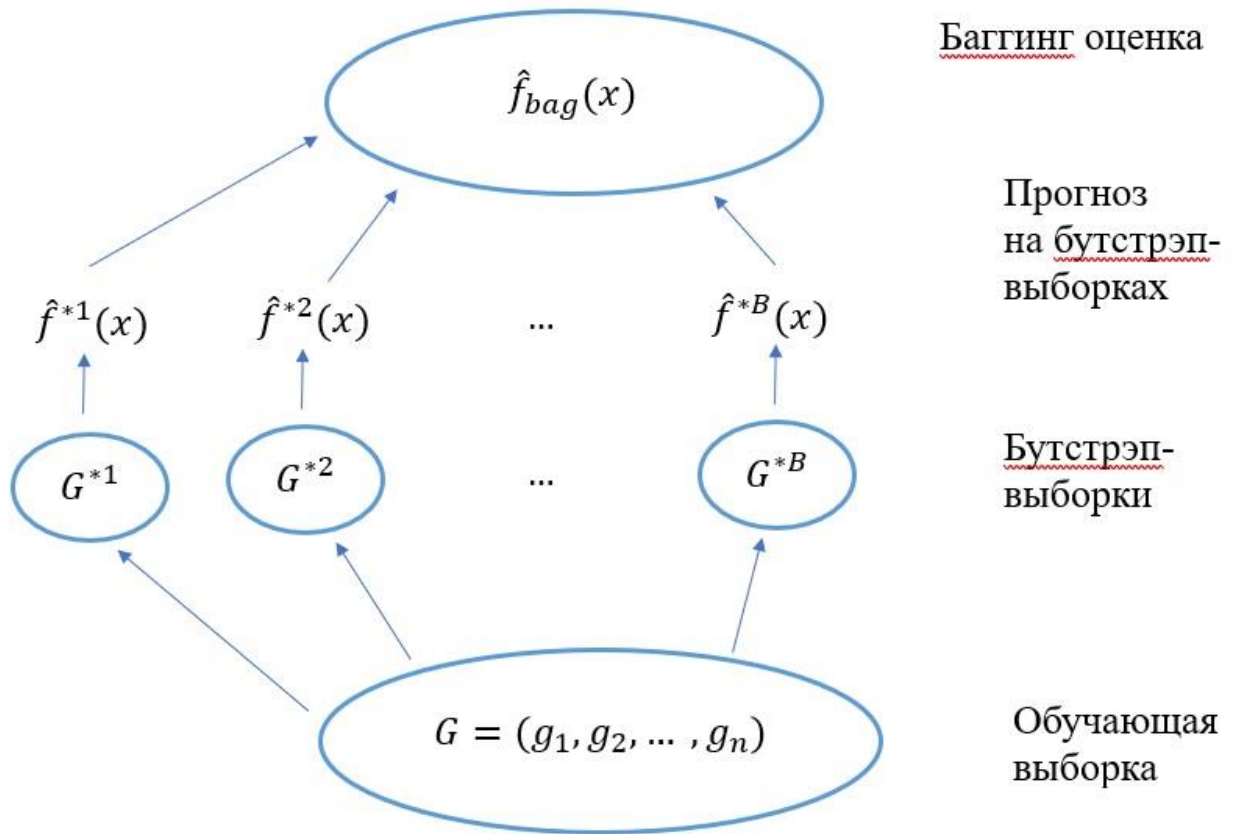


Рисунок 4.2 – Схема баггинга построения прогноза на входном векторе x по ансамблю деревьев

Для каждой бутстрэп-выборки G^{*b} ($b = 1, \dots, B$), мы аппроксимируем нашу модель, получая прогноз $\hat{f}^{*b}(x)$. Тогда баггинг оценка на входном векторе x определяется по набору прогнозов по B деревьям на B бутстрэп-выборках:

$$\hat{f}_{bag}(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \hat{f}^{*b}(x).$$

В случайных лесах решения деревьев слабо коррелированы вследствие того, что бутстрэп-выборки формируются случайным образом, и для разделения вершин используется доля случайно отбираемых признаков. Это и определяет высокую точность метода построения регрессии.

Основными настраиваемыми параметрами для построения случайного леса по обучающей выборке являются:

1. число деревьев решений $n_estimators=B$;
2. число случайно отбираемых признаков для разделения (расщепления) вершин $max_features$;
3. максимальная глубина деревьев $max_depth=m$.

В библиотеке *Scikit-learn* параметр $max_features$ принимается равным максимальному значению по умолчанию. Тогда в нашей задаче $max_features=p=2$.

Увеличение числа деревьев приводит к более точному прогнозированию модели, но будет дольше вычисляться. При увеличении максимальной глубины деревьев возрастает качество как на обучении модели, так и на ее тестировании, но дольше строится и работает алгоритм случайного дерева [100, 101]. Поэтому методом перебора проводим выбор числа деревьев B из множества $\{80, 90, 100, 150, 200\}$ и максимальной глубины деревьев m из множества $\{10, 20, 30, 40, 50, 60\}$ с оценкой точности регрессии на общей выборке по показателю R^2 (4.1). На Рисунке 4.3 показан график зависимости R^2 от B и m . На основе проведенных расчетов принимаем значения $B = n_estimators = 160$, $m = max_depth = 20$, $max_features = 2$, при которых $R^2 = 0,82$, а время работы алгоритма изменяется слабо.

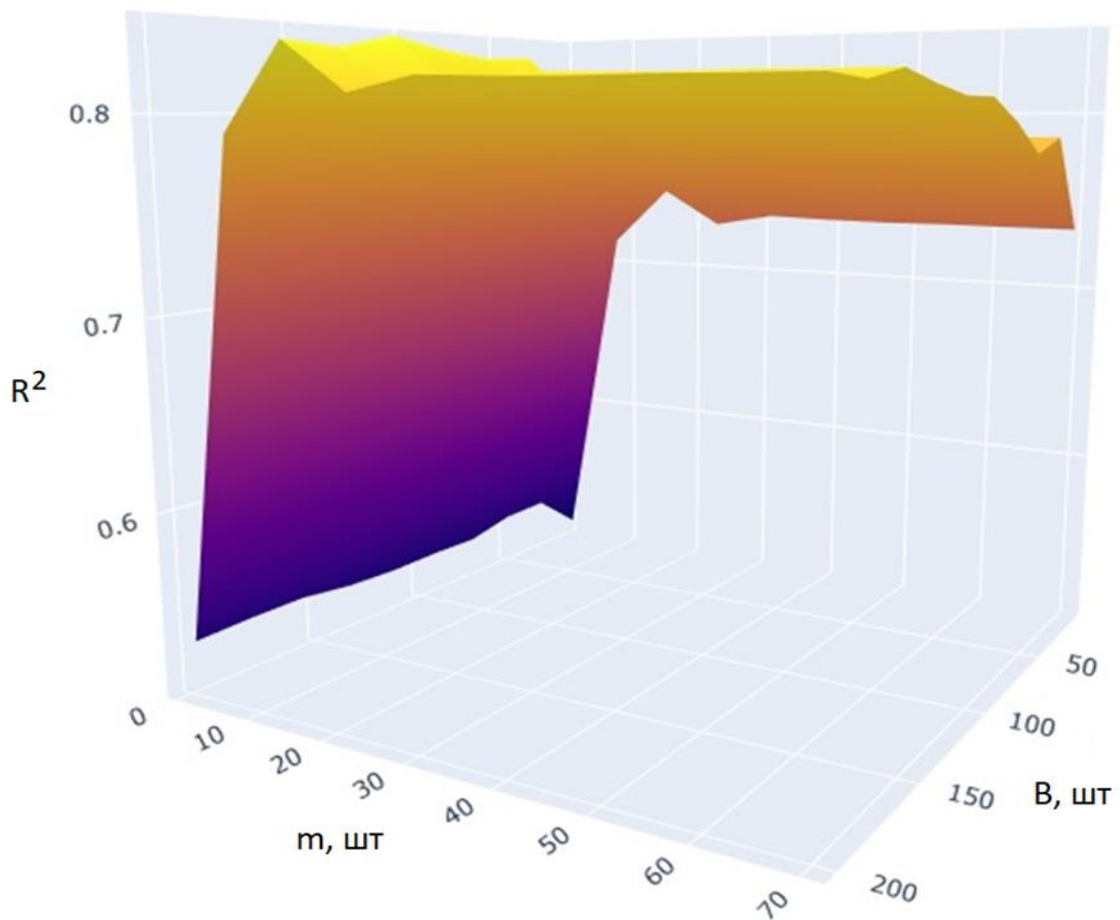


Рисунок 4.3 – Зависимость точности регрессии R^2
от параметров алгоритма B и m

4.4 Построение двумерной регрессии по двум выходным переменным. Алгоритм повышения точности целевой операции позиционирования точки на рабочей плоскости бортовой АРТС

Задача состоит в построении аппроксимирующих зависимостей между координатами (x, y) точек на рабочей плоскости космонавта-оператора и координатами (z, w) точек на рабочей плоскости бортовой АРТС в виде: $x = f_1(z, w); y = f_2(z, w)$ на основе множества экспериментальных данных, показанных на Рисунке 4.1. Для этого разработан Программный модуль 1 «Обучение», в котором реализован алгоритм Случайного леса по каждой

выходной переменной для построения регрессий $x = f_1(z, w); y = f_2(z, w)$; на обучающей выборке и с определением точности на тестовой выборке, приведенным в Таблице 4.2. Принятые параметры алгоритма Случайного леса: $n_estimators = 160$, $max_depth = 20$, $max_features = 2$. Текст Программного модуля 1 «Обучение» на языке программирования *Python* с использованием библиотеки *Scikit-learn* дан в Приложении А.

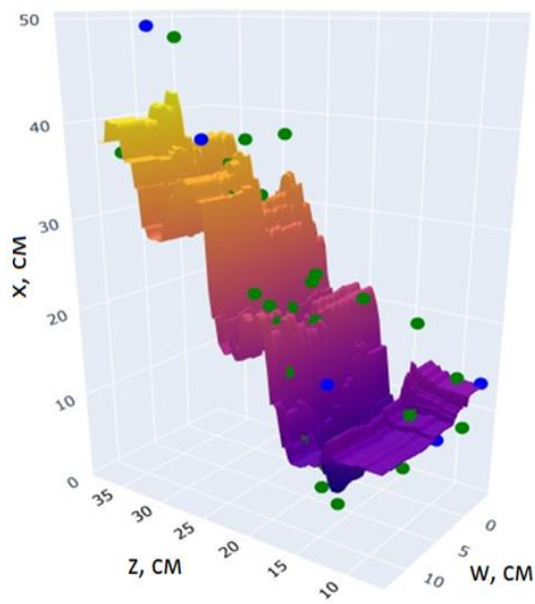
В результате расчетов на ЭВМ получены искомые регрессионные зависимости. На Рисунке 4.4 показана регрессия $x = f_1(z, w)$ в трех различных ракурсах с изображением точек обучающей выборки зеленым цветом, тестовой выборки синим цветом. Аналогично, на Рисунке 4.5 показана регрессия $y = f_2(z, w)$ в трех ракурсах и также с указанием точек обучающей и тестовой выборок. Точность регрессионных зависимостей по показателю R^2 не ниже 0,82.

Отметим, что экспериментальные данные были получены оператором, не имеющим специальной физической подготовки и опыта работы в робототехнической системе. Если провести предварительное обучение оператора, то точность регрессий будет значительно повышена.

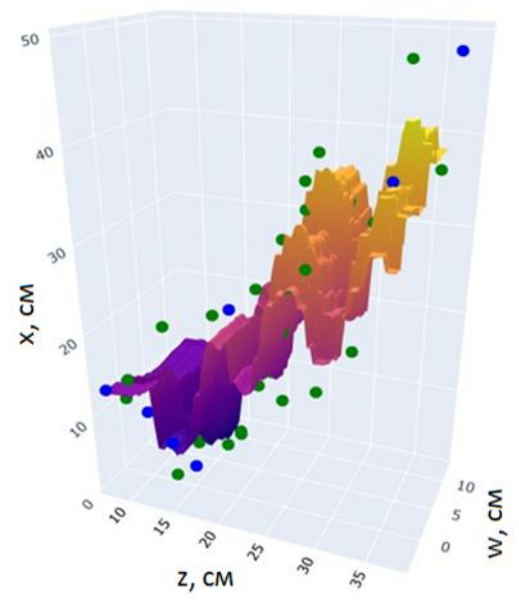
После построения регрессий для каждого космонавта-оператора можно оценить координаты (x, y) точки на плоскости оператора по требуемому значению координат (z, w) точки на рабочей плоскости АР. Для этого разработан Программный модуль 2 «Позиционирование» на языке программирования *Python* с использованием библиотеки *Scikit-learn*, приведенный в Приложении Б.

Методика повышения точности целевой операции позиционирования точки на рабочей плоскости основана на алгоритме, который состоит из трех этапов, показанных на схеме на Рисунке 4.6. Рассмотрим подробнее содержание этапов.

a)



b)



c)

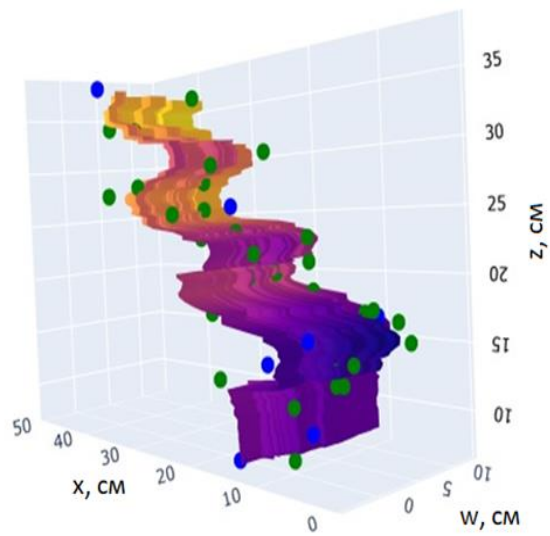
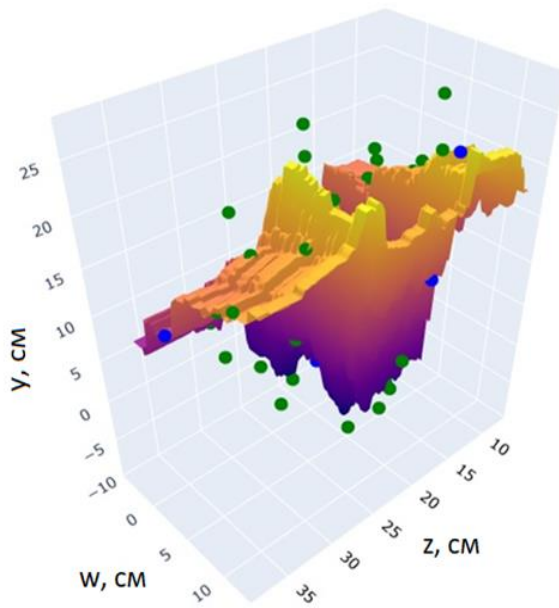
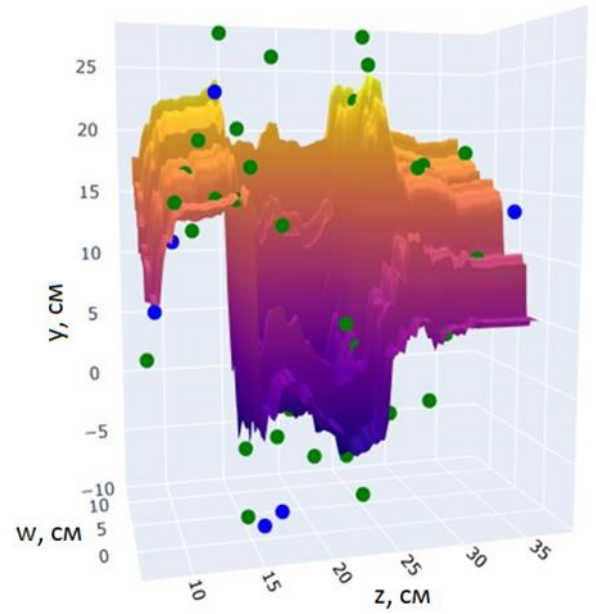


Рисунок 4.4 – График регрессии $x = f_1(z, w)$ в трех ракурсах: a), b), c)

a)



b)



c)

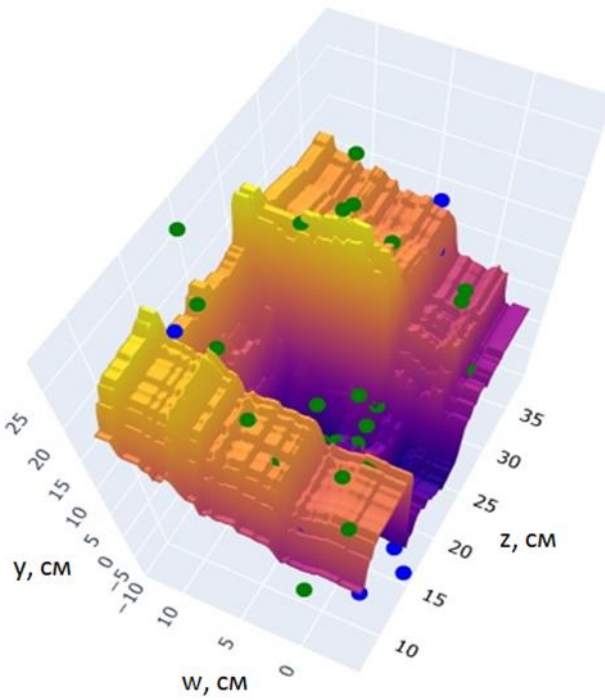


Рисунок 4.5 – График регрессии $y = f_2(z, w)$ в трех ракурсах: a), b), c)

На этапе 1 в наземных условиях провести обучение космонавта-оператора работе в ЗУКТ с бортовой РТС. В том случае, если необходимость в этом отсутствует, первый этап можно пропустить.

На втором этапе, также осуществляемым в наземных условиях, проводится серия экспериментов по позиционированию точек на рабочих плоскостях космонавта-оператора и бортовой АРТС для формирования общей выборки, которая затем разделяется на обучающую (80% точек) и тестовую (20% точек) выборки. Экспериментальные точки рекомендуется выбирать с учетом равномерного покрытия ими предполагаемой рабочей области космонавта-оператора. На подэтапе 2.4 на основе обучающей и тестовой выборок проводится построение двумерной регрессии по двум переменным $x = f_1(z, w)$; $y = f_2(z, w)$ с помощью Программного модуля 1 «Обучение». В нем реализован метод и алгоритм Случайного леса, рассмотренный в разделе 4.2 с параметрами, выбранными в разделе 4.3.

В случае, если требуемая точность по критерию $R^2 \geq 0,8$ не удовлетворяется, проводится возврат на этап 1 для дополнительного обучения оператора. Если требуемая точности достигается, то на этом работы, проводимые в наземных условиях закончены.

Работы третьего этапа проводятся в условиях выполнения космической программы. После выбора космонавтом-оператором координат (z, w) требуемой точки на рабочей плоскости бортовой АРТС, эти координаты передаются на ПК в Программный модуль 2 «Позиционирование». В указанном модуле хранится база двумерных регрессионных зависимостей, построенных для конкретных космонавтов-операторов. С использованием базы регрессий происходит расчет искусственных координат (x, y) на рабочей плоскости оператора. Затем искусственные координаты рабочей точки

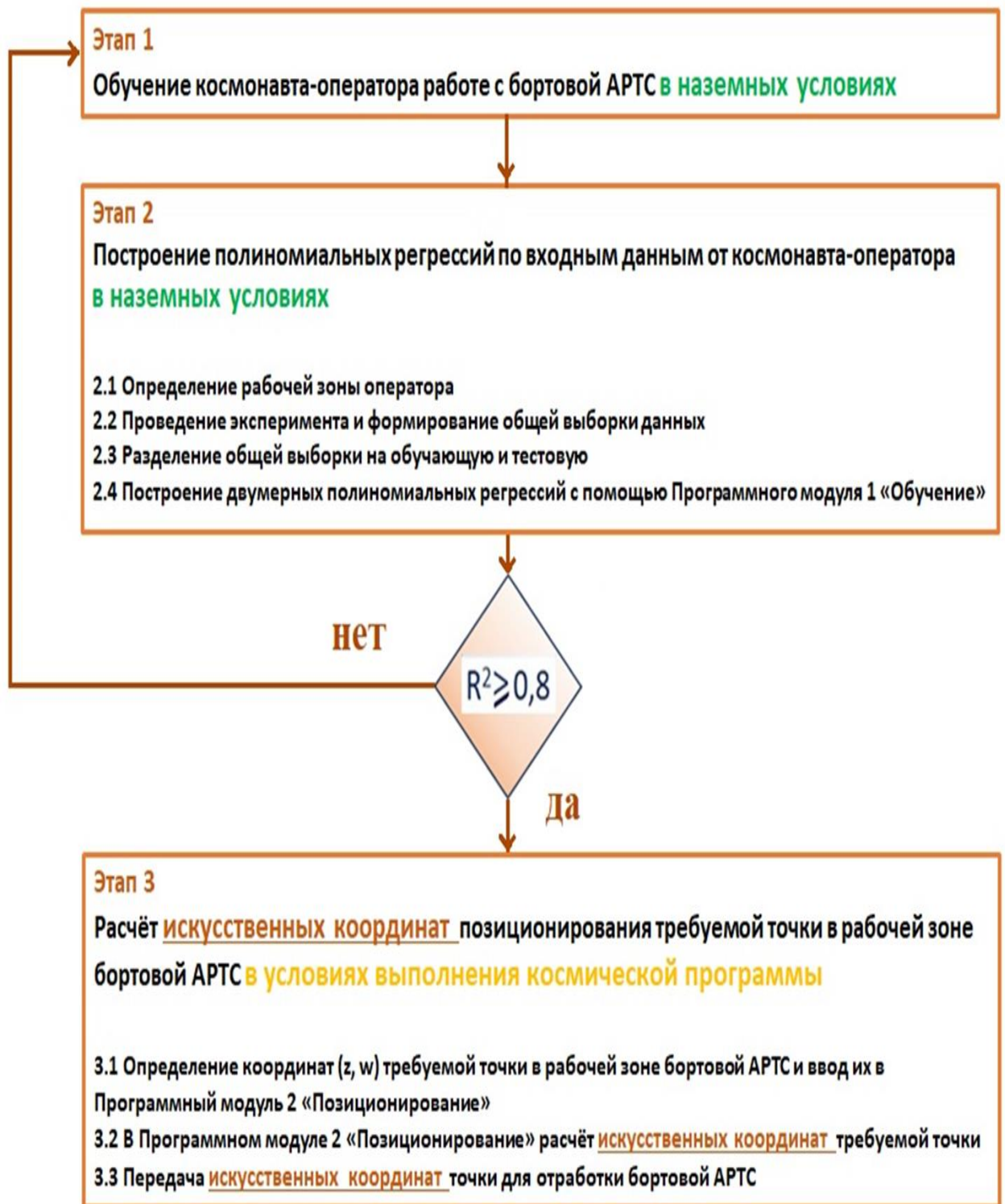


Рисунок 4.6 – Схема алгоритма повышения точности целевой операции по позиционированию рабочей точки

(z, w) передаются для обработки АРТС. Вся операция по позиционированию рабочей точки проводится в реальном масштабе времени, так как Программный модуль 2 «Позиционирование» работает мгновенно.

4.5 Реализация метода повышения точности позиционирования исполнительных органов антропоморфных робототехнических систем в системе копирующего управления манипуляторами бортовой АРТС

Сформулированы предложения на основании разработанных метода и алгоритмов по внедрению результатов исследований в структуру системы управления бортовой АРТС, Рисунок 4.7.

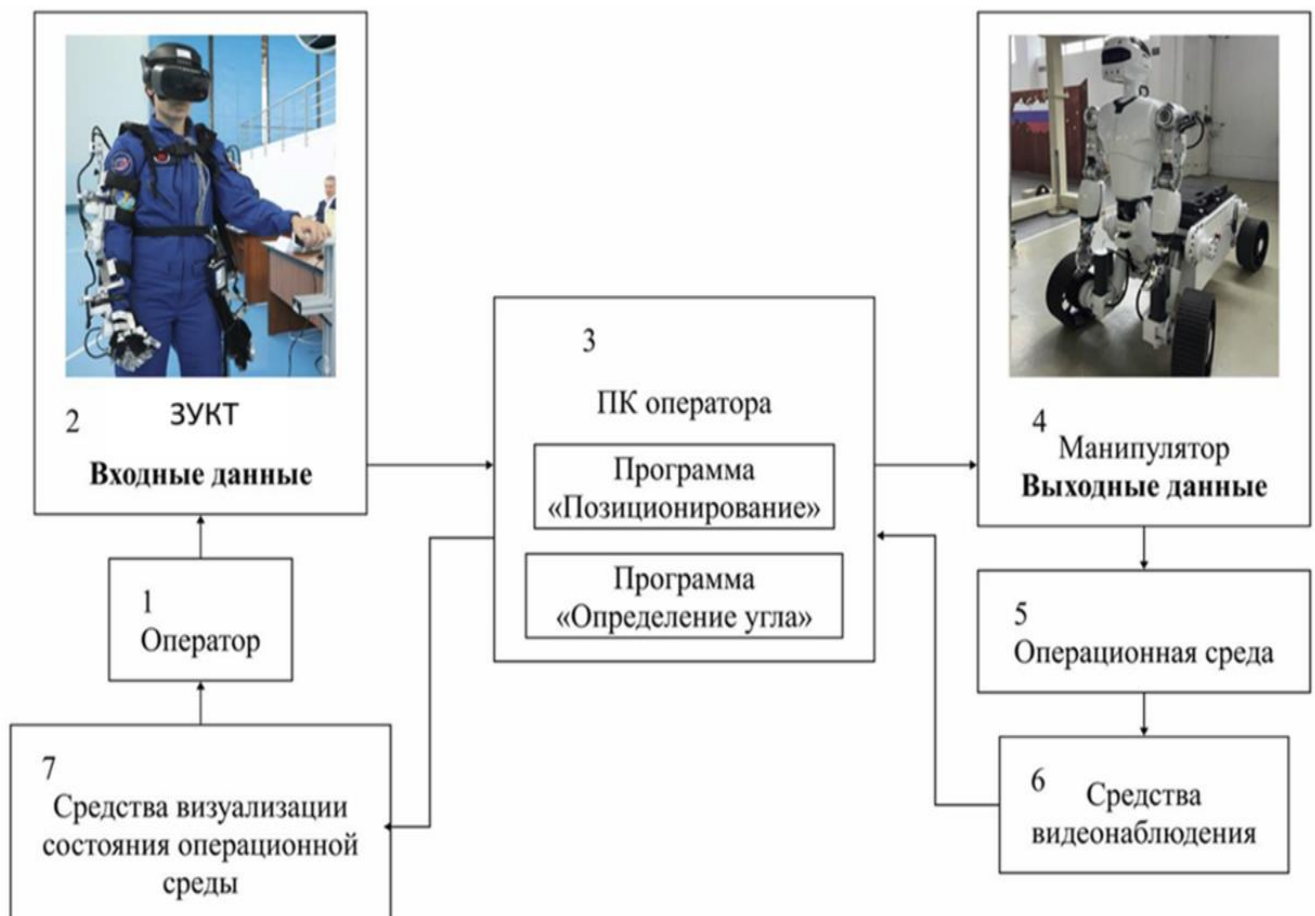


Рисунок 4.7 - Структура системы управления бортовой АРТС

Система копирующего управления манипуляторами бортовой АРТС включает следующие аппаратные части:

- 1 – оператор;
- 2 – ЗУКТ;
- 3 – ЭВМ;
- 4 – манипуляторы АРТС;
- 5 – операционная среда;
- 6 – средства видеонаблюдения;
- 7 – средства визуализации состояния операционной среды.

Техническая реализация системы копирующего управления бортовой АРТС заключается в использовании персонального компьютера космонавта-оператора в качестве ЭВМ, а блок программного контроллера и блок управления приводами манипулятора бортовой АРТС выступают в качестве устройства управления бортовой АРТС.

Представленные аппаратные составляющие образуют экспериментальный образец системы обработки и передачи сигналов управления.

Система копирующего управления манипуляторами бортовой АРТС включает следующие программные компоненты:

- основная программа;
- модуль формирования законов управления приводами манипуляторов бортовой АРТС, установленный на ПК оператора; в данный модуль интегрируются программные модули «Позиционирование» и «Определение угла» с использованием хранящейся информации о построенных регрессиях для различных целевых операций для определенных космонавтов-операторов.
- модуль передачи сигналов управления манипуляторами бортовой АРТС.

В структуру системы копирующего управления бортовой АРТС входят:

- ПК космонавта-оператора (верхний уровень), используется для обеспечения синхронности работы приводов, визуального наблюдения выполняемых технологических операций и фиксации информации в базе данных;

- блок программного контроллера (средний уровень), преобразует управляющие команды, поступающие от персонального компьютера космонавта-оператора, в сигналы к блоку управления приводами;
- блок управления приводами (нижний уровень), используется для управления исполнительными механизмами.

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, что обеспечивает выполнение целевой операции по позиционированию точек на рабочих плоскостях оператора и бортовой АРТС с точностью не менее 80%, а выполнение целевой операции попадания рукой бортовой АРТС рычагом управляющего устройства в заданный угол поворота с точностью не менее 90 %.

Для написания программ повышения точности возможных иных целевых операций разработана методика проведения эксперимента и построения регрессионных зависимостей, представленная в приложении В.

Заключение по Главе 4

Разработан алгоритм повышения точности базовой целевой операции позиционирования точки на рабочей поверхности бортовой АРТС, реализуемый на предварительных этапах, проводимых в наземных условиях, и на этапе выполнения космической программы.

В наземных условиях для конкретного космонавта-оператора на основе проведенных им экспериментальных работ с бортовой АРТС, заводской номер БПАГ.442468.005, совмещенной с мобильной платформой, заводской номер БПАГ.452838.004, управляемой с помощью ЗУКТ, заводской номер 426471.005.001, проводится построение двумерной регрессии, аппроксимирующей координаты точек на рабочих плоскостях оператора и

бортовой АРТС с помощью метода машинного обучения Случайный лес и разработанного Программного модуля 1 «Обучение».

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 обеспечивается выполнение целевой операции по позиционированию точек на рабочих плоскостях оператора и бортовой АРТС с точностью не менее 81%. Среднее отклонение позиционирования точек, выполняемых бортовой АРТС, по сравнению с позиционированием космонавта-оператора снизилась с 6,77 см до 1,29 см.

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 и алгоритмов повышения точности базовых целевых операций исполнительных органов антропоморфных робототехнических систем для перспективных пилотируемых космических программ.

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 бортового 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 плоскостях оператора и бортовой АРТС с точностью не менее 81%. Среднее отклонение позиционирования точек, выполняемых бортовой АРТС, по сравнению с позиционированием космонавта-оператора 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 рычаг управляющего устройства в заданный угол поворота и позиционирования точки на рабочей поверхности бортовой АРТС.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработок 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 АР с помощью ЗУКТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галин Р.Р. Методы и алгоритмы распределения работ в коллаборативной робототехнической системе: дис. кандидата технических наук. Москва, 2023. – 163 с.
2. 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.
3. Тебуева Ф.Б. Классификация и назначение робототехнических систем. Анализ систем управления мобильными манипуляционными роботами [Текст] / Ф. Б. Тебуева, М. Г. Огур, В. Б. Сычков – М., 2017. – 26 с. – Деп. в ВИНТИ Рос. акад. наук 10.02.2017. – № 14-B2017.
4. 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.
5. Galin R., Meshcheryakov R. Review on Human-Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace. In: Ronzhin A., Regoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics // ICR 2019. Lecture Notes in Computer Science. 2019. Vol 11659. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_7.
6. Ермишин К.В., Ющенко К.А. Коллаборативные мобильные роботы – новый этап развития сервисной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. №3(12). С. 3-9.
7. Galin R., Meshcheryakov R. Collaborative Robots: Development of Robotic Perception System, Safety Issues, and Integration of AI to Imitate Human Behavior. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) // Proceedings of 15th International Conference on Elektromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2020. Vol 187. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0_14.

8. Mihelj M., et al. (2018). Collaborative Robots. Robotics. P. 173–187. DOI:10.1007/978-3-319-72911-4_12.

9. 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.

10. Sycara K., Pannu A., Williamson M. Distributed Intelligent Agents // IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications. 1996. Vol. 11. № 6. P. 36–46.

11. 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.

12. Franklin C. S. et al. Collaborative robotics: New era of human–robot cooperation in the workplace // Journal of Safety Research. 2020. Vol. 73. P. 1-8. Elsevier Ltd., Amsterdam, Netherlands.

13. Konz S. Work design: industrial ergonomics. Third Edition. Scottsdale, Arizona: blushing Horizons, Inc., 1990.

14. Paluch S., Wirtz J., Kunz W.H. Service Robots and the Future of Services. In: Bruhn M., Burmann C., Kirchgeorg M. (eds) Marketing Weiterdenken. Springer Gabler, Wiesbaden. 2020. DOI: 10.1007/978-3-658-31563-4_21.

15. Конюховская А.С., Цыпленкова В.Н. Рынок робототехники: угрозы и возможности для России. М., 2020.

16. 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.

17. Matúšová M., Bučányová M., Hrušková E. The future of industry with collaborative robots // MATEC Web of Conferences. Vol. 299. P. 1-6. EDP Sciences, Les Ulis, France (2019).

18. Булгаков А.Г. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление / А.Г. Булгаков, В.А. Воробьев – М.: Солон-Пресс. – 2007. – 488 С.

19. Корендясев А.И. Теоретические основы робототехники / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес – В 2 кн. – М.: — Наука. – 2006. – 384 С.

20. 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.

21. 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.

22. Michalos G., et al. Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces // Procedia CIRP. 2015. №37. P. 248–253. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.014.

23. 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.

24. Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications / V. Villani, F. Pini, F. Leali, C. Secchi // *Mechatronics* 55. 2018. P. 248–266. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009.

25. Galin R.R., Meshcheryakov R.V. Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration. In: Kravets A. (eds) *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Studies in Systems, Decision and Control*, 2020. Vol 272. Springer, Cham.

26. Lasota P., Shah J. Analyzing the effects of human-aware motion planning on close proximity human-robot collaboration // *Human Factors*. 2015. №57(1). P. 21-33.

27. 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.

28. Schmidtler A., et al. Human Centered Assistance Applications for the working environment of the future // *Occupational Ergonomics*. 2015. № 12(3). P. 83-95.

29. Hoffman G. Evaluating Fluency in Human–Robot Collaboration // *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2019. P. 1–10. DOI:10.1109/THMS.2019.2904558.

30. Wang X. V., et al. Human–robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation // *CIRP Annals*. 2017. № 66(1). P. 5–8. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.101.

31. Holly A., Yanko Jill, D. Classifying human-robot interaction: an updated taxonomy // *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2004. P. 2841-2846.

32. Scholtz J. *Theory and Evaluation of Human Robot Interactions.*” Hawaii International Conference on System Science 36 (HICSS 36). Hawaii, January 2003.

33. Huttenrauch H., Eklundb K. S. Investigating socially interactive robots that give the right cues and make their presence felt // Proceedings of the CHI 2004 Workshop on Shaping Human-Robot Interaction, 2004. P 17 - 20.

34. Ellis C. A., Gibbs S. J., Rein G. L. Groupware: some issues and experiences” // Communications of the ACM. 1991. № 34(1). P. 39 - 58.

35. Goodrich M. A., Crandall J. W., Stimpson J.L. Neglect tolerant teaming: issues and dilemmas // Proceedings of the 2003 AAAI Spring Symposium on Human Interaction with Autonomous Systems in Complex Environments. 2003.

36. Белоножко П.П. Космическая робототехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденции развития. Аналитический обзор. /Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. – 2016. – № 12. – С. 110-153.

37. Робонавт: эксперимент. – https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/robonavt_/ (дата обращения 16.11.2021).

38. Козлов В.И., Николаев В.С., Пеньков И.А. К вопросу о применении робототехнических средств специального назначения МЧС России при проведении аварийного поиска и спасения экипажа спускаемого космического аппарата при его приземлении в зонах крупных лесных пожаров // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – №3 (48). – С. 70–79.

39. Робонавт 2 будет на МКС этим летом. – <http://universetoday-rus.com/blog/2014-03-14-1635> (дата обращения 16.11.2021).

40. Space Station SPHERES Run Circles Around Ordinary Satellites. – https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/upcoming_spheres.

41. Первый в мире робот–астронавт Kirobo вернулся на землю. - https://www.toyota.ru/news_and_events/2015/kirobo-is-back.

42. Японский дрон Int-Ball с камерой на МКС контролируется с Земли. – <https://3dnews.ru/955595/yaponskiy-dron-intball-s-kameroj-na-mks-kontroliruetsya-s-zemli>.

43. Робот Astrobee поможет астронавтам на МКС. – <https://habr.com/ru/post/401509/>

44. Контур-2: эксперимент. – https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/kontur_2/ (дата обращения 16.11.2021).

45. В.А. Мулюха, В.С. Заборовский, М.Ю. Гук, А.В. Силиненко. Результаты космического эксперимента «Контур–2» по отработке технологий удаленного управления напланетными робототехническими объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – №9. – 2017. – С. 153-169.

46. Испытатель: эксперимент. – <https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/ispitatel/> (дата обращения 16.11.2021).

47. Подготовка и проведение космического эксперимента с применением антропоморфного робота «Федор» /А.Ф. Пермяков, Е.А. Дудоров, И.Г. Сохин, А.А. Шпонько. // Известия вузов. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 64-72

48. Теряев Е.Д. Современный этап развития мехатроники и грядущая конвергенция с нанотехнологиями / Е.Д. Теряев, Н.Б. Филимонов, К.В. Петрин // Мехатроника, автоматизация, управление: материалы II Российской конференции по проблемам управления. – СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», – 2008. – С. 9-21.

49. Шеломенцев Е.Е. Реализация системы управления для антропоморфного манипулятора. / Е.Е. Шеломенцев // Молодежь и современные информационные технологии: материалы XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ИК ТПУ, – 2014. – С. 28-29.

50. Хурс С.П. Состояние и тенденции развития антропоморфной робототехники. Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация / С.П. Хурс, А.А. Верейкин // МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2016. – № 04. – С. 25-52.

51. Liu, H. A common wireless remote-control system for mobile robots in laboratory / H. Liu, N. Stoll // IEEE I2MTC – International Instrumentation and

Measurement Technology Conference, Proceedings. – Graz, Austria, – 2012. – P. 688-693.

52. Богданов, А.А. Основы построения специальных роботов для работы на космических аппаратах / А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, В.Б. Сычков и др. // Робототехника и искусственный интеллект: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Красноярск: Изд-во СФУ. – 2016. – С. 48-53.

53. Сохин, И.Г. Эргономическое исследование дистанционного взаимодействия космонавтов с антропоморфными роботами-помощниками / И.Г. Сохин, М.В. Михайлюк, В.Б. Сычков [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 3 (12). – С. 18-22.

54. Сохин И.Г. Экспериментальные эргономические исследования дистанционного взаимодействия космонавтов с антропоморфными роботами помощниками с использованием технологий виртуального окружения / И.Г. Сохин, Ю.В. Лончаков, В.Б. Сычков [и др.] // Экстремальная робототехника. – 2016. – Т.1. – № 1. – С. 415-422.

55. Гребенщиков А.В. Моделирование с помощью программно-аппаратного комплекса виртуальной реальности процессов выполнения типовых полётных операций на борту пилотируемого космического аппарата роботом андроидного типа в телеоператорном копирующем режиме управления с задающим устройством в виде экзоскелета / А.В. Гребенщиков, А.А. Богданов, В.Б. Сычков [и др.] // Системный анализ, управление и навигация: тезисы докладов XXI Международной научной конференции. – М: Изд-во МАИ. – 2016. – С. 102-104.

56. Михайлюк М.В., Крючков Б.И., Усов В.М., Князьков М.М., Лахин О.И. Формирование у космонавтов пользовательского опыта взаимодействия в виртуальной среде с сервисными мобильными роботами на лунной базе // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – №3 (48). – С. 90–103.

57. Сорокин В.Г., Дудоров Е.А. Этапы информационного взаимодействия космонавта с антропоморфным роботом космического назначения в копирующем режиме // Пилотируемые полеты в космос. – 2021. – №2 (39). – С. 78–96.

58. Жиденко И.Г. Обоснование выбора структурной схемы роботов космического исполнения / И.Г. Жиденко, И.М. Кутлубаев, А.А. Богданов, В.Б. Сычков // Решетневские чтения: материалы XVII Международной научной конференции, посвященной памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (12-14 ноября 2013 г., Красноярск): в 2 ч. /под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2013. – Ч. 1. – 522 С.

59. Михайлюк М.В., Мальцев А.В., Тимохин П.Ю., Страшнов Е.В., Крючков Б.И., Усов В.М. Системы виртуального окружения для прототипирования на моделирующих стендах использования космических роботов в пилотируемых полетах // Пилотируемые полеты в космос. – 2020. – №2 (35). – С. 61–75.

60. Богданов, А.А. Перспективы создания антропоморфных робототехнических систем для работы в космосе / А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, В.Б. Сычков // Пилотируемые полеты в космос. – 2012. – № 1 (3). – С. 78-84.

61. 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.

62. 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.

63. 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 Годичная 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.

64. 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.

65. 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.

66. 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. – В3. 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/>

67. 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.

68. 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.

69. 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.

70. 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.

71. Богданов, А.А. Антропоморфные роботы – составляющая научной аппаратуры орбитальных станций / А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, А.Ф., В.Б. Сычков [и др.] // Под ред. В.А. Углева / Робототехника и искусственный интеллект: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Сибирский федеральный университет. – Красноярск. – 2016. – С. 71-80.

72. 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.

73. Испытатель: эксперимент. – <https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/isytyatel/> (дата обращения 16.05.2022).

74. Теледроид: эксперимент. – <https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/teledroid/> (дата обращения 16.05.2022).

75. Сорокин В.Г., Дудоров Е.А. Этапы информационного взаимодействия космонавта с антропоморфным роботом космического назначения в копирующем режиме // Пилотируемые полеты в космос. 2021. № 2 (39). С. 78-96.

76. Чеботарев Ю.С., Дикарев В.А. О некоторых направлениях обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавтов с робототехническими системами для пилотируемых космических полетов. //Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Proceedings of the International scientific and technological conference «Extreme robotics»). – 352 С. – 10.31776/ConfER.32.2021. – С. 65-77.

77. Дикарев В.А., Довженко В.А., Никитов Э.В., Чеботарев Ю.С. Предпосылки и результаты модернизации универсального компьютерного стенда робототехнических систем // Пилотируемые полеты в космос. – 2021– №4 (41). – С 36-47.

78. Кирильченко А.А., Платонов А.К., Соколов С.М. Теоретические аспекты организации интерпретирующей навигации мобильного робота // Препринты ИПМ им.М.В. Келдыша. – 2002. – № 5. – 40 С.

79. 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 космонавтики. – Реутов, – 2024. – С. 34-36.

80. Сычков В.Б. Методы и алгоритмы обработки информации для повышения точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота: дис. кандидата технических наук. Ставрополь, 2019. – 155 С.

81. Давыдов О.И., Платонов А.К. Сеть Пассфреймов – комбинированная модель операционной среды мобильного робота // Препринты ИПМ им.М.В. Келдыша. – 2015. – № 46. – 28 С.

82. Кирильченко А.А., Зуева Е.Ю., Платонов А.К., Соколов С.М. Формальные подходы к проектированию алгоритмов информационного обеспечения мобильных систем (выбор пути, навигация, надежность) // Препринты ИПМ им.М.В. Келдыша. – 2008. – № 19. – 232 С.

83. Добрынин Д.А. Интеллектуальные роботы вчера, сегодня, завтра // КИИ-2006: Труды 10-й национальной конференции по искусственному интеллекту, 25-28 сентября 2006г., – Обнинск. – М.: Физ-матлит. – 2006. – Т.1 – С. 20-32.

84. Воронкин Д.С. Решение прямой задачи кинематики для шестизвеного шарнирного робота-манипулятора / Д.С. Воронкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 9. – С. 236-241.

85. Сычков В.Б. Разработка критериев оценки эффективности копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3. – С. 203-225.

86. Тебуева Ф.Б. Планирование движения антропоморфного манипулятора при копирующем управлении / Ф.Б. Тебуева, В.И. Петренко, В.Б Сычков и др. // Экстремальная робототехника: сборник тезисов 30-ой Международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во. – 2019. – С. 156-157.

87. Рожнов В.Ф. Основы теории инженерного эксперимента / В.Ф. Рожнов. – Москва : Издательство МАИ, 2007. - 358 С.

88. Sorokin, A.E. Experimental Verification of a Heat Store Model // Russian Engineering Research. - 2022. - Vol. 42. - Is. 1. - P. 63-65.

89. Sorokin, A.E. Experimental Verification of a Mathematical Model for a Heat Store // Russian Engineering Research. - 2021. - Vol. 41. - Is. 8. - P. 742-744.
90. Мелас, В. Б. Численное сравнение перестановочных и классических методов проверки статистических гипотез / В. Б. Мелас, Д. И. Сальников, А. О. Гудулина // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2016. – Т. 3, № 3. – С. 415-423.
91. Sirsky M. On the Statistical Analysis of Functional Data Arising from Designed Experiments: Ph.D. thesis. University of Manitoba. 2012.
92. Good P. I. Resampling Methods: A Practical Guide to Data Analysis. 3 edition. Birkhauser, 2006.
93. Орлов, А. И. Непараметрические критерии согласия Колмогорова, Смирнова, Омега-квадрат и ошибки при их применении / А. И. Орлов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 97. – С. 31-45. – EDN QNZHYO.
- 94 Колмогоров А.Н. К вопросу о пригодности найденных статистическим путем формул прогноза // Журнал геофизики. 2003. Т.3. №1. С.78-82.
- 95 Колмогоров А.Н. Теория вероятности и математическая статистика: // Сб. статей. – М.: Наука, 1986. – 535 с.
- 96 Смирнов Н.В. Теория вероятности и математическая статистика. Избранные труды. –М.: Наука, 2007. – 289 С.
97. Хасты Т., Тибширани Р., Фридман Д. Основы статистического обучения: интеллектуальный анализ данных, логический вывод и прогнозирование, 2-е изд.: Пер. с англ. – СПб.: ООО «Диалектика», 2020. – 768 С.
98. Drucker H., Burges G., Kaufman L., Smola A.J., Vapnik V.N. Support Vector Regression Machines // Advances in Neural Information Processing Systems. – 1996. – № 9. – Pp. 155-161.
99. Чистяков С.П. Случайные леса: обзор // Труды Карельского научного центра РАН. – 2013. – № 1. – С. 117-136.
100. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. – 2001. – № 45. – Pp. 5-32.

101. Geurts P., Ernst D., Wehenkel L. Extremely Randomized Trees // Machine Learning. – 2006. – № 63. – Pp. 3-42.

Приложение А Текст Программного модуля 1 «Обучение»

```
# Скрипт для обучения, демонстрации результатов
# в виде графиков и сохранения обученной модели в файл

import numpy as np
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.multioutput import MultiOutputRegressor
import pickle
import pandas as pd
import math
import plotly.graph_objects as go
from scipy.interpolate import griddata
from plotly.offline import plot

# Входные параметры алгоритма "Случайный лес" по каждой переменной
n_estimator=160
max_depth=20

# Функция загрузка данных для выборок из excel-файла
# Структура excel-файла должна быть следующей:
# первая строчка название столбцов, первый столбец - это нумерация,
# второй и третий столбцы - это координаты (z,w) оператора для обучающей
выборки,
# третий четвертый столбцы - это координаты (x,y) робота для обучающей
выборки,
# пятый и шестой столбцы - это координаты (z,w) оператора для
тестирующей выборки,
```

седьмой и восьмой столбцы - это координаты (z,w) оператора для тестирующей выборки

```
def createData(path):
```

```
    Xtrain=list()
```

```
    ytrain=list()
```

```
    Xtest=list()
```

```
    ytest=list()
```

```
    excel_data = pd.read_excel(path)
```

```
    listData=excel_data.values.tolist()
```

```
    rows=len(listData)
```

```
    for i in range (rows):
```

```
        param=list()
```

```
        param.append(listData[i][3])
```

```
        param.append(listData[i][4])
```

```
        Xtrain.append(param)
```

```
        param=list()
```

```
        param.append(listData[i][1])
```

```
        param.append(listData[i][2])
```

```
        ytrain.append(param)
```

```
        if math.isnan(listData[i][5]):
```

```
            continue
```

```
        param=list()
```

```
        param.append(listData[i][7])
```

```
        param.append(listData[i][8])
```

```
        Xtest.append(param)
```

```

    param=list()
    param.append(listData[i][5])
    param.append(listData[i][6])
    ytest.append(param)

    return Xtrain, ytrain, Xtest, ytest

def getModel(X_train, y_train):
    regr_rf =
MultiOutputRegressor(RandomForestRegressor(n_estimators=n_estimator,
max_depth=max_depth, random_state=0))
    regr_rf.fit(X_train, y_train)
    return regr_rf

def saveModel(path, model):
    with open(path, 'wb') as fp:
        pickle.dump(model, fp)

def calcPoints(points, model):
    pointsOut=model.predict(points)
    return pointsOut

def draw(points, pointsOut, X_train, y_train, X_test, y_test, text):
    xi = np.linspace(math.floor(float(points[:,0].min())),
math.ceil(float(points[:,0].max())), 100)
    yi = np.linspace(math.floor(float(points[:,1].min())),
math.ceil(float(points[:,1].max())), 100)

    X,Y = np.meshgrid(xi,yi)

```

```

Z = griddata((points[:,0],points[:,1]),pointsOut,(X,Y), method='cubic')
layout = go.Layout(scene
dict(xaxis_title='<b><i>z</i></b>',xaxis_color='black',
yaxis_title='<b><i>w</i></b>',zaxis_title='<b><i>'+text+'</i></b>'))
fig = go.Figure(go.Surface(x=xi,y=yi,z=Z), layout=layout)

#Точки
fig.add_trace(go.Scatter3d(x = X_train[:,0],
                           y = X_train[:,1],
                           z = y_train,
                           mode = 'markers',
                           marker = dict(
                               size = 6,
                               color = 'green'
                           )))

fig.add_trace(go.Scatter3d(x = X_test[:,0],
                           y = X_test[:,1],
                           z = y_test,
                           mode = 'markers',
                           marker = dict(
                               size = 6,
                               color = 'blue'
                           )))

plot(fig,filename=text+'.html')

# Начало скрипта
# Формирование выборок

```

```
path='C:/ЦПК/RandomForest/точки 80 20.xlsx'
```

```
Xtrain, ytrain, Xtest, ytest=createData(path)
```

```
# Расчет модели
```

```
X_train=np.array(Xtrain)
```

```
y_train=np.array(ytrain)
```

```
X_test=np.array(Xtest)
```

```
y_test=np.array(ytest)
```

```
model=getModel(X_train, y_train)
```

```
#Сохранение модели в файл
```

```
path='C:/ЦПК/RandomForest/model.sav'
```

```
saveModel(path, model)
```

```
#Точки и расчет значений по модели
```

```
pointIn=list()
```

```
minx1=min(X_train[:,0])
```

```
minx2=min(X_test[:,0])
```

```
minx=min(minx1, minx2)
```

```
maxx1=max(X_train[:,0])
```

```
maxx2=max(X_test[:,0])
```

```
maxx=max(maxx1, maxx2)
```

```
miny1=min(X_train[:,1])
```

```
miny2=min(X_test[:,1])
```

```
miny=min(miny1, miny2)
```

```
maxy1=max(X_train[:,1])
```



```

maxy2=max(X_test[:,1])
maxy=max(maxy1, maxy2)

for i in np.arange(minx, maxx+0.1, 0.1):
    for j in np.arange(miny, maxy+0.1, 0.1):
        param=list()
        param.append(i)
        param.append(j)
        pointIn.append(param)

points=np.array(pointIn)
pointsOut=calcPoints(points, model)

# Построение графиков в html
draw(points, pointsOut[:,0], X_train, y_train[:,0], X_test, y_test[:,0], 'x')
draw(points, pointsOut[:,1], X_train, y_train[:,1], X_test, y_test[:,1], 'y')

```

Приложение Б Текст Программного модуля 2 «Позиционирование»

```
# Скрипт для расчета точек по модели
```

```
import pickle
```

```
import numpy as np
```

```
# Загрузка сохраненной модели
```

```
def loadModel(path):
```

```
    with open (path, 'rb') as fp:
```

```
        model = pickle.load(fp)
```

```
        return model
```

```
    return 0
```

```
# Функция расчета по точки
```

```
def predictPoint(model, z, w):
```

```
    point=np.zeros((1,2))
```

```
    point[0,0]=z
```

```
    point[0,1]=w
```

```
    return model.predict(point)
```

```
# загрузка модели
```

```
path='C:/ЦПК/RandomForest/model.sav'
```

```
model=loadModel(path)
```

```
# Расчет по входной точки (1,2)
```

```
pointOut=predictPoint(model, 1, 2)
```

Приложение В Методика проведения эксперимента и построения регрессионных зависимостей

Для повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС предлагается метод пересчета и введения искусственных параметров базовых целевых операций при управлении космонавтом-оператором бортовой АРТС в режиме ЗУКТ. Искусственные параметры базовых целевых операций рассчитываются в персональном компьютере оборудования ЗУКТ на основе аппроксимирующих регрессионных зависимости между параметрами, задаваемыми рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и параметрами, получаемыми в результате работы рукой бортовой АРТС. Аппроксимирующие регрессионные зависимости являются индивидуальными для космонавтов-операторов бортовой АРТС. Для построения индивидуальных регрессионных зависимостей разработана методика проведения эксперимента и построения регрессионных зависимостей.

Методика предполагает проведение эксперимента, реализуемого на предварительном этапе программы проведения работ с бортовой АРТС в режиме управления с использованием ЗУКТ, проводимом в наземных условиях Рисунок В.1.

На шаге 1 в наземных условиях проводится обучение космонавта-оператора работе в ЗУКТ в РТС. В случае отсутствия в этом необходимости, первый этап может быть пропущен.

Вторым шагом методики является декомпозиция программы работы бортовой АРТС на базовые целевые операции.

Третьим шагом, после определения базовой целевой операции, проводится серия экспериментов с выбранным космонавтом-оператором по управлению выполнению целевой операции бортовой АРТС с использованием ЗУКТ. Серия экспериментов заключается в проведении 40–50 раз базовой целевой операции для получения достаточного количества данных для последующего анализа.

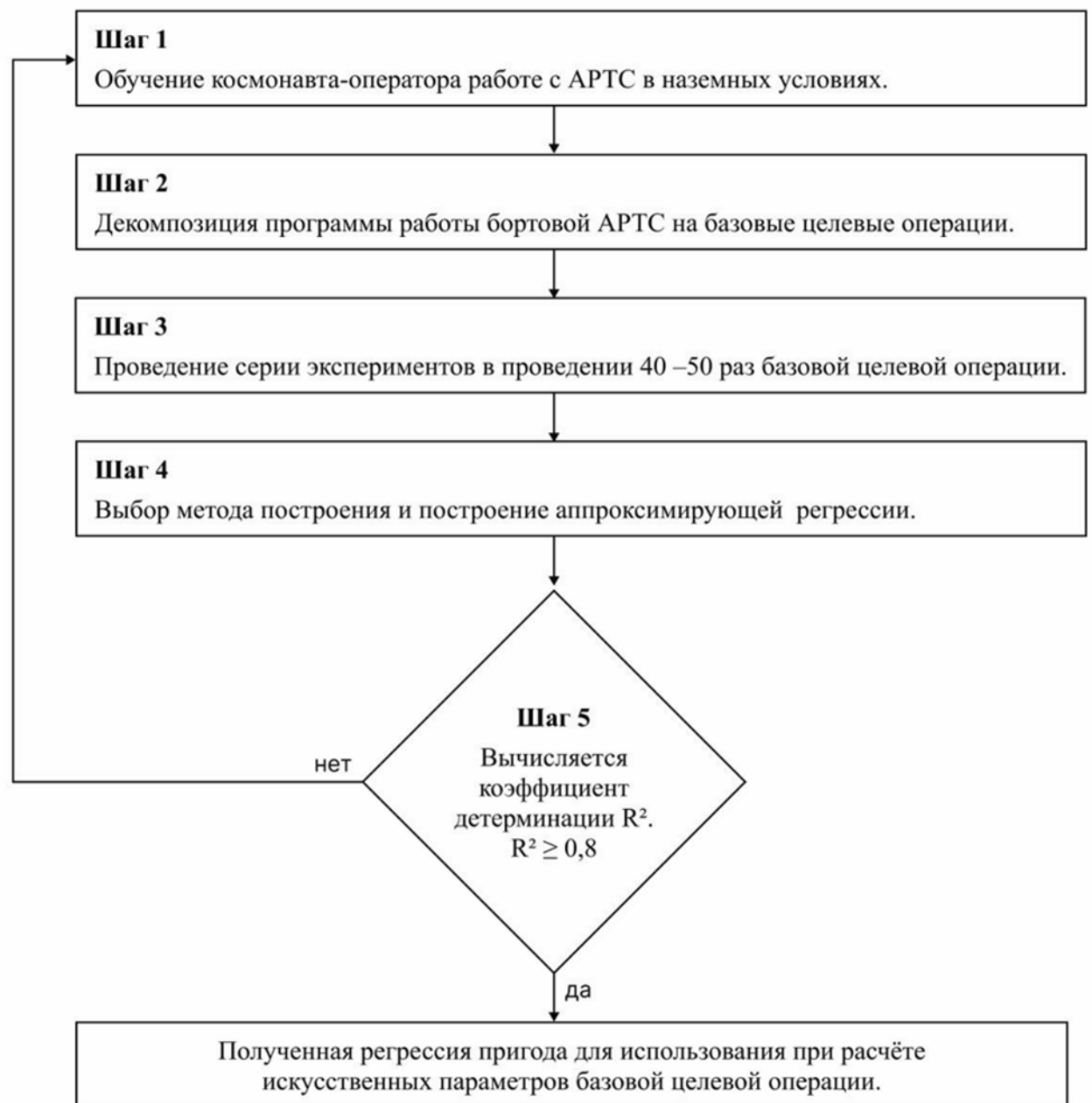


Рисунок В.1 – Методика проведения эксперимента и построения регрессионных зависимостей

Четвертым шагом методики является выбор метода построения и построение аппроксимирующей регрессии. Задачей эксперимента является построение регрессии, аппроксимирующей зависимость между параметрами, устанавливаемыми рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и параметрами, получаемыми в результате работы рукой бортовой АРТС.

Результатом четвертого шага служит аппроксимирующая регрессионная зависимость.

Пятым шагом для полученной регрессии вычисляется коэффициент детерминации R^2 . В случае, если требуемая точность по критерию $R^2 \geq 0,8$ не удовлетворяется, проводится возврат на этап 1 для дополнительного обучения оператора. Если требуемая точность достигается, то на этом работы, проводимые в наземных условиях по проведению эксперимента и построению регрессионных зависимостей закончены.

Приложение Г Акты внедрения диссертационной работы

«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель начальника
ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А.Гагарина»
по науке и развитию

В.И. Дубинин

4 марта 2025 г.



АКТ
о внедрении в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А.Гагарина»
результатов диссертационных исследований
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Кикиной Аяны Юрьевны

Комиссия в составе начальника управления научно-прикладных исследований проблем подготовки космонавтов, д.т.н., профессора Дикарева В.А., начальника научно-исследовательской лаборатории робототехнических и интеллектуальных систем для пилотируемых космических полетов – главного научного сотрудника, к.т.н., доцента Симбаева А.Н. составила настоящий акт о том, что экспериментальные результаты диссертационных исследований на соискание ученой степени кандидата технических наук Кикиной А.Ю., направленные на повышение точности позиционирования исполнительных органов антропоморфных робототехнических систем (АРТС) для перспективных пилотируемых космических программ, получены на универсальном компьютерном стенде робототехнических систем ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А.Гагарина» в составе АРТС (заводской номер БПАГ.442468.005), совмещенной с мобильной платформой (заводской номер БПАГ.452838.004), управляемой операторами в ручных режимах мобильным задающим устройством (ЗУКТ-М, заводской номер 426471.005.001). Это позволило по набранной статистике полученных экспериментальных данных для конкретных операторов:

- определить полиномиальные регрессии, аппроксимирующие зависимости между углами отклонения, устанавливаемых рукой оператора в ЗУКТ-М, и углами отклонения, получаемых в результате работы кистевой части манипулятора АРТС;
- сформировать двумерные регрессии, аппроксимирующие координаты точек на рабочих плоскостях оператора и АРТС с помощью метода машинного обучения «Случайный лес»;
- разработать специальное программное обеспечение алгоритмов повышения точности целевых операций попадания кистевой части манипулятора АРТС, удерживающей рычаг тестового управляющего устройства в заданный угол поворота и позиционирования точки на рабочей поверхности бортовой АРТС.

Вышеприведенные результаты диссертационных исследований Кикиной А.Ю. учтены в использовании универсального компьютерного стенда робототехнических систем для подготовки космонавтов направлению «Экспериментальная космическая

робототехника» и позволили сформировать предложения по повышению точности базовой целевой операции:

1) попадания кистевой части манипулятора АРТС в заданный угол поворота, на основе построения полиномиальной регрессионной зависимости угла отклонения оператором рычага управляющего устройства от угла отклонения бортовым АРТС рычага аналогичного тестового управляющего устройства (в результате обеспечивается выполнение целевой операции попадания кистевой части манипулятора АРТС, удерживающей рычаг тестового управляющего устройства, в заданный угол поворота с точностью не менее 90 %);

2) позиционирования точки на рабочей поверхности бортовой АРТС, основанной на методе машинного обучения «Случайный лес» (в результате обеспечивается выполнение целевой операции по позиционированию точек на рабочих плоскостях оператора и бортовой АРТС с точностью не менее 80%).

Кроме этого, полученные Кикиной А.Ю. результаты рекомендованы для использования в процессе развития научно-технического задела по созданию перспективных бортовых коллаборативных роботизированных технологий и средств, в процессе подготовки космонавтов к бортовой реализации целевых работ и космических экспериментов по робототехнике, включая планируемую целевую работу «Теледронд».

Начальник управления научно-прикладных
исследований проблем подготовки космонавтов
д.т.н., профессор

 В.А. Дикарев

Начальник лаборатории робототехнических
и интеллектуальных систем для пилотируемых
космических полетов – главный научный
сотрудник
к.т.н., доцент

 А.Н. Симбаев

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО Московского авиационного
института



(национального исследовательского
университета)

Д.А. Козорез

«12» сентября 2025 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертации Кикиной Анны Юрьевны в учебный процесс Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Комиссия в составе:

председатель: Директор дирекции института №6 «Аэрокосмический»,
к.т.н., доцент О.В. Тушавина,

члены комиссии: и.о. заведующего кафедрой 614, доцент, д.т.н. А.Е. Белявский, профессор кафедры 614, д.т.н. Н.С. Кудрявцева,

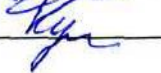
составила настоящий акт о том, что в диссертации Кикиной Анны Юрьевны полученные научные результаты, касающиеся обоснования потенциальных направлений и перспектив коллаборации бортовой антропоморфной робототехнической системы (АРТС) для операционной поддержки деятельности экипажей в перспективных пилотируемых космических программах (ППКП): дистанционно-управляемая бортовая АРТС, коллаборация космонавтов с лунным ровером, создание отечественных экспериментальных образцов роботов-помощников с элементами искусственного интеллекта, обеспечивающих деятельность космонавтов (в частности, при управлении др. бортовым оборудованием, научной аппаратурой и в составе групп); разработанного метода повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС, реализуемого на предварительном этапе, проводимом в наземных условиях, и на этапе выполнения космической программы используются в учебном процессе кафедры 614 МАИ при преподавании дисциплин «Системы обеспечения жизнедеятельности и защиты» и «Технологии искусственного интеллекта», а также рекомендуются студентам при выполнении ими курсовых и дипломных проектов.

Метод повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС, реализуемый на предварительном этапе, проводимом в наземных условиях, и в условиях выполнения космической программы; алгоритмы повышения точности базовых целевых операций попадания манипулятором бортовой АРТС рычага управляющего устройства в заданный угол поворота и позиционирования точки на рабочей поверхности бортовой АРТС, основанный на методе машинного обучения Случайный лес, реализованные в методологическом, математическом и программном обеспечении проектирования, в практических рекомендациях, разработанные Кикиной Анна Юрьевна при выполнении диссертационной работы позволяют студентам более полно осваивать процессы проектирования систем обеспечения жизнедеятельности.

Председатель комиссии

Члены комиссии





О.В. Тушавина

А.Е. Белявский

Н.С. Кудрявцева

« 5 » сентября 2025 г.