

На правах рукописи



ГОРЬКАВЫЙ МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ОПТИМАЛЬНЫХ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ СРЕДЕ**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Комсомольск-на-Амуре 2026

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный консультант:

Соловьев Вячеслав Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Официальные оппоненты:

Кравченко Олег Александрович, доктор технических наук, профессор, ректор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула;

Шидловский Станислав Викторович, доктор технических наук, профессор, декан факультета инновационных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск;

Зуев Александр Валерьевич, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией аэрокосмических и морских робототехнических комплексов федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток.

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится « 25 » декабря 2026 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 99.2.140.02 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27 и на сайте www.knastu.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 99.2.140.02, канд. техн. наук



Гудим Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Концепция индустрии 5.0, Стратегия научно-технического развития и Нацпроект «Средства производства и автоматизации» РФ акцентируют внимание на научных задачах развития адаптивных киберфизических систем (КФС) для управления высокотехнологичными производственными процессами на базе роботов и искусственного интеллекта. Совокупность модулей автоматизации, расширенных комплексов прогнозирующих имитационных моделей, интеллектуальных систем управления (ИСУ) и мультимодальной сенсорики перспективных роботизированных комплексов направлена на достижение максимального уровня качества конечного результата производства высокотехнологичной продукции авиационной, ракетно-космической, судостроительной и других отраслей промышленности. При этом в рамках производственных процессов промышленных предприятий в технологии производства передовой высокотехнологичной продукции все еще присутствует значительная доля человеческого труда, что не позволяет обеспечить высокую степень точности и повторяемости результатов технологических операций (ТО), снижает производительность и определяет высокую зависимость результатов от мастерства конкретных исполнителей. Полное исключение человеческого фактора из технологических процессов (ТП), особенно при мелкосерийном и штучном производствах, в частности на авиастроительных предприятиях, невозможно, это обусловливается высоким уровнем неопределенности условий исполнения ТО, частой сменой номенклатуры выпуска, постоянными коррекциями технологии и самого продукта.

Для повышения степени автоматизации производства широко применяются коллаборативные роботизированные технологические комплексы (КРТК), включающие в качестве основных элементов: человека (оператора), коллаборативного робота (КР), специализированное оборудование и оснастку, программно-аппаратный комплекс (ПАК) автоматизированной системы управления (АСУ) ТП.

Анализ существующих практик внедрения КР в производство одновременно демонстрирует и положительные эффекты организации коллаборативных роботизированных технологических процессов (КРТП), и подчеркивает значительный объем негативных факторов, не позволяющих раскрыть весь потенциал повышения эффективности ТП. Сложности связаны с обеспечением безопасности работ человека в совместном пространстве с КР, организацией процессов управления КРТК в реальном времени, идентификацией параметров недетерминированной среды, необходимостью решения многокритериальных задач оптимизации, включающих требования по производительности, энергоэффективности, времени отклика систем управления и т.д.

Среди причин недостаточного раскрытия потенциала эффективности внедрения КР следует отметить отсутствие единого теоретического аппарата по проектированию оптимальных КРТП, формализованного описания технологий интеграции КРТК в существующие ТП промышленного предприятия, несовершенство прикладного математического, алгоритмического и информационного обеспечения для АСУ КРТП. В связи с этим устранение научных пробелов и актуализация существующих подходов в области проектирования АСУ КРТП предоставило бы инженерно-техническому персоналу промышленных предприятий опорную базу для проектирования прикладных решений на базе КР, способствующих повышению эффективности производства.

Исследования диссертационной работы направлены на решение фундаментальной научной проблемы – выявление ранее неизвестных параметрических, структурных и функциональных зависимостей, создание методологических и теоретических основ, позволяющих обеспечить полноту комплекса математических моделей и методов синтеза законов управления в АСУ КРТП производства высокотехнологичной продукции с учетом специфики задач промышленных предприятий.

Степень разработанности темы. На современном этапе значительный вклад в развитие научного направления по созданию эффективных систем управления и автоматизации роботизированных ТП (РТП) внесли российские ученые: Ющенко А.С., Афонин В.Л., Шолохов М.А., Ульянов С.В., Кобзев А.А., Дли М.И., Егоров И.Н., Крахмалев О.Н., Дивеев А.И., Прокопьев И.В., Филаретов В.Ф., Серебрянный В.В., Умнов В.П., Кожевников М.М. Результаты исследования авторов получены с учетом специфики РТП, использующих различные методы обработки, формообразования, сборки и контроля качества изделий. В большинстве работ в качестве объектов управления выступают ТП на базе общепромышленных роботов, задачи управления связаны с повышением эффективности исполнения технологических переходов.

Из числа зарубежных авторов следует выделить Fangyi Zhang, Juxi Leitner, Peter Corke, Tobias Kaupp, Bruno Siciliano, Sallam Kouritem, Ishiguro Hiroshi, Oussama Khatib. Авторами разработан ряд фундаментальных научных трудов теоретической и прикладной направленности, изложенные принципы нашли применение при разработке КР различного назначения, являющихся основой КРТК.

Отечественными и зарубежными авторами раскрыты смежные вопросы, необходимые для построения КРТП, в области разработки мультимодальных интерфейсов, систем распознавания, кинематических моделей, моделей человеческого фактора (необходимых для организации человеко-машинного взаимодействия), цифровых двойников (ЦД), моделей оптимизации ресурсов, интеллектуальных алгоритмов управления и т. д.

Предложенные в работе научные решения базируются как на классической теории управления, отраженной в фундаментальных трудах ученых: Понтрягина Л.С., Соколовского Г.Г., Мирошника И.В., Летова А.М., Красовского А.А., Ким Д.П., Кузовкова Н.Т., так и включают методы и алгоритмы интеллектуальных систем управления, предложенных: Поспеловым Д.А., Хорошевским В.Ф., Гавриловой Т.А., Куприяновым М.С., Соловьевым В.А., Дли М.И., Филимоновым А.Б., Черным С.П. Тем не менее научный задел в области теории и методологии проектирования КРТП и их АСУ не достиг уровня, достаточного для обеспечения инженерных кадров необходимым инструментарием для повсеместного внедрения КРТК и повышения эффективности ТП в производстве, что определяет существование научной проблемы недостаточно полной формализации структурно-функциональных связей и режимов ситуационного управления человеко-машинных систем в КРТП. Решение указанной проблемы может значительно повысить эффективность КРТП промышленных производств.

Соответствие шифру специальности. Исследования, представленные в диссертационной работе, соответствуют специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки), следующим ее пунктам: 5. Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами; 4. Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами; 8. Научные основы, модели и методы

идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников; 3. Методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т.д.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение эффективности функционирования автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами промышленных предприятий путем разработки и применения моделей и методов оптимального управления в условиях недетерминированной среды.

Достижение указанной цели предусматривает решение следующих задач:

1) Исследование состояния проблем, особенностей структуры и функциональности роботизированных технологических процессов, интегрированных в систему производства высокотехнологичной продукции.

2) Разработка системного подхода по проектированию инфраструктуры организации и модулей комплексной автоматизации коллаборативных роботизированных технологических процессов.

3) Разработка математической модели коллаборативного роботизированного технологического процесса, учитывающей технологические особенности функционирования коллаборативного робота и человека в совместной рабочей зоне при различных сценариях недетерминированной среды и типах технологических операций.

4) Разработка метода снижения размерности задач оптимизации автоматизированной системы управления коллаборативным роботизированным технологическим процессом.

5) Разработка метода и модели проектирования и многокритериального оптимального управления коллаборативным роботизированным технологическим процессом, основанных на ситуативной оценке киберфизической системы, позволяющих повысить производительность, энергоэффективность и степень безопасности коллаборативного роботизированного технологического процесса.

6) Разработка метода создания математического и программного обеспечения модулей функциональных автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами для эффективного управления исполнительными механизмами в реальном времени на основе программного управления.

7) Разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами для оптимизации режимов управления движением коллаборативным роботом в недетерминированной среде.

8) Апробация исполнения технологических операций в соответствии с предложенными научными результатами для решения прикладных задач управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами промышленного производства с соблюдением технологических режимов и требований безопасности.

Объект исследования – коллаборативные роботизированные технологические процессы промышленных производств.

Предмет исследования – модели, методы и алгоритмы повышения эффективности систем управления коллаборативными роботизированными процессами промышленных производств.

Методология и методы исследования. Научные исследования выполнены с использованием математического аппарата современной теории автоматического управления, теории нечетких множеств, искусственных нейронных сетей, теории электропривода, общей робототехники, общих принципов математического моделирования, системного подхода, теории инженерии знаний и теории алгоритмов. Проектирование программных модулей и имитационных моделей выполнялось на базе объектно-ориентированного подхода, методологии структурного анализа и проектирования, нотаций языков системного моделирования SySML и UML с программной реализацией на высокоуровневых языках MATLAB, C++, KUKA Sunrise.OS 1.16 в операционной системе PP ROS2.

Научная новизна предлагаемых решений заключается в следующем:

1) развиты теоретические основы и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами роботизированной обработки изделий в коллаборативной среде, отличающиеся наличием детализированных интеграционных взаимосвязей между подсистемами социок cyberфизической системы, способствующих возникновению синергетических эффектов функционирования систем в роботизированных процессах;

2) предложены метод и средства моделирования, формализованного описания и проектирования структуры и функциональности компонентов коллаборативных роботизированных технологических процессов, обеспечивающих гибкость структуры, модульность и интерпретируемость параметров;

3) разработана математическая модель коллаборативного роботизированного технологического процесса как объекта управления, учитывающая технологические особенности функционирования коллаборативного робота и человека в совместном пространстве при различных сценариях недетерминированной среды и типах технологических операций;

4) предложены теоретические основы и метод снижения размерности задач оптимального управления коллаборативным роботизированным технологическим процессом за счет введения ограничений операционного пространства и конфигурационного пространства коллаборативного робота, обеспечивающих эффективные для текущей технологической операции пространственные расположения центральной точки инструмента коллаборативного робота;

5) предложены и доказана эффективность метода и моделей многокритериального оптимального управления коллаборативным роботизированным технологическим процессом, основанные на ситуативной оценке cyberфизической системы, оптимизирующие режимы управления на основе критериев максимизации производительности, энергоэффективности и степени безопасности, а также по интегральному критерию оптимизации;

6) представлен метод создания математического и программного обеспечения модулей функциональных автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами для эффективного управления исполнительными механизмами в реальном времени на основе метода программного управления.

Достоверность результатов диссертации подтверждается использованием общепринятых и апробированных методик структурного и параметрического синтеза АСУ, экспериментальными исследованиями КРТП, проведенными в производственных и в лабораторных условиях на промышленном оборудовании.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 1-я международная науч-

но-практическая конференция «Современные технологии промышленной автоматизации» (MIAT), г. Владимир, 19–21 ноября 2025 г.; Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» «ICIEAM-2025», г. Сочи, 12–16 мая 2025 г.; Международная научно-практическая конференция «Индустрия 4.0» «SmartIndustryConRus-2025», г. Сочи, 24–29 марта 2025 г.; 15-я международная конференция «Интеллектуальные системы 2022» (INTELS`2022), г. Москва, 14–16 декабря 2022 г.; 16-я международная конференция «Интеллектуальные системы 2024» (INTELS`2024), Москва, Россия, 2–4 декабря 2024 года.; 4-я Международная научная конференция «MIST: Аэрокосмическая промышленность-IV 2021: Передовые Технологии в аэрокосмической промышленности, машиностроении и автоматизации», (MIST: Aerospace-IV 2021), г. Красноярск, 10–11 декабря 2021 г.; Международная научно-практическая конференция «Индустрия 4.0» «SmartIndustryConRus-2024», г. Сочи, 25–29 марта 2024 г.; Международная научно-техническая конференция «Автоматизация» (RusAutoCon-2024) г. Сочи, 08–14 сентября 2024 г.; Международная научно-техническая конференция «Автоматизация» (RusAutoCon-2023) г. Сочи, 10–16 сентября 2023 г.; Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» «ICIEAM-2023», г. Сочи, 15–19 мая 2023 г.; 10-я онлайн-конференция по информатике 2021 «Информатика и кибернетика в интеллектуальных системах» (CSOC 2021), г. Злин, Чешская республика, 21 апреля – 02 мая 2021 г.; Международная научно-техническая конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2020», г. Владивосток, остров Русский, 6–9 октября 2020 г.; Международная научно-техническая конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2019», г. Владивосток, остров Русский, 1–4 октября 2019 г.; Международная научно-техническая конференция «Восток-Запад» ("EastConf"), г. Владивосток, 1–2 марта 2019 г.; Международная научно-техническая конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2018», г. Владивосток, остров Русский, 3–4 октября 2018 г.; Международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 5–6 сентября 2018 г.; 8-я международная научно-техническая конференция «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования», г. Вологда, 27 марта 2018 г.; 2-я международная научная конференция «Передовые инновационные разработки. перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство», г. Казань, 30 марта 2019 г.; 18-я международная научно-практическая конференция «EURASIASCIENCE», г. Казань, 16–26 февраля 2021 г.; 5-я международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 6–11 декабря 2021 г.; 6-я международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 5–11 декабря 2022 г.; 4-я Всероссийская научно-практическая конференция «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 7–8 октября 2025 г.; Международная конференция «Современные проблемы и пути развития промышленности: оборудование и технологии», г. Варшава, 1 января – 30 января 2021 г.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что на основе сформулированного единого теоретического подхода управления решена задача

существенного повышения эффективности (производительности, энергоэффективности и безопасности) коллаборативных роботизированных технологических процессов, функционирующих в условиях нестационарности параметрических, структурных и функциональных зависимостей, вызванных недетерминированной средой совместного пространства коллаборативного робота и оператора.

Практическая значимость и реализация результатов работы. С использованием созданных моделей и методов могут быть построены автоматизированные системы управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами, синтезирующие и реализующие оптимальные законы управления движением коллаборативного робота с учетом специфики технологической операции, выполняемой в условиях недетерминированной среды. Универсальность и высокая эффективность разработанных моделей и методов позволяет использовать их в интегрированных системах управления технологическими процессами для широкого класса задач роботизированного производства.

Результаты, полученные в ходе проведения диссертационного исследования, использованы в: Филиале ПАО «ОАК» - КнААЗ им. Ю.А. Гагарина при модернизации АСУТП камеры роботизированного окрашивания; ПАО «АСЗ» при проектировании технологических процессов; в учебном процессе ФГБОУ ВО «КнАГУ»; а также при выполнении научных исследований в рамках нескольких госбюджетных тем и грантов: 1. Грант РНФ, № 25-21-00292, 2025–2026 гг., «Разработка интеллектуальных алгоритмов для построения коллаборативных роботизированных систем управления, функционирующих в недетерминированной среде». 2. Грант РНФ, № 22-71-10093, 2022–2024 гг., «Разработка и синтез перспективных мультимодальных адаптивных алгоритмов и методов управления поведением коллаборативных робототехнических систем с учетом нештатных ситуаций и экстремальных условий в недетерминированной среде». 3. Государственное задание на 2024-2026 гг. (0750110472 S724600) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, в целях выполнения НИР по созданию молодежных лабораторий в рамках федерального проекта «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок» национального проекта «Наука и университеты». 4. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы ФГБОУ ВО «КнАГУ» «Разработка методов повышения энергетической эффективности роботизированных технологических процессов», ВН002/2020, сроки 2020–2022 гг. 5. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы ФГБОУ ВО «КнАГУ» «Разработка технологии роботизированной лазерной сварки тонкостенных конструкций авиационного назначения из листового металла», сроки 2019–2020 гг., приказ №264-О от 01.07.2019.

Положения, выносимые на защиту

1) Научные основы и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами роботизированной обработки изделий в коллаборативной среде, расширяющие функциональные возможности человеко-машинного взаимодействия современного производства.

2) Теоретические основы формализованного описания, моделирования, управления и метод проектирования оптимальных коллаборативных роботизированных технологических процессов, специфицирующие теорию ситуационного управления в контексте роботизированного производства.

3) Математическая модель коллаборативного роботизированного технологического процесса как объекта управления, полученная на основе выявленных в ходе

экспериментальных исследований технологических особенностях функционирования КР и человека в совместной рабочей зоне.

4) Теоретические основы и метод снижения размерности задач оптимального управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами за счет введения ограничений операционного и конфигурационного пространств коллаборативного робота, обеспечивающих эффективные для текущей технологической операции пространственные расположения центральной точки инструмента.

5) Модели и методы проектирования и многокритериального оптимального управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами, обеспечивающие повышение ритма выпуска продукции и снижение энергозатрат производства.

6) Алгоритм и технология создания математического и программного обеспечения модулей функциональных автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами для эффективного управления исполнительными механизмами в реальном времени на основе метода программного управления.

7) Алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами, обеспечивающее оптимизацию режимов управления движением коллаборативного робота в недетерминированной среде с целью исполнения технологических и вспомогательных переходов по результатам идентификации параметров совместного рабочего пространства.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 83 научные работы, в том числе 1 монография, 1 патент на изобретение, 14 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ, 27 статей в журналах, входящих в список ВАК по профильной научной специальности; 29 статей Scopus и/или Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения и списка используемой литературы (374 источника); изложена на 406 страницах текста, содержит 202 рисунка, 60 таблиц и 15 приложений.

Благодарность. Автор выражает глубокую признательность научному консультанту профессору Соловьеву Вячеславу Алексеевичу за активную поддержку, которая завершилась появлением настоящей диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность и проблематика работы, описаны цели и задачи, а также дана характеристика исследований по созданию эффективных систем управления и автоматизации КРТП. Показана теоретическая и практическая значимости диссертационного исследования, указаны объект и предмет исследований в выбранной предметной области.

В первой главе проведен обзор исследований и анализ перспектив развития АСУ ТП на базе роботов. Представлен анализ научных публикаций в области проектирования компонентов АСУ КРТП. Основной упор делается на применение КР как основного оборудования ТП. Представлены технические задачи, в которых целесообразно применение КР совместно с человеком. В качестве объекта управления выбраны КРТП производств промышленных предприятий.

Показано, что несмотря на имеющийся комплекс научных и практических решений в области построения КРТП, имеется значительный объем научных проблем,

без решения которых не представляется возможным обеспечить достижение максимальной эффективности человеко-машинного взаимодействия и организации синергетических систем (СНС) в рамках существующих практик внедрения КРТП. Отсутствует в полной мере формализованное описание параметрических, структурных и функциональных зависимостей, методологические и теоретические основы проектирования оптимальных КРТП, позволяющие обеспечить полноту комплекса математических моделей и методов синтеза законов управления в АСУ КРТП производства высокотехнологичной продукции с учетом специфики задач промышленных предприятий.

Обобщена информация о состоянии и тенденциях развития КРТП. Показано, что научные исследования в области разработки новых моделей, методов и средств управления компонентами КРТП представляются перспективными и могут значительно повысить степень автоматизации ТП высокотехнологичных производств.

Вторая глава посвящена разработке теоретических основ формализованного описания и проектирования оптимальных КРТП. Представленные в главе решения нацелены на формирование синергетического эффекта внутри производственных систем за счет оптимизации человеко-машинного взаимодействия.

С помощью системного анализа проведена декомпозиция ТО КРТП, выделены два класса частей ТО: 1) жестко ограниченные части ТО (НРП), включающие технологический переход (ТПд), рабочий ход (РХ) и в отдельных случаях вспомогательный ход (ВХ); 2) мягко ограниченные части ТО (SRP), включающие ВП (вспомогательный переход) и ВХ. Для представленных классов частей ТО процедура синтеза задач оптимизации существенно разнится, но для экземпляров внутри классов характерен большой потенциал обобщения. Такая декомпозиция может существенно упростить процедуру автоматического синтеза функционала качества при ситуационном управлении.

С учетом декомпозиции ТО для КР и определенной структуре требований к классам частей ТО была разработана система требований к КРТП и его АСУ. В частности, на рис. 1 отображен фрагмент верхнего уровня системы требований. В ходе идентификации взаимосвязей системы и формирования соответствующих требований были выявлены противоречия внутри АСУ существующих ТП из-за возникновения конфликта достижения интегральных показателей «Безопасность», «Производительность» и «Энергоэффективность». Противоречия могут быть устранены или частично скомпенсированы введением синтетических требований, выполнение которых будет способствовать повышению эффективности функционирования КРТП и возникновению синергетического эффекта. В качестве основного выделяется требование наличия иерархической структуры для автоматического синтеза функционала качества и выбора актуального механизма планирования и оптимизации движения КР. Тогда оптимизированное движение по исполнению конкретной части ТО в текущей ситуации достигается за счет автоматического формирования закона управления системой электроприводов КР на основе уставок определенного технологического режима и заданного функционала качества. Автоматический синтез функционала качества будет доступен, если имеется возможность ситуативной постановки задачи оптимизации, включая снижение ее размерности, обеспеченной библиотекой моделей всех уровней КРТП. При этом объективные требования по минимизации отклика АСУ КРТП достижимы за счет расширения и адаптации алгоритмов оперативного управления КР для условий недетерминированной среды человеко-машинного взаимодействия.

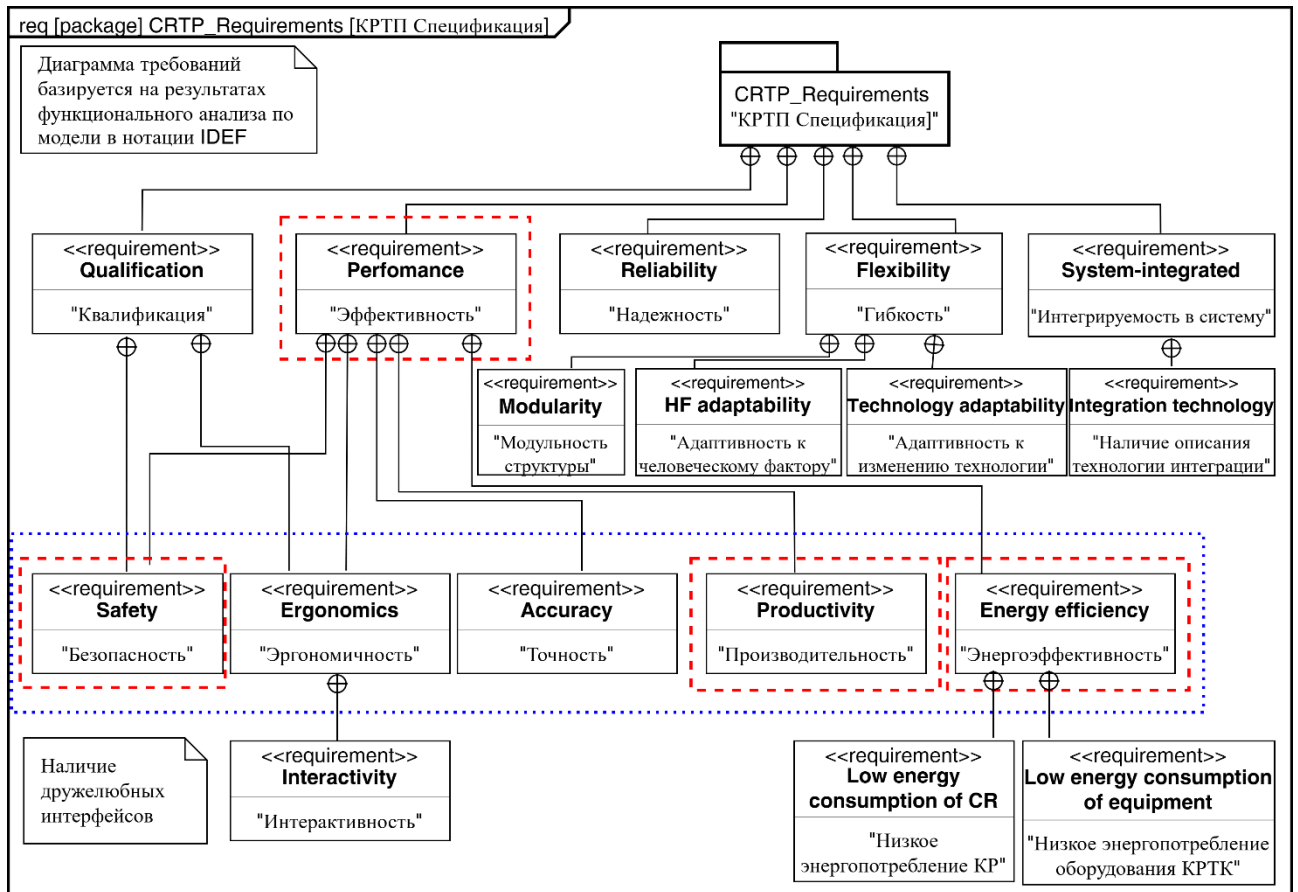


Рисунок 1 – Диаграмма требования спецификации ИСУ КРТП (первый фрагмент)

Для выполнения представленных требований был описан подход и предложена оригинальная функциональная модель (структура 1-го уровня модели представлена на рис. 2), отражающая ключевые процессы, информационные связи и материальные потоки организационно-технической системы, способствующие построению КРТП в формате СНС под управлением ИСУ на базе ЦД. Модель идентифицирует взаимосвязи и взаимовлияния иерархически упорядоченных и горизонтально связанных компонентов производственной системы, существенным образом влияющих на возможность достижения эффекта при организации систем человеко-машинного взаимодействия.

Идентификация КРТП и уставки по требуемому функционалу определили разработанный подход к синтезу ИСУ КРТП (рис. 3), учитывающих недетерминированную среду человеко-машинного взаимодействия.

Математическое описание ИСУ представлено системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B_{u_1} \cdot u(t) + B_{u_2} \cdot u_{\text{опер}}(t) + B_{M_1} \cdot f_{\text{опер}}(t) + B_{M_2} \cdot f_{\text{внеш}}(t); \\ y_{\text{КР}}(t) = C_{\text{ИЗУ}} \cdot x(t); \\ y_{\text{опер}}(t) = C_{\text{ОЦУ}} \cdot S(t) + \eta(t), \end{cases} \quad (1)$$

где A – функциональная матрица состояния объекта (силовой части); B_{u_1} , B_{u_2} – матрицы управления; $x(t) = [x_1(t), x_2(t) \dots x_7(t)]^T$, $x_i(t) = [\varphi_i, \omega_i, I_i, e_i, \dots]^T$ – переменные состояния КР; B_{M_1} , B_{M_2} – матрицы возмущения; $u(t) = [u_1(t), u_2(t) \dots u_7(t)]^T$ – закон управления в виде информационного управляющего сигнала; $u_{\text{опер}}(t) = [u_{\text{опер}_1}(t), u_{\text{опер}_2}(t) \dots u_{\text{опер}_7}(t)]^T$ – закон управления, со-

здающий крутящий момент $\tau_{\text{опер}}$ оператором в ходе реализации силомоментного управления; $f_{\text{опер}}(t) = [f_{\text{опер}_1}(t), f_{\text{опер}_2}(t) \dots f_{\text{опер}_7}(t)]^T$ – незапланированное, случайное силовое воздействие на звенья КР, оказываемое оператором; $f_{\text{внеш}}(t) = [f_{\text{внеш}_1}(t), f_{\text{внеш}_2}(t) \dots f_{\text{внеш}_7}(t)]^T$ – незапланированное, случайное силовое воздействие на звенья КР, вызванное как активными (движущимися) объектами рабочей зоны, так и в результате столкновения КП с пассивными объектами; $y_{\text{КР}}(t)$ и $y_{\text{опер}}(t)$ – векторы измерений и оценивания значимых переменных состояния КР и переменных, отражающих расположение (геометрическое) ключевых точек КР в пространстве, соответственно; $C_{\text{ИЗУ}}$, $C_{\text{ОЦУ}}$ – матрицы измерения и оценивания соответственно; $S(t)$, – множество всех точек оболочки КР в пространстве в момент времени t ; $\eta(t)$ – вектор погрешности оценивания.

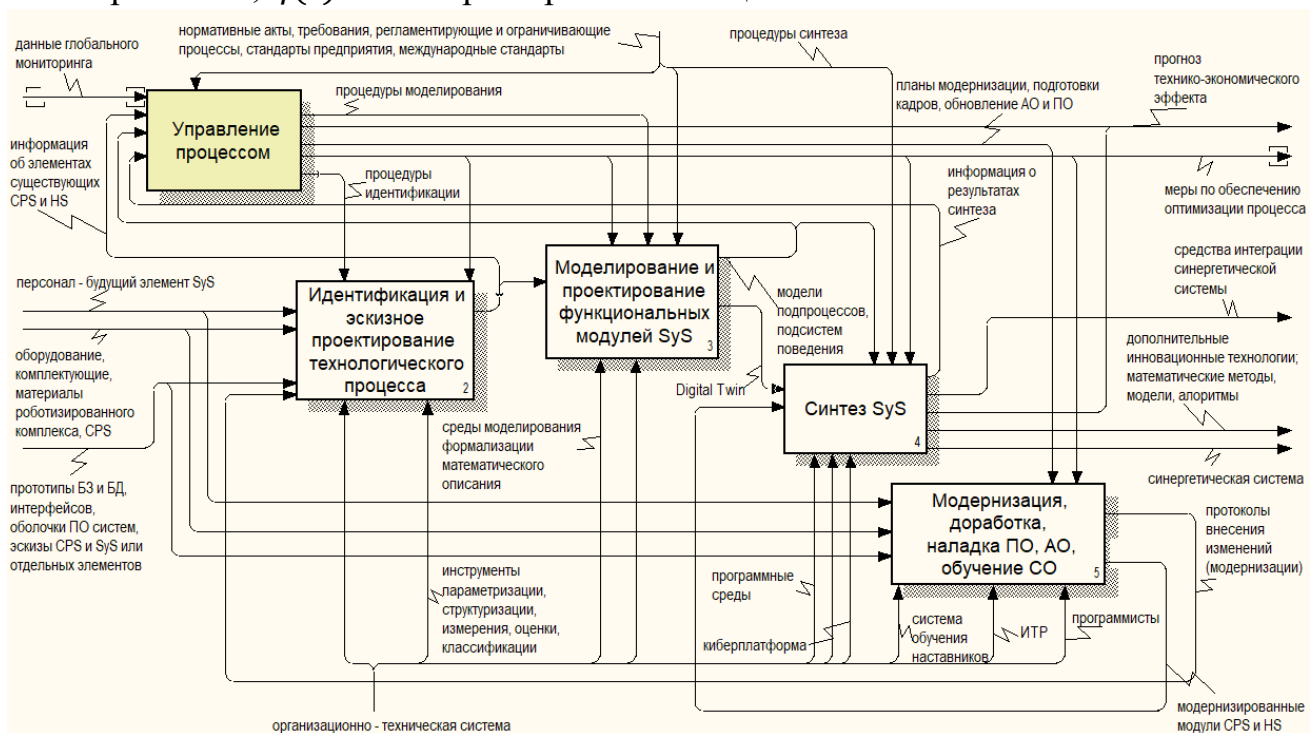


Рисунок 2 – Уровень А0 функциональной модели синтеза СНС

Отличительной особенностью схемы является введение дополнительных элементов структур (модуля идентификации и детектирования (МИД), интеллектуального модуля (ИМ) и системы воздействия на оператора (СВ)) и информационно-управляющих каналов 11 - 16. При формировании закона управления ИСУ опирается на оптимизационные механизмы интеллектуального модуля (ИМ), который осуществляет динамический синтез системы критериев эффективности ИСУ КРТП на основе выбранного прототипа из библиотеки моделей (БМ) и данных с МИД (изменения внешней среды), прогнозирует изменения состояния локальной системы управления (ЛСУ) КР и оператора, корректирует БМ и осуществляет синтез новых моделей, управляет модулем МИД, формирует предписания и сценарии для системы воздействия на оператора.

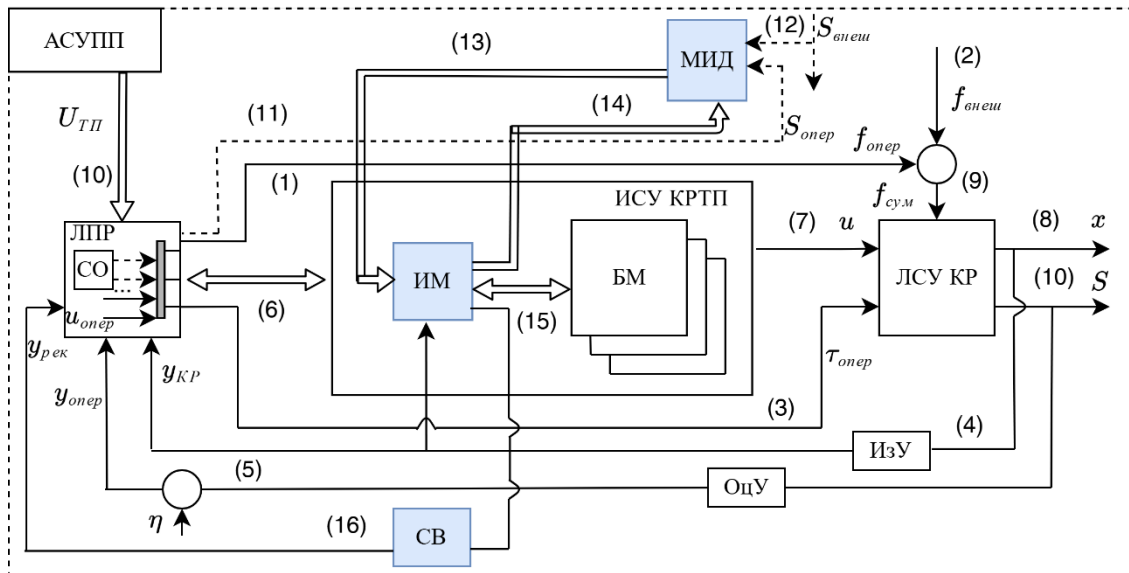


Рисунок 3 – Структурно-функциональная схема ИСУ КРТП в АСУПП:

ЛПР – лицо, принимающее решение; ИзУ – система измерительных устройств;

ОцУ – система оценки; $U_{ТП}$ – массив задания

Модуль идентификации и детектирования осуществляет сбор данных видео- и звукового потока, распознавание и прогнозирование смещения ключевых точек объектов в рабочей зоне, в том числе для моделирования сценариев изменения их геометрических параметров. Система воздействия осуществляет влияние на оператора ($y_{рек}$).

Благодаря внедрению ИСУ с внешней сенсорикой становятся доступны для сбора и анализа информации два канала – 11 и 12, определяющие геометрию физических объектов коллизий (оператора $S_{опер}$ и недетерминированных объектов $S_{внеш}$), которые вызывают или могут в будущем создавать возмущающие воздействия ($f_{сум}$). Модуль идентификации и детектирования предоставляет в ИМ массивы ключевых точек объектов, а также прогноз вектора их смещения, тем самым позволяя ИМ с учетом знаний модели поведения ЛСУ КР и текущего состояния КР оперативно корректировать модель поведения либо осуществлять переключение моделей. Следовательно, в системе реализуется управление по прогнозу или в гибридном режиме: комбинация серий управляющих воздействий по ошибке и по прогнозу (в случае невозможности разрешения коллизий).

Кроме того, благодаря доступности канала 11 одновременно с архивом шаблонов действий оператора в ИМ представляется возможным выявлять аномалии в поведении оператора. Таким образом, за счет взаимодействия МИД–ИМ–СВ может быть устранено либо существенно снижено влияние ($f_{опер}$) путем устранения самого генератора возмущений по каналу 12, либо путем оперативной коррекции модели в ИСУ КРТП и формированием нового закона управления (канал 7), корректирующего состояние КР еще до момента сработки его штатной автоматической системы обеспечения безопасности. Помимо решения задач разрешения коллизий ИМ учитывает критерии эффективности функционирования ЛСУ КР, установленные в соответствующей модели в БМ, в том числе в рамках моделей повышения энергоэффективности и минимизации времени исполнения ТО.

Для реализации ИСУ КРТП разработана структурная схема актуального КРТК, направленная на повышение производительности ТП за счет более эффективного человеко-машинного взаимодействия. Вариативность моделей, режимов, систем критериев и алгоритмов упрощает задачи оптимизации при планировании движений, что сокращает время реакции системы на прогнозируемое или существующее возмущающее воздействие

В третьей главе на основе предложенных концепций, принципов и подходов идентификации ТП представлено математическое обеспечение ИСУ (АСУ) КРТП в виде комплекса оригинальных математических моделей для трех уровней управления: управления ТП, управления планированием и исполнением ТО и управления локальной системой (СУЭП КР). Комплекс моделей объединен в многоуровневую математическую модель КРТП, учитывающую технологические особенности функционирования КР и человека в совместной рабочей зоне при различных сценариях недетерминированной среды, типах ТО и режимах управления.

Основным предназначением комплекса моделей, помимо функциональности по идентификации и формализации КРТП, является формирование базы для функционирования разработанных и предложенных в последующих главах методов, алгоритмов и элементов ПО, а также проведения численных экспериментов, в том числе по апробации алгоритмических и программных решений для планирования и оптимизации движений КР в КРТП механообработки, позиционирования, окрашивания и ряда других процессов.

Дискретно-событийная модель (ДСМ) выполняет роль интеграционной платформы для всех остальных моделей и программных модулей ПО КРТК, обладает широкой функциональностью, предоставляет интерфейсы ввода/вывода по всему комплексу элементов ПО. Среди прочего модель обеспечивает техническое управление режимами работы планировщика движений, решающего поставленные задачи оптимизации.

Автоматизированная система управления производственным процессом предоставляет план ТП в виде набора задач

$$TPP = \{T_1, T_2, T_i, \dots, T_n\} \equiv \{T_i\}_{i=1}^n. \quad (2)$$

В контуре управления задачами каждой задаче (T_i) из множества TPP ставится в соответствие единственная ТО (TO_j) из множества $TO = \{TO_1, TO_2, \dots, TO_m\}$:

$$\varphi(T_i) = TO_j, \quad T_i \in TPP, \quad TO_j \in TO, \quad (3)$$

где φ – отображение, ставящее в соответствие каждой задаче технологическую операцию. Формализация становится возможной благодаря совместной функциональности оператора и инструментов интеллектуальной поддержки, выполняющих технический анализ сопровождающей документации и общих критериев эффективности, заданных по ТП.

Далее каждая задача T_i из множества TPP разбивается на упорядоченный набор подзадач:

$$T_i = \{ST_{i1}, ST_{i2}, \dots, ST_{ik}\}, k \geq 1, \quad (4)$$

где $T = \{ST_1, ST_2, \dots, ST_k\}$ – множество подзадач, т.е. представляется как упорядоченная последовательность:

$$T_i = (ST_{i1}) \rightarrow (ST_{i2}) \rightarrow \dots \rightarrow (ST_{ik}) \quad (5)$$

и отправляется во второй контур управления, в котором каждой подзадаче ST_{ij} с учетом знаний формализации соответствующей ТО ставится в соответствие часть ТО (P_q^{TO}) из ограниченного множества $P^{TO} = \{P_1^{TO}, P_2^{TO}, \dots, P_l^{TO}\}$, где каждый элемент может быть либо ВП (P_{add}^{TO}), либо частью ТПд – ВХ (P_{am}^{TO}) или – РХ (P_{wm}^{TO}):

$$\psi(ST_{ij}) = P_q^{TO}, ST_{ij} \in ST, \quad P_q^{TO} \in P^{TO}, \quad (6)$$

где ψ – отображение, определяющее соответствие между подзадачей и частью ТО. При этом каждой подзадаче ST_{ij} соответствует ровно одна часть ТО (P_q^{TO}):

$$\forall ST_{ij} \in ST \quad \exists! P_q^{TO} \in P^{TO} \mid \psi(ST_{ij}) = P_q^{TO}. \quad (7)$$

Для каждой части ТО в соответствии с выбранными установками планирования устанавливается вектор параметров:

$$p_{ij} = (p_{ij}^{(1)}, p_{ij}^{(2)}, \dots, p_{ij}^{(L)}), \quad (8)$$

где: p_{ij}^k – значение k -го параметра части ТО (P_q^{TO}); L – количество параметров для части ТО, реализующей подзадачу.

Вектор параметров, инициализирующий программные функции планировщика, определяет возможность формирования итогового закона управления в виде $\varphi_z(t)$ для СУЭП КР в детерминированной и недетерминированной средах. При этом вектор содержит исчерпывающую информация для математического описания оптимального движения.

Предложенная ДСМ обеспечивает доступ к имеющимся знаниям и прогнозирует события при функционировании алгоритмов ИСУ КРТП в задачах планирования и оптимизации движений КР в совместной с оператором рабочей зоне. Среди наиболее значимых реализованных функций ДСМ необходимо выделить возможности: тестирования общих алгоритмов и режимов управления, планирования и оптимизации; расчета и прогнозирования технических, технологических технико-экономических эффектов; формирования обучающих выборок для систем, основанных на знаниях, в частности RL-агентов и другие.

Для формирования законов управления КР в рамках ТО согласно критериям эффективности и ограничений задач оптимизации в модели принята система значимых переменных и показателей, по которым можно судить об эффективности организации КРТП. Среди общего объема показателей следует отметить следующие:

1) доля отмененных частей ТО в общем объеме запланированных ТО в единицу времени (за смену): $\alpha_{del}^N = \frac{N_{del}^{PTO}}{N_{total}^{PTO}} \cdot \frac{1}{t}$;

2) доля выполненных частей ТО в общем объеме запланированных ТО в единицу времени (за смену): $\alpha_{done}^N = \frac{N_{done}^{PTO}}{N_{total}^{PTO}} \cdot \frac{1}{t}$;

3) доля выполненных ТО (задач) без перепланирования к общему объему запланированных ТО в единицу времени: $\beta_{done}^N = \frac{N_+^{TO}}{N^{TO}} \cdot \frac{1}{t}$;

4) отношение времени, затрачиваемого на планирование движений в контуре управления движением, к общему времени, сопряженному с планированием и исполнением ТО: $\varepsilon t^{ws} = \frac{(\bar{T}_{main}^{TO} + \bar{T}_{add.MC}^{TO}) \cdot N_{total}^{PTO}}{\bar{T}_c^{TO} \cdot N^{TO}}$,

5) производительность КРТК: $P_{unit} = \frac{N_{unit}}{t} = \frac{Prob}{\frac{1}{P_{PTO}} \cdot \bar{N}_{unit}^{PTO}} = \frac{Prob}{\bar{t}_{PTO} \cdot \bar{N}_{unit}^{PTO}}$, где N_{unit}

– количество изделий, произведенных за рассматриваемый интервал времени (смену); $Prob$ – вероятность успешного выполнения движения, реализующего одну часть ТО; P_{PTO} – производительность КРТК в единицах движения, реализующих части ТО; $\bar{N}_{unit}^{PTO}$ – среднее количество частей ТО в одной ТО; $\bar{t}_{PTO}$ – время, требуемое для планирования и исполнения одного движения;

6) отношение суммы потребленной энергии КРТК во вспомогательное и в основное время к общей потребленной энергии за смену: $\varepsilon^{ws} = \frac{E_{dmt}^{ws} + E_{aut}^{ws}}{E_{total}^{ws}}$.

Общая потребленная энергия рассчитывается имитационными моделями реального времени, либо через усредненные значения среднего времени ожидания серверов ДСМ и значений средней мощности КР в режиме ожидания и режиме функционирования согласно формуле:

$$E_{total}^{ws} = \bar{T}_{task}^{TO} \cdot \bar{P}_{standby} + (\bar{T}_{main}^{TO} + \bar{T}_{add_MC}^{TO}) \cdot (\bar{P}_{mov} - \bar{P}_{standby}) \quad (9)$$

Модели уровня планирования ТО и управления движением (СУЭП КР), интегрируемые в ДСМ, были разработаны на примере коллаборативного робота KUKA LBR iiwa 7 R800 с учетом его паспортных характеристик.

Модели уровня управления движениям КР в работе представлены в виде линейаризованной модели для реализации режимов управления, требующих минимального отклика АСУ, детализированной нелинейной модели для исследования алгоритмов управления и оптимизации, а также редуцированных моделей, синтезированных на основе математического аппарата нейронных сетей и необходимых для идентификации объекта моделирования в условиях неопределенности структуры и параметров.

Динамика в линейаризованной модели КР в работе представлена виде уравнения Эйлера-Лагранжа:

$$M(q)\ddot{q} = -C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) - J^T(q)F_{EXT} + \tau, \quad (10)$$

где $q(t) \in R^n$, $\dot{q}(t) \in R^n$, $\ddot{q}(t) \in R^n$ – векторы обобщенных координат, скоростей и ускорений; $M(q)$ – $[n \times n]$ – матрица инерции; $C(q, \dot{q})\dot{q}$ – $[n \times 1]$ – вектор кориолисовых и центробежных сил; $G(q)$ – $[n \times 1]$ – вектор гравитационных моментов и сил; τ – $[n \times 1]$ – вектор обобщенных сил и моментов; $J^T(q)$ – транспонированная Якобиева матрица, связывающая пространственные силы и моменты внешних воздействий с внутренними усилиями звеньев; F_{EXT} – матрица внешних сил, приложенных к механизму.

В форме записи вход-состояние-выход описание (10) может быть представлено как:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = f(x) + g(x) \cdot u, \quad (11)$$

где $x = [x_1, x_2]^T = [q, \dot{q}]^T$; $f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -M^{-1}(x_1)[c(x_1, x_2 + g(x_1))] \end{bmatrix}$,

$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(x_1) \end{bmatrix}$; u – вектор управления.

Соответствующая структурная схема, используемая для имитационного моделирования КР с 7-ю степенями свободы представлена на рис. 4.

Уравнение объекта тогда представляется в виде:

$$\dot{x} = f(x, u, t). \quad (12)$$

В данном случае вектор состояния (x) включает в себя переменные механической и электрической частей: $x = (\varphi, \omega, \varepsilon, \tau, I \dots)$, где φ – угол положения; ω – угловая скорость; ε – угловое ускорение; τ – момент; I – сила тока. Модель обеспечивает расчет мощности и энергопотребления по каждой СУЭП, что используется алгоритмами оптимизации при планировании движений.

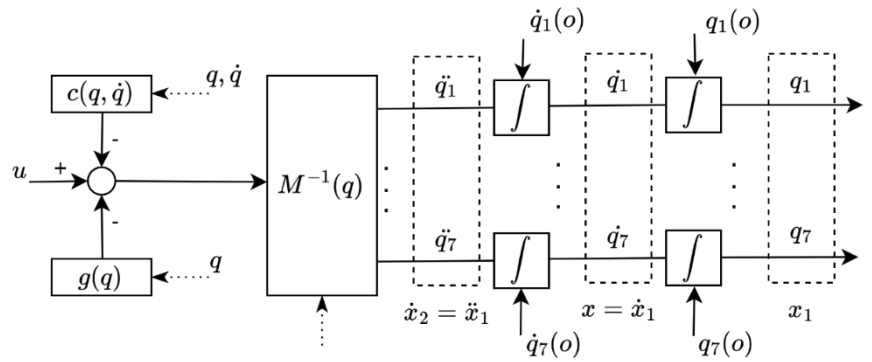


Рисунок 4 – структурная схема КР с 7-ю степенями свободы

Детализированная нелинейная имитационная модель СУЭП КР разработана в ПО MATLAB (Simcape)/C++. Верхний уровень АСУ включает подсистему формирования задающего воздействия, взаимосвязанные СУЭП КР на базе математического описания двигателя постоянного тока и модели механизмов на базе кинематической модели КР. Визуализация движения КР в модели осуществляется как встроенными средствами пакета Simscape Multibody, так и в симуляторе Webots, поддерживающем коммуникацию посредством операционной системы ROS2. Управление электроприводами КР осуществляется ПИД регулированием, усилитель реализован на базе ШИМ, электродвигатель – в виде эквивалентной схемы. Предусмотрено моделирование автономного источника питания (предоставляет возможность исследования автономных мобильных КР). Модель СУЭП звена КР содержит нелинейность в виде трения вращения, модель редуктора выполнена в виде идеальной непланетарной передачи с фиксированным передаточным отношением (K_{red}).

Детализированная модель за счет расчета энергопотребления, мощности, момента, скорости, тока, угловых переменных и др. позволяет исследовать и уточнить элементы механизмов планирования движений при выполнении частей ТО, в частности: 1) способы планирования движений; 2) способы и уставки решения обратной задачи кинематики (ОЗК); 3) шаблоны движений; 4) алгоритмы интерполяции и их уставки; 5) системы критериев оптимизации; 6) алгоритмы оптимизации движений; 7) алгоритмы разрешения коллизий их уставки; 8) алгоритмы функционирования аварийных режимов и др.

При решении задачи оптимизации – минимизации энергетических затрат КРТП не всегда представляется возможным получить математическое описание СУЭП КР, это может быть связано, например, с использованием в ТП оборудования иностранного производства, которое не снабжается подробными схемами СУЭП. Для решения задачи идентификации параметров СУЭП КР и синтеза аппроксимирующих модулей в детализированной модели предлагается использовать системы внешней сенсорики, а параметрический синтез модели реализовать с помощью математического аппарата нейронных сетей. Преимуществом такого решения является высокая скорость синтеза имитационной модели энергопотребления КР в условиях частичной нехватки или полного отсутствия данных о технических характеристиках КР.

Структура нейросетевой имитационной модели (НИМ) энергопотребления СУЭП шарнира ПР представлена на рисунке 5. Модель включает два нейросетевых модуля имитирующих функциональные зависимости $\omega(t)$ и $P(t)$. Нейросетевая модель обеспечивает прогноз суммарного значения энергопотребления на реализацию движения и может быть использована в КРТК, для КР которого не представляется возможным получить полное математическое описание.

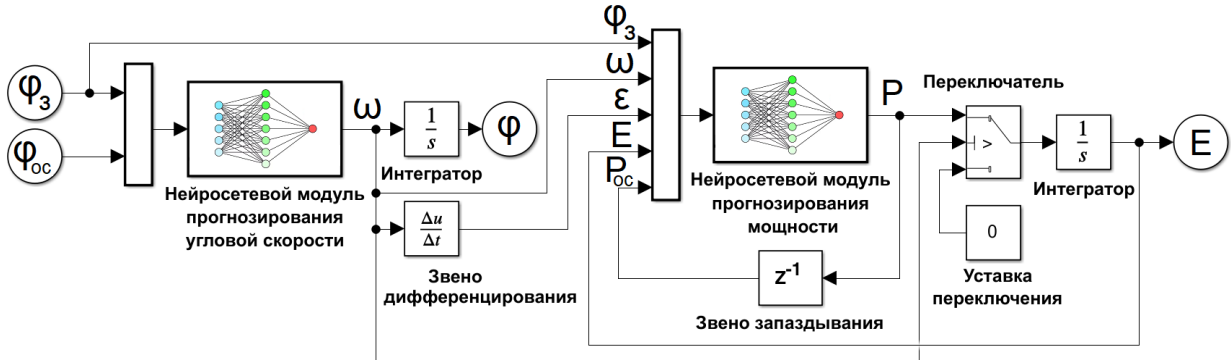


Рисунок 5 – Структура нейросетевой имитационной модели

Для управления КРТП на уровне планирования частей ТО предлагается оригинальная дискретная модель АСУ ТО, координируемая управляющими командами из ДСМ и агрегирующая модели СУЭП. Управляемыми или наблюдаемыми объектами КРТП в модели являются: КР (основной робот), позиционер; модель оператора; модель изделия; набор моделей инструмента и станции автоматической смены инструмента. Каждому объекту поставлено в соответствие характеристика состояния, включающая вложенные состояния (рис. 6).

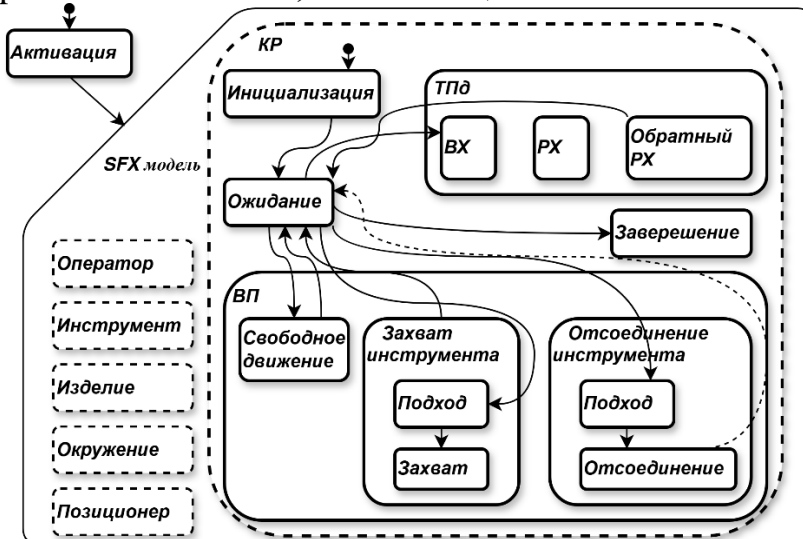


Рисунок 6 – Модель АСУ ТО

Объекты модели АСУ ТО, которые в совокупности с набором данных и алгоритмов формируют основу базы знаний (БЗ), формализованы в виде машин конечных автоматов, в виде диаграмм состояния State Flow на основе обобщенного формализованного описания автомата в виде упорядоченной пятёрки элементов множеств: $A = (S, X, Y, \delta, \lambda)$, где S - конечное множество состояний автомата; X, Y - конечные входной и выходной алфавиты соответственно; $\delta: S \times X \rightarrow S$ - функция переходов; $\lambda: S \times X \rightarrow Y$ - функция выходов.

Оптимизационный потенциал режимов управления в модели АСУ ТО обеспечивается организацией ситуационного управления на основе логико-трансформационных правил $\mathcal{A}_i$; $Q_j \xRightarrow{U_k} Q_l$ теории Д.А. Поспелова, где $\mathcal{A}_i$ - полная ситуация, Q_j и Q_l - текущая и новая ситуация соответственно, U_k - k -е управленческое решение. Состояния

Вложенные состояния для объектов модели АСУ ТО синтезированы с учетом специфики частей ТО, свойственных соответствующему объекту. Так, для КР состояния определены на основании классификации по типам частей ТО: ТПд, ВП, РХ, ВХ и т.п. Идентификация состояния объекта определяется исходя из контекста ситуации в рабочей зоне посредством анализа параметров документации, управляющих команд АСУПП или сигналов оператора. Актуальное состояние объекта определяет настройки метаданных для механизмов, алгоритмов и процедур управления и оптимизации движения КР и вспомогательного оборудования, описывает текущую функциональность и поведение объекта. Переход между состояниями реализован с помощью условных переходов. Модель помимо дополнительных предусматривает два режима, в первом – посредством ROS2 осуществляется передача управляющих команд непосредственно на физическое оборудование, во втором управляющие команды передаются на модели СУЭП в целях моделирования геометрии перемещения объектов коллизий и динамики движения. Машину состояний дополняет набор модулей, идентифицирующих и характеризующих типичные и атипичные сценарии внутри рабочей зоны, требующие соответствующей реакции со стороны управляющей системы.

Модель АСУ ТО координируется управляющими командами из ДСМ и агрегирует модели локальных СУЭП КР; модель идентифицирует КРТП (характеризующийся высокой степенью вовлеченности человека), имеет интеграционные связи с вышестоящей АСУ и ЛСУ и может являться математической и технической основой для разработки ЦД КРТП широкого профиля. Учет влияния человеческого фактора в ИСУ КРТП предлагается организовать за счет введения зависимостей управляющих алгоритмов АСУ ТО от уставок, формируемых моделью человеческого фактора (МЧФ) при анализе текущей ситуации в рабочей зоне. При этом обобщенный функционал качества КРТП с учетом ограничений МЧФ можно представить в виде:

$$EF_{TP} = f_1(EF_{TS}, EF_{HS}, EF_{OS}) \rightarrow \max, \quad (13)$$

при $Par_{TP} = \{Par_{TP_1} \dots Par_{TP_n}\} \in TR$, где TR – множество допустимых параметров ТП; EF_{TP} – эффективность ТП; EF_{TS} – эффективность технологической системы; EF_{HS} – эффективность человеческого фактора; EF_{OS} – эффективность организационной системы.

Человеческий фактор можно представить как:

$$EF_{HC} = f_2(S, B, HC, TK, CA) \rightarrow \max, \quad (14)$$

где S – состояние человека; B – поведение человека; HC – приведенная компетентность; TK – поставленные задачи перед человеком; CA – корректирующие воздействия.

Принципы построения МЧФ аналогичны представленной АСУ ТО, МЧФ также формализована в виде машин конечных автоматов. В работе показана эффективность применения аппарата искусственного интеллекта при оценке человеческого фактора. Реализованы механизмы влияния на управленческие решения в АСУ ТО в зависимости от уставок МЧФ, выражающихся в ограничении режимов управления, режимов безопасности, объема рабочей зоны, динамики движения,

доступных шаблонов перемещений, доступных частей ТО, а также в информационном оповещении оператора и АСУПП.

Четвертая глава посвящена математической формализации задач оптимизации, формирующей теоретические основы создания алгоритмического и программного обеспечения для КРТК и систем управления ими, включая разработку подхода, элементов БЗ и методов оптимизации режимов управления движением КР для достижения целей ТО, обеспечивающих технологическую и энергетическую эффективность КРТП. В ходе анализа актуальных научных решений выявлена необходимость разработки новых и совершенствования имеющихся встроенных в ИСУ оптимизационных механизмов, позволяющих обеспечить эффективное функционирование КР с человеком в недетерминированной среде с учетом текущей ситуации в рабочей зоне.

В подавляющем большинстве случаев КРТК на промышленных предприятиях оснащаются КР с встроенными СУЭП. Регуляторы СУЭП уже включают оптимальные законы управления, а техническая реализация, как правило, представлена в виде оптимальных ПИД-регуляторов.

Необходимо акцентировать внимание на том, что задача оптимизации движения ПР при рассмотрении объектов (роботов) с интегрированной СУЭП, очевидно, не может включать в себя структурно-параметрический синтез оптимальных регуляторов. Тогда с учетом форматов интерфейсов управления современными КР оптимальное управление, обеспечивающее движение КР по оптимальной траектории, может быть представлено массивом шаблонных команд с параметрами или методом программного управления путем задания $\varphi_3(t)$. Второй вариант представляется более предпочтительным ввиду меньшего, по сравнению с форматом шаблонных команд, набора ограничений, накладываемых на процедуры планирования и оптимизации движений, и обеспечивает повышение качества решения. При этом отклонение фактической траектории от заданной (при задании оптимального управления в виде $\varphi_3(t)$) за счет высокого быстродействия и точности интегрированных ЛСУ, а также коррекции динамики движения ($\varphi_3(t)$, $\dot{\varphi}_3(t)$ и $\ddot{\varphi}_3(t)$) сводится к уровню допустимых ТП отклонений.

С учетом наличия соглашения о совместном движении (синхронном и асинхронном) электроприводов сформулирована задача оптимизации с учетом специфики рассматриваемых ТП для ВП и некоторых ВХ ТПд, для которых не свойственно наличие ограничений на переменные состояния в промежуточных точках траектории.

Итак, если в операционном пространстве (ОП) задана задача, классифицируемая как ВП либо неограниченный в промежуточных точках ВХ, в формате необходимого преобразования $TF_o \rightarrow TF_f$ при условии, что $TF_o \cong F_{FK}(\varphi_o)$, где F_{FK} – функция решения прямой задачи кинематики (ПЗК), обеспечивающая преобразование состояние объекта в конфигурационном пространстве (КП) в состояние в ОП для конкретной локальной системы координат; φ_o – вектор состояния углов положения осей КР в текущем положении; TF_o – матрица трансформации для системы координат центральной точки инструмента (ЦТИ) в ОП, и выполняются два условия:

1) $\varphi(t)$ не ограничен никаким дополнительным образом, кроме как техническими ограничениями углов поворота шарниров КР;

2) желаемое состояние углов положения $\varphi_f = F_{IK}(\varphi(0), TF)$ определено при $\varphi(0) = \varphi_o$ и $TF = TF_f$, где F_{IK} – функция решения ОЗК, обеспечивающая преобразования состояния объекта в ОП в состояние в КП; то необходимо найти такое управление $u(t) = \varphi_3(t)$, что $\varphi(t) \cong \varphi_f$ при $t = t_f$, $|\varphi(t_f) - \varphi_f| \leq \Delta\varphi$, $|\varphi(t) - \varphi_3(t)| \leq \Delta(t)$ (в случае, если движение реализует ТПД, то добавляются условия на промежуточные состояния в ОП), где φ_f – конечное положение объекта; t_f – время окончания движения; $\Delta\varphi$ – абсолютная ошибка рассогласования; $\Delta(t)$ – функция ошибки рассогласования и условия: $|\dot{\varphi}(t)| \in \{0, \varepsilon_{max}\}$, $|\tau(t)| \leq \tau_{max}$, где $\omega_{max}, \varepsilon_{max}, \tau_{max}$ – предельно допустимые значения переменных состояния объекта, при этом $u(t) = \varphi_3(t)$ должно быть оптимальное по одному из следующих критериев и с учетом дополнительных ограничений.

Задача 1. Максимизация быстродействия – (задача Майера). Согласно обобщенному функционалу качества $J = g_0[x(t_o), x(t_f), t_o, t_f]$ или, в частности с ограничениями:

$$\begin{aligned} J &= t_f - t_o, \quad J \rightarrow \min; \\ \varphi(t_o) &= \varphi_o; \quad \varphi(t_f) = \varphi_f; \quad \dot{\varphi}(t_f) = 0; \end{aligned} \quad (15)$$

оптимизация обеспечивает максимизацию производительности перехода.

Задача 2. Минимизация расхода энергии (задача Лагранжа). Согласно обобщенному функционалу качества:

$$J = \int_{t_o}^{t_f} f_o(x, u, t) dt \rightarrow \min$$

или, в частности, с ограничениями:

$$J = \int_{t_o}^{t_f} u^2 dt, \quad J(u, t_f) \rightarrow \min \quad (16)$$

при неизвестных $u(t) = \varphi_3(t) - \varphi(t)$, t_f , и $\varphi(t_o) = \varphi_o$, $\dot{\varphi}(t_f) = 0$, следовательно, $[\varphi_3(t), t_f] = \operatorname{argmin}(J)$; а с учетом наличия оснащающего оборудования функционал качества имеет вид:

$$J = \int_{t_o}^{t_f} u^2 dt + k \int_{t_o}^{t_f} |P_{wr}^{add}(t)| dt, \quad J \rightarrow \min, \quad (17)$$

где $P_{wr}^{add}(t)$ – мощность оборудования, k – коэффициент пересчета в $\text{рад}^2 \cdot \text{с/Вт}$.

Задача 3. Минимизация нагрузки на вычислительные мощности (минимизация времени планирования движения). Согласно функционалу качества:

$$J = n, \quad J \rightarrow \min \quad (18)$$

в условиях ограничений:

$$|J_p(u_n(t), t_{fn}) - J_p(u^*(t), t_f)| \leq \Delta_f^n, \quad (19)$$

где J_p – функционал по быстродействию (форм. 15); $u^*(t)$ – оптимальное управление по критерию быстродействия; t_f – время исполнения оптимального движения; $u_n(t)$ – найденное по критерию (18) управление; t_{fn} – соответствующее время исполнения движения; Δ_f^n – допустимое отклонение (ошибка относительно решения по критерию (15); $\{u_1(t), t_{f1}; \dots u_n(t), t_{fn}\}$ – кортеж, содержащий результаты итерационного решения по поиску $u(t)$ и t_f размерности $1 \times n$, где $n \in [1, 2, \dots \infty]$; тогда в разрезе времени исполнения ограничение (19) выглядит как $t_f - \delta \leq t_{fn} \leq t_f + \delta$, т.е. задача сводится к нахождению решения $u_n(t), t_{fn}$,

отличающегося от решения, оптимального по быстродействию в пределах ошибки Δ_f^n ; в лучшем случае $n = 1$, так, например, происходит для решения задачи 3 и 2 для нахождения оптимального движения для пути, заданного только двумя точками (позиционное управление) без ограничений по промежуточным точкам.

Задача 4. Обеспечение безопасности. Задача сводится к нахождению $u(t)$ и t_f таких, что $t_f \leq t_{lim}$ (t_{lim} – ограничение на время исполнения перехода), $\varphi(t_f) \cong \varphi_3$, и $S_{R_i} \cap S_{H_i} \cap S_{OB_i} = 0$ (S – shell, оболочка), для всех $i = 1 \dots n$, где n – число дискрет времени; $\frac{t_f}{n}$ – шаг дискретизации; t_i – рассматриваемый момент времени, $t_i \in [t_o, t_f]$. При этом геометрическая огибающая поверхностей оболочек КР при движении определяется как функция от обобщенных координат, кинематической и геометрической модели КР. То есть S_{R_i} определяется как $F_{surf}^R(\varphi(t_i), Model_R)$; поверхность модели тела человека (S_{H_i}) как $F_{surf}^H(\{TF_{H_1}^i, \dots, TF_{H_m}^i\}, Model_H)$; где $\{TF_{H_1}^i, \dots, TF_{H_m}^i\}$ – массив матриц трансформации локальных баз звеньев модели оператора; $Model_H$ – геометрическая и кинематическая модели оператора. Поверхность S_{OB_i} определяется как функция $F_{surf}^{OB}(\{TF_{OB_1}^i, MD_{OB_1}\} \dots \{TF_{OB_j}^i, MD_{OB_j}\} \dots \{TF_{OB_L}^i, MD_{OB_L}\})$, где L – количество объектов коллизий, где MD_{OB_j} – кинематическая модель j -го объекта; $TF_{OB_j}^i$ – его матрица трансформации.

Задача 5. Обеспечение безопасности с учетом прогноза. Задача целесообразна в ситуации исполнения ТО, предусматривающих движение какого-либо из объектов коллизий, кроме КР. Если скорость движения объектов находится в допустимых пределах, то траектории движений во времени должны быть спрогнозированы, а КР должен получить задание на движение с учетом результатов прогноза изменения положения подвижных объектов. Задача является расширением задачи 4, где условие отсутствия пересечений геометрических огибающих поверхностей модели КР, оператора и объектов коллизий для всех рассматриваемых моментов времени представляется в виде: $((S_{R_i} \cap S_{H_i} \cap S_{OB_i}) \cup (S_{R_{i+1}} \cap S_{H_{i+1}} \cap S_{OB_{i+1}}) \dots \cup (S_{R_k} \cap S_{H_k} \cap S_{OB_k})) = 0$ при этом $k \in [i \dots n]$; $[i \dots i + 1, \dots k]$ и t_k – глубина прогноза.

Актуальная задача оптимизации или последовательность задач для каждой части ТО в рамках КРТП может быть определена алгоритмическим обеспечением с учетом установленного интегрального критерия качества и исходя из текущей ситуации недетерминированной среды.

Для повышения быстродействия системы планирования движений рассмотрены теоретические основы и метод снижения размерности задач оптимизации АСУ оптимального управления КРТП за счет введения ограничений КП и ОП КР, обеспечивающих эффективные для текущей ТО пространственные расположения ЦТИ. Снижение объема вычислений уменьшает время отклика системы программного управления КРТП в режиме реального времени за счет введения дополнительных ограничений для решателей нелинейной задачи оптимизации. Доказано, что любому классу ТО КРТП, включающему повторяющиеся ТПд, может быть поставлено в соответствие ограниченное дискретное КП (Q^{red}), такое, что

для любой точки k начала РХ для ТПД, определённой в ОП матрицей трансформации TF_k , может быть найдена следующая конфигурация:

$$Q_k = F_{IK}(TF_k, Q_j^{red}), \quad (20)$$

где Q_j^{red} – наиболее подходящий элемент из Q^{red} , используемый в функции F_{IK} в качестве входного параметра, отражающего начальное предположение конфигурации в точке назначения для алгоритма оптимизации BFGS, при этом Q_k останется эффективной технологической конфигурацией, обеспечивающей эффективную технологическую позу КР. Условием технологической эффективности будет являться то, что фактическая матрица трансформации

$$\widetilde{TF}_k = F_{FK}(Q_k) \cong TF_k \quad (21)$$

будет определяться в пределах допустимой погрешности Δ (рассчитанной, с помощью метрик NRMSE, RMSE или MAD), и если $V_{R_k} \subset V_R$, здесь $V_{R_k} = \{X \subset R^3 | \partial X = S_{R_k}\}$, $V_R = \{Y \subset R^3 | \partial Y = S_R^{Q^{red}}\}$, ∂X и ∂Y – границы множеств, замыкающие объёмы соответствующих пространств. То есть выполняются следующие условия: для V_{R_k} , если $x_0 \in X$, то для $\forall$ окрестности $U \ni x_0$ справедливо $U \cap X \neq 0$ и $U \cap X^C \neq 0$; для V_R , если $y_0 \in Y$, то для $\forall$ окрестности $W \ni y_0$ справедливо $W \cap Y \neq 0$ и $W \cap Y^C \neq 0$, где X^C, Y^C – дополнения множества X и Y соответственно; $S_{R_k} = F_{surf}^R(Q_k, Model_R)$, – множество точек в декартовом пространстве, определяющих внешнюю оболочку поверхности 3-D модели КР; $S_R^{Q^{red}} = \bigcup_{i=1}^n (F_{surf}^R(Q_i, Model_R))$, – множество точек в декартовом пространстве, определяющих внешнюю оболочку n поверхностей моделей КР для всех конфигураций из Q^{red} , где $i \in \overline{1, n}$, n – мощность множества Q^{red} , $Model_R$ – модель КР в URDF формате.

На базе предложенного метода разработана группа алгоритмов оптимизации движения КР по критериям производительности ТО и энергоэффективности при оперативном планировании ВП и ВХ в режиме позиционного управления, отличительной особенностью которых является использование БЗ РКП, содержащей уставки для решателей нелинейной задачи оптимизации. Использование алгоритмов позволило за счет снижения объема вычислений сократить общее время реакции системы управления на задание. Результативность доказана в ходе численного эксперимента на имитационных моделях. Алгоритмы помимо нахождения оптимального решения предоставляют возможность построения для оператора графических интерфейсов, обеспечивающих коррекцию спланированных движений в ручном режиме при возникновении дополнительных ограничений.

Для проектирования оптимальных движений по исполнению ТПД и РХ – движений типа HRP был разработан и исследован оригинальный алгоритм, который позволяет получить зависимости $t_E(v_{max}, d)$ и $E(v_{max}, d)$. Минимизация функций приводит к решению задач оптимизации по быстродействию и энергоэффективности для HRP части ТО. В частности, в качестве примера результатов визуализации отмечена точка минимума (рис. 7, а) для функции времени исполнения движений (задача быстродействия), а также отмечены четыре точки минимума функции энергопотребления КРТК для 4-х значений мощности потребителей оснащающего оборудования (рис. 7, б).

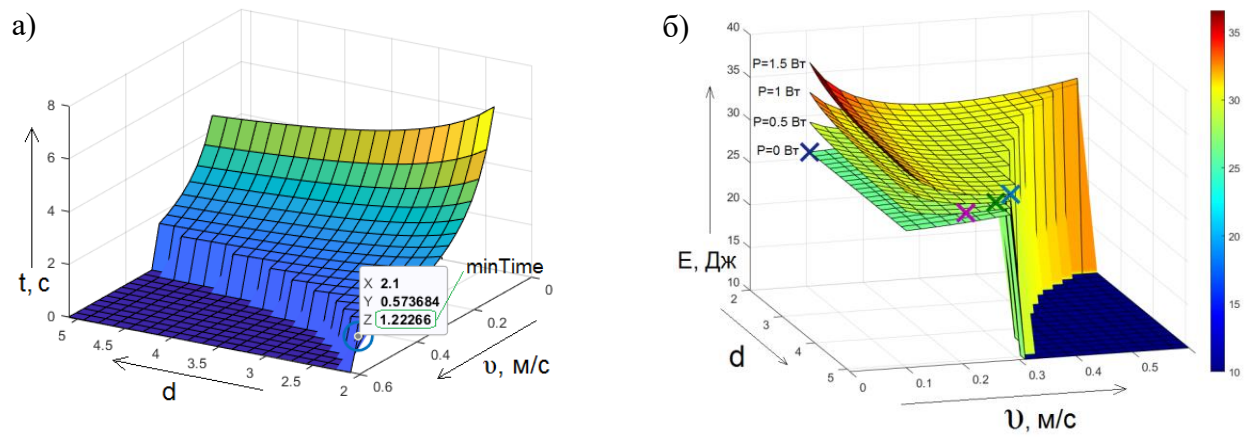


Рисунок 7 – визуализация оптимальных параметров v_{max} и d

Работоспособность предложенного алгоритма подтверждена результатами численного и натурного экспериментов. Продемонстрирован имеющийся потенциал энергосбережения и увеличения производительности как в рамках одной пары конфигураций КР, так и в пространстве всех возможных конфигураций применительно к движениям типа LIN (прямолинейная траектория) внутри ТО КРТП.

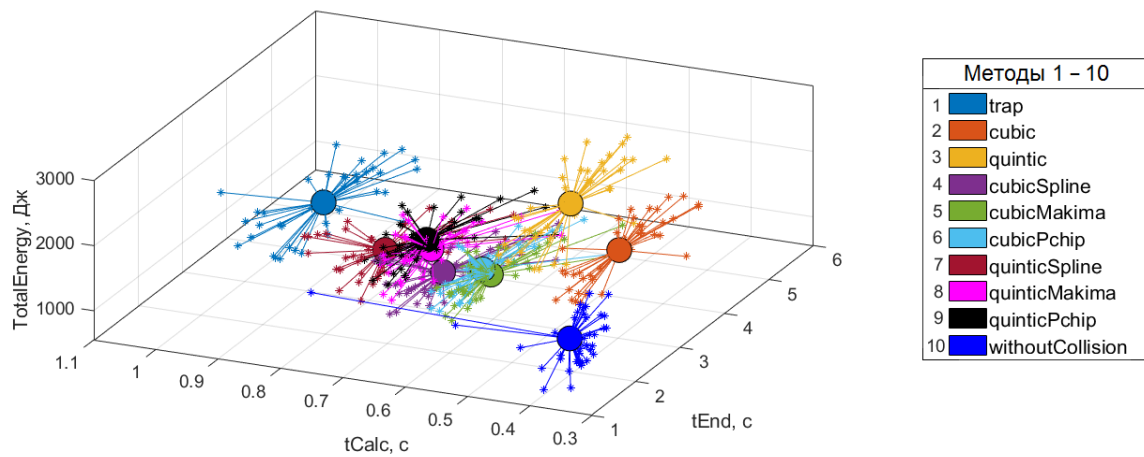


Рисунок 8 – Результаты моделирования движений по разрешению коллизии

Выявлено наличие существенного потенциала повышения эффективности управления движением КР при исполнении частей ТО за счет подбора актуального для текущего редуцированного пространства (РДП) алгоритма интерполяции траекторий. Были проведены исследования для 9 вариантов алгоритмов интерполяции при планировании движения по разрешению коллизии в различных РДП (рис. 8). Сводные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Потенциал эффективности при выборе метода интерполяции

Критерий	Лучший результат (Me_{min})	Замыкающий из 3-х лучших результатов ($Me_{max}(1:3)$)	Худший результат (Me_{max})	Потенциал эффективности $1 - \frac{Me_{min}}{(Me_{max}(1:3))}$	Потенциал эффективности $1 - \frac{Me_{min}}{(Me_{max})}$
$min(tEnd)$	3,30	3,50	4,42	0,06	0,25
$min(tCalc)$	0,49	0,65	0,93	0,25	0,47
$min(tAll)$	4,12	4,26	4,93	0,03	0,16
$min(TotalEnergy)$	779,19	900,43	1488,10	0,13	0,48
$tEnd$ – время движения, $tCalc$ – время, необходимое на расчет движения, $tAll$ – общее время, $TotalEnergy$ – потребляемая энергия					

Наличие потенциала оптимизации от 6 до 25 % по трем лучшим результатам доказывает необходимость сопоставления для каждого РДП набора приоритетных вариантов алгоритмов интерполяции как уставок для планировщика движения. Автоматизированный выбор актуального алгоритма интерполяции позволит сформировать для оптимизатора движений заведомо выгодные начальные условия. Также в главе рассмотрен подход и представлен алгоритм поиска субоптимальных движений КР (реализующих ВП и ВХ) по критерию минимизации энергопотребления на базе нейронной сети - RL DDPG агента. Отличительной особенностью является достижение необходимого результата со значительной экономией вычислительных ресурсов.

В пятой главе показано, что недетерминированная среда КРТП значительно усложняет процессы планирования движений по реализации частей ТО. Существующие алгоритмы разрешения коллизий не всегда гарантируют получение удовлетворительного результата за ограниченный временной интервал, определенный необходимостью оперативной реакции на изменение в рабочей зоне. Приведены результаты исследований по анализу, модернизации и разработке алгоритмов планирования и оптимизации движений при разрешении коллизий в недетерминированной среде КРТП. Разработанное алгоритмическое обеспечение базируется на предложенных решениях в предыдущих главах и дополняют их.

Классическая постановка задачи оптимизации при функционировании универсальных алгоритмов разрешения коллизий из множества $M_{Collis} = \{RRT, CHOMP, TRAMP \dots\}$ для длинноходных движений типа $P_1 P_2 \rightarrow Pos_mode(Q_1, F_{IK}(TF_2, Q_{IG}))$, где Pos_mode – оператор режима позиционного управления; Q_1 – начальная конфигурация КР; TF_2 – пространственное расположение КР в точке назначения; Q_{IG} – начальное предположение конфигурации в точке назначения; F_{IK} – функция решения ОЗК, определяется как:

$$u(t) = f(M_{Collis}, P_1, P_2, P_{OB}\{\dots\} \rightarrow S_{OB}, Traj_mode(\dots)), \quad (22)$$

при ограничениях: $u(t) \rightarrow q(t)$; $q(t_f) = Q_2 \pm \delta_q$; $F_{FK}(Q_2) = TF_2 \pm \delta_{TF}$;
 $q(t_0) = Q_1$; $|\dot{q}(t_i)| \leq \dot{q}^{lim}$; $|\ddot{q}(t_i)| \leq \ddot{q}^{lim}$; $|\dddot{q}(t_i)| \leq \dddot{q}^{lim}$, для $\forall i \in \overline{1, n}$;
 $q(t_i) \rightarrow S_{R_i} \cap S_{OB_i} = 0$; где δ_q – ошибка рассогласования в КП, δ_{TF} – ошибка рассогласования в ОП.

Для сокращения временных затрат предлагается оригинальная математическая постановка задачи планирования движения для оптимизационных алгоритмов, которая сводится к нахождению с учетом ограничений (22) закона управления:

$$u(t) = F_{sm}(u^*(t)), \quad (23)$$

$$u^*(t) = \begin{cases} f_1(M_{Collis}, P_1, P^1, P_{OB}\{\dots\} \rightarrow S_{OB}, Traj_{mode(\dots)}) \\ f_1(M_{Collis}, P^1, P^2, P_{OB}\{\dots\} \rightarrow S_{OB}, Traj_{mode(\dots)}) \\ \vdots \\ f_n(M_{Collis}, P^n, P_2, P_{OB}\{\dots\} \rightarrow S_{OB}, Traj_mode(\dots)) \end{cases}, \quad (24)$$

где $F_{sm}(\cdot)$ – операция интерполяции; $P^1, P^2 \dots P^n$ – промежуточные точки, образующие вместе с точкой начала и точкой назначения путь движения КР и полученные в результате направленного выбора из БЗ РДП, т.е. каждая $P^j \{Q_j^{red}, TF_j\}$ определена в РКП соответствующей части ТО, пространственные расположения образуют эф-

фективные технологические позы, а звенья и инструмент КР не вызывают коллизии с объектами рабочей зоны, т.е. $\sum_1^n (S_{R_j}(Q_j^{red}) \cap S_{OB}) = 0$.

Преимуществом постановки задачи в варианте (23) (при входном аргументе $M_{Collis} = \{RRT, CHOMP, TRAMP \dots\}$) по отношению к (22) является сокращение расстояния от точки начала движения до точки назначения в КП, что гарантирует повышение вероятности сходимости. С учетом постановки (23) разработаны модернизированные алгоритмы $manCHOMP$ и $manRRT$. Тем не менее в обоих вариантах итерация поиска каждой новой приемлемой конфигурации КР сопровождается проверкой на столкновения, что требует значительного количества вычислительных ресурсов. Принимая во внимание рассмотренный недостаток, в работе предложен оригинальный алгоритм разрешения коллизий $basePoints$, расширяющий множество M_{Collis} , планирующий движение КР на основе получения кратчайшего пути алгоритмом Дейкстры по ненаправленному графу G , ассоциированному с текущей частью ТО и идентифицированному РДП: $G = (V, E, w)$, где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – непустое множество вершин; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\} \subset V \times V$, причем каждое ребро $e_i = \{v_j, v_k\}$ представляет ненаправленную связь между соответствующими вершинами; каждая вершина v_j графа G соответствует определенной конфигурации Q_j^{red} из РКП; $G.V.Inf$ – ячейка со структурой данных, содержащая исчерпывающую информацию об опорной точке ассоциированной с вершиной графа, $w(e_i)$ – вес ребра e_i . Вершины графа ассоциируются только с теми опорными точками, конфигурация КР в которых не вызывает коллизий с объектами окружения.

Факт наличия или отсутствия ребра графа между двумя вершинами предлагается параметризовать степенью удаленности соответствующих точек РДП с помощью L_2 -нормы. Полученный по построенному графу G кратчайший путь $path$ между текущей точкой и точкой назначения в обход коллизии далее предлагается использовать как аргумент функции в постановке задачи (23). Итоговое сглаженное движение по пути $path$ проверяется на наличие коллизий и в случае отрицательного прогноза коллизий передается на исполнение в ЛСУ КР.

Результаты сравнительных экспериментов для группы алгоритмов по исполнению набора частей ТО представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Усредненные данные результатов разрешения коллизии алгоритмами $basePoints$ (BP), RRT, $manRRT$, CHOMP, $manCHOMP$

Показатель эффективности	Алгоритмы разрешения коллизий				
	BP (1)	RRT (2)	$manRRT$ (3)	CHOMP(4)	$manCHOMP$ (5)
k_{ratio}^l	1,44	1,17	1,81	1,06	1,13
k_{ratio}^{jerk}	1,38	1,32	3,65	0,75	0,66
k_{ratio}^E	1,59	3,21	3,89	2,41	2,57
$\bar{t}_{calc}^+$, сек	3,02	4,75	8,99	7,10	8,25
$\bar{t}_{move}$, сек	8,36	6,20	13,42	3,56	3,82
Pr^+	98,30	94,90	99,80	81,40	93,20

Предложены модернизированные алгоритмы $manRRT$ и $manCHOMP$, по ряду показателей эффективности, в частности по показателю вероятности разрешения коллизий, превосходящие базовые RRT (на 4,9 %) и CHOMP (на 13,6 %). Разработанный алгоритм разрешения коллизий $basePoints$ характеризуется меньшими

требованиями к вычислительным ресурсам по сравнению с универсальными алгоритмами разрешения коллизий (в 1,57 раза быстрее чем алгоритм RRT и в 2,35 раза быстрее чем алгоритм CHOMP).

Исследования, связанные с оценкой функциональной возможности рассматриваемых алгоритмов в рабочей сцене с движущимися объектами, в частности с использованием теории экстраполяции стационарных случайных процессов, продемонстрировали наличие такой возможности для ситуаций, характеризующихся низкими скоростями объектов. В этом случае вероятность успешного разрешения коллизии будет зависеть от ряда факторов: удаленности объекта от звеньев КР и ЦТИ, значения линейной скорости движения объекта, направления движения, предсказуемости траектории движения и др. На рис. 9 представлен пример результата разрешения коллизии КР и внешней среды, включающий помимо объектов рабочей зоны два дополнительных объекта коллизии: стационарный объект (шар без шлейфа) и движущийся объект (шар со шлейфом). Алгоритм обеспечил планирование движения по исполнению ВП с разрешением коллизии.

Предложен и исследован алгоритм PTS (exploring with preset trajectory shape) планирования движений по разрешению коллизий для короткоходных движений в ограниченном пространстве, поддерживающий оптимизационные механизмы по критериям энергоэффективность и производительность.

Планирование движений КР в целях реализации частей ТО априори осуществляется параллельно в двух пространствах. В КП движение КР описывается уравнениями (10) и (11). В ОП движение описывается уравнением:

$$A(\vec{x}_E)\ddot{\vec{x}}_E + \mu(\vec{x}_E, \dot{\vec{x}}_E) + \rho(\vec{x}_E) = \vec{F}_E, \quad (25)$$

где $\vec{x}_E, \dot{\vec{x}}_E, \ddot{\vec{x}}_E, \vec{F}_E$ – векторы (размерностью $[6 \times 1]$) координат в декартовой системе скоростей, ускорений, а также сил и моментов ЦТИ (локальной базы ЦТИ) в ОП соответственно; A – матрица инерции в ОП; μ и ρ – векторы компонентов (квадратичных по скоростям) и гравитационных сил в ОП соответственно.

Взаимосвязь между переменными КП и ОП для КР с избыточным числом степеней свободы представляется в виде преобразования:

$$\dot{q} = J_b^+ \dot{\vec{x}}_E, \quad (26)$$

где $J_b^+ = W^{-1}(J_b^T(J_b W^{-1} J_b^T))^{-1}$ – псевдообратная матрица Якобиана, вычисляемая согласно методу Мура-Пенроуза; W – предпочтительная $[n \times n]$ диагональная положительно определенная весовая матрица.

Подзадача оптимизации для алгоритма PTS предложена так: если технологией задан путь ЦТИ для реализации ВП или ВХ по двум точкам: начальной (P_1), для которой задана конфигурация КР (q_0), и точки назначения (P_2), для которой задана трансформация в формате TF_f , при этом, движение, описываемое как:

$$q(t) = F_{ip}(q_0, q_f); \quad (27)$$

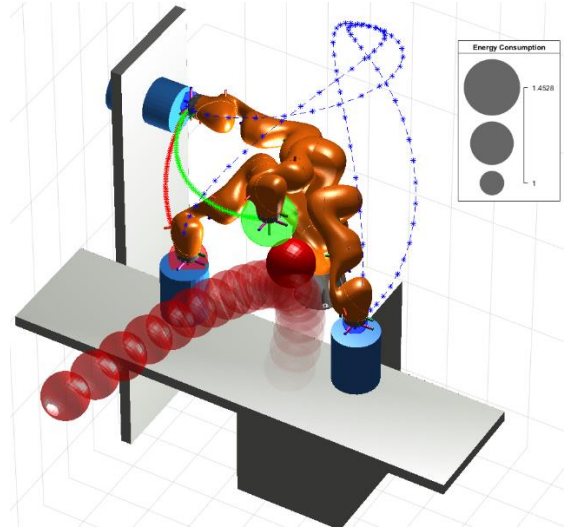


Рисунок 9 – Пример разрешения коллизий алгоритмом CHOMP при наличии движущихся объектов

$$q_f = F_{IK}(q_0, TF_f) \quad (28)$$

при установленных ограничениях на обобщенные координаты не свободно от коллизий, т.е. $\exists i$, что $S_{Ri} \cap S_{Obi} \neq 0$ при $q(t_i)$; $t_i \in [t_0, t_f]$, где F_{ip} – функция нахождения параметров движения для ЦТИ в КП по траектории минимальной длины; F_{IK} – функция решения ОЗК в общем пространстве либо РКП. Тогда задача оптимизации в постановке задачи Майера согласно обобщенному функционалу качества

$$J = g_0[q^*(t_0), q^*(t_f), t_0, t_f] \quad (29)$$

в частном случае с ограничениями будет иметь вид:

$$J = t_f - t_0, J \rightarrow \min, \quad (30)$$

$$q^*(t_0) = q_0, q^*(t_f) = q_f, \dot{q}^*(t_0) = \dot{q}^*(t_f) = 0. \quad (31)$$

И для $\forall i S_{Ri} \cap S_{Obi} = 0$ при $q^*(t_i)$, $t_i \in [t_0, t_f]$, где $\begin{bmatrix} R_i & x_{Ei} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = F_{FK}(q^*(t_i))$, для $\forall t \in [t_0, t_f]$ такого, что x_{Ei} является решением системы:

$$\begin{cases} (x_{Ei}(1) - x_0)^2 + (x_{Ei}(2) - y_0)^2 + (x_{Ei}(3) - z_0)^2 = r^2; \\ a(x_{Ei}(1) - x_0) + b(x_{Ei}(2) - y_0) + c(x_{Ei}(3) - z_0) = 0; \end{cases} \quad (32)$$

т.е. принадлежит заданной в ОП дуге некой окружности (либо любой другой установленной траектории в ОП). Здесь R – матрица вращения; F_{FK} – функция решения ПЗК; $\{a, b, c\}$ – координаты вектора нормали к плоскости расположения окружности; $\{x_0, y_0, z_0\}$ – координаты точки центра окружности; r – радиус окружности.

Для анализа эффективности алгоритма *PTS* проводился сравнительный эксперимент с методами итерационного решения ОЗК, CHOMP, RRT, генерирования пути через опорные точки РКП и др. Разрешение коллизий было реализовано алгоритмом *PTS*, решением задачи оптимизации для функции:

$$q^*(t) = \text{CirclePlan}(\text{Params}) \rightarrow \text{opt}, \quad (33)$$

согласно критерию (30)

$$\text{Params} = \{q_0 | TF_f | \varphi | \text{shift}N | t_f - t_0\} \quad (34)$$

с учетом ограничений обобщенных координат и для $\forall i$, $S_{Ri} \cap S_{Obi} = 0$ при $q(t_i)$, $t_i \in [t_0, t_f]$, где φ – угол поворота плоскости окружности относительно вектора $TF_f(1:3,4) - TF_0(1:3,4)$, характеризующий направление изгиба траектории движения; $\text{shift}N$ – коэффициент задания кривизны дуги. Среди оптимизируемых параметров согласно системе (32) φ и $\text{shift}N$ совместно с заданными q_0 и TF_f определяли траекторию движения ЦТИ в ОП (дугу окружности), т.е. $\vec{x}_{Ei}$, где $i = \overline{1 \dots nPs}$.

Планирование движения ЦТИ по дуге окружности осуществлялось согласно:

$$\vec{x}_E(1:3,1)(t) = [\vec{x}_{Ex}(t) \quad \vec{x}_{Ey}(t) \quad \vec{x}_{Ez}(t)]^T = F_{ipT}(TF_0, TF_m, TF_f); \quad (35)$$

$$\vec{x}_E(4:6,1)(t) = \begin{bmatrix} \vec{x}_{E\alpha}(t) \\ \vec{x}_{E\beta}(t) \\ \vec{x}_{E\gamma}(t) \end{bmatrix} = \begin{cases} F_{ipT}(TF_0, TF_m), t < \arg(\vec{x}_E(1:3,1)(t) = TF_m(1:3,4)); \\ F_{ipT}(TF_m, TF_f), t \geq \arg(\vec{x}_E(1:3,1)(t) = TF_m(1:3,4)); \end{cases} \quad (36)$$

где F_{ipT} – функция интерполяции по трапецеидальному профилю скорости.

Пример параметров движения, полученный алгоритмом *PTS*, представлен на рис. 10. На рис. 11 представлены характерные для синтезированного движения нормированные поверхности мощности и момента, развиваемого двигателем в разрезе шарнир – временная дискрета размерности $[7 \times nPs]$.

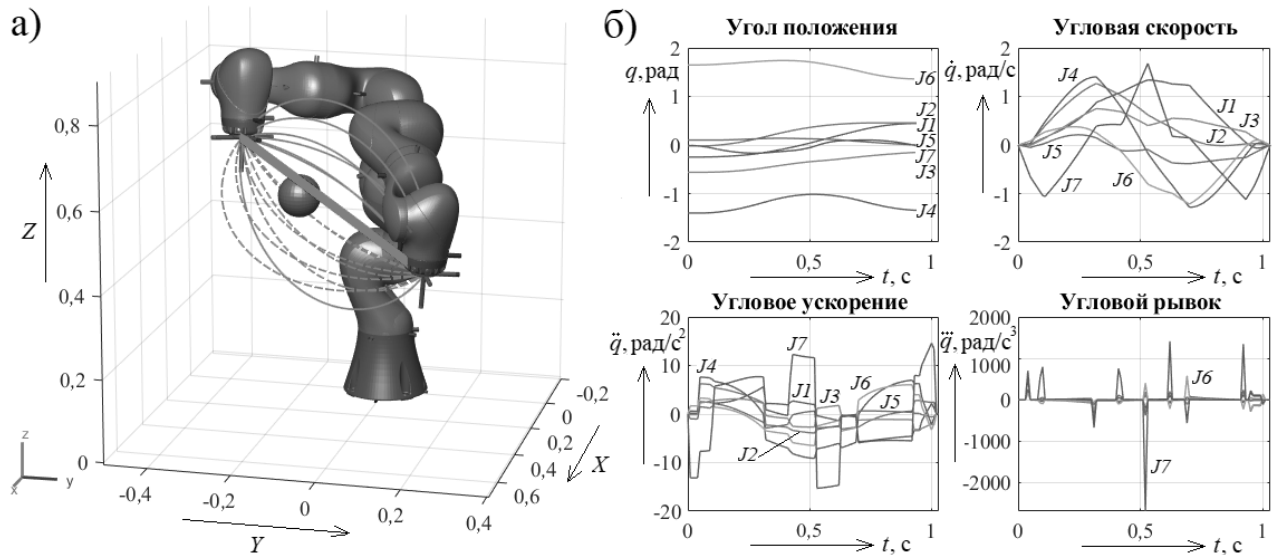


Рисунок 10 – Параметры движения КР, реализующего ВП с разрешением коллизии алгоритмом *PTS*: а – трехмерная визуализация траектории движения (шар – объект коллизии); б – графики изменения во времени переменных состояния $q, \dot{q}, \ddot{q}, \dddot{q}$

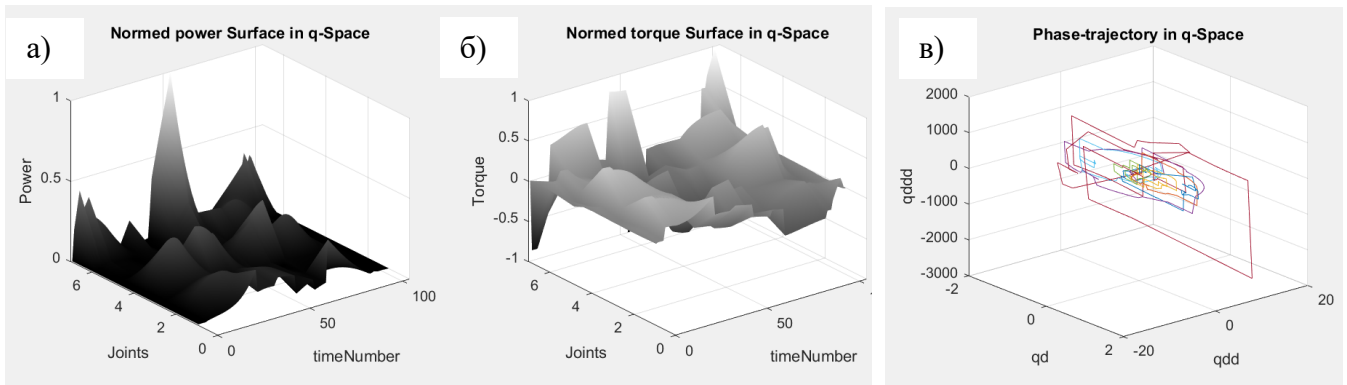


Рисунок 11 – Динамика движения КР (алгоритм *PTS*): а, б – нормированные поверхности мощности и момента в КП в разрезе шарнир - временная дискрета; в – фазовая траектория переменных $(\dot{q}, \ddot{q}, \dddot{q})$

Экспериментальные исследования показали эффективность алгоритма *PTS*. В среднем время исполнения траекторий увеличилось на 1,1 %, тогда как требуемая для перемещения энергия увеличилась на 70 %, средняя мощность увеличилась на 69 %. Разрешение коллизий алгоритмами *MRRT* и *CHOMP* показало увеличение по времени на 301% и 175 % соответственно, при этом энергия снизилась на 38 % и 72 % за счет снижения мощности на 84 % и 89 %.

Для решения оптимизационных задач с учетом критерия плавности движения в РДП как альтернатива алгоритму *PTS* был разработан новый алгоритм разрешения коллизий *RLOS* на базе нейронной сети – *RL-агента* (*rlSACAgent*). Отличительной чертой алгоритма является сокращенное время на расчёт движения по разрешению коллизий, сниженные значения рывков угловых координат и возможность переобучения при изменении РДП. Спецификой предложенного решения является организация первичного поиска траектории не в КП, а в ОП. Существенное снижение размерности задачи обеспечивает ускоренный расчет по сравнению с имеющимися решениями. Плавность движения достигается за счет установленной тактики планирования перемещения, объединившей в себе достоинства нейросетевых вычислений, инерциального управления и сплайн-

интерполяции. Усредненные данные по сравнению с рассмотренными алгоритмами представлены в табл. 3 и 4.

В целом RLOS продемонстрировал высокие результаты качества решений по установленным критериям. Результаты анализа экспериментальных данных сравнения алгоритмов разрешения коллизий с RLOS демонстрируют целесообразность использования предложенного решения в условиях промышленного производства, в том числе в последовательной связке с алгоритмом PTS.

Таблица 3 – Усредненные данные по серии экспериментов

Алгоритм	$\overline{t_f - t_0}$, с	$\overline{E_{total}}$, Дж	$\overline{\ddot{q}_{max}}$, рад/с ²	$\overline{l_q^s}$, рад
PTP	1,0800	2,0901 е+03	5,6721	3,2118
PTS	1,0900	3,5701 е+03	14,0067	3,9026
MRRT	4,3380	1,2869 е+03	9,8116	5,7100
CHOMP	2,9700	0,5859 е+03	8,8114	3,1028

Результаты анализа эффективности алгоритмов разрешения коллизий (см. табл. 2 и 4), демонстрируют невозможность обеспечить безопасность в рабочей

зоне, имея в инструментарии только один алгоритм разрешения коллизий, поэтому в работе предлагается технологический метод, позволяющий для каждого РДП с учетом установленного критерия эффективности ставить в соответствие из БЗ последовательную цепочку алгоритмов разрешения коллизии, обеспечивая значение Pr^+ на уровне 97 – 99,8 % при планировании движений.

Таблица 4 – Усредненные данные результатов разрешения коллизии алгоритмами RRT, CHOMP, PTS и RLOS

Показатель эффективности	Механизмы планирования обхода коллизии				
	*PTP	RLOS (1)	RRT (2)	CHOMP(3)	PTS(4)
k_{ratio}^l	1	2,0396	1,0757	1,4707	1,9799
k_{ratio}^{jerk}	1	37,1000	227,5600	307,3700	158,9800
k_{ratio}^E	1	2,0997	1,1211	2,8229	1,7898
$\overline{t}_{calc}^+$, сек	-	0,4300	1,7800	0,6800	0,1400
$\overline{t}_{calc}$, сек	-	0,3200	2,2800	0,6500	0,1300
Pr^+	-	0,7130	*0,5950	0,7400	0,9430

Тогда синтез закона управления для режима траекторного управления с учетом необходимости разрешения коллизий целесообразно формировать так:

$$\begin{cases} q(t) = \{u(t) \mid \text{при } |q_{rs}(t) - q(t)| \leq \delta(t) \text{ и } S_R(t) \cap S_{Ob}(t) = 0\} \\ q_{rs}(t) = F_{IK}(TF(t)) \end{cases} \quad (37)$$

где $q(t)$ – фактическая траектория движения в КП КР; $q_{rs}(t)$ – задаваемая траектория движения в КП КР; $\delta(t)$ – функция ошибки слежения; F_{IK} – обобщенная функция решения ОЗК; $TF(t)$ – траектория движения центров локальных систем координат всех звеньев КР в ОП в формате массива матриц трансформаций.

При этом последовательность алгоритмов в цепочке и ее глубину предлагается формировать с учетом убывания интегрального критерия:

$$KPI_i = \frac{\sum_{j=1}^6 W_{i,j} \cdot K_{i,j}}{\sum_{j=1}^6 W_{i,j}},$$

где $K_i = [k_{ratio_{norm}}^{li}, k_{ratio_{norm}}^{jerk_i}, k_{ratio_{norm}}^{E_i}, k_{norm}^{time+i} \cdot Pr^{+i}, k_{norm}^{time-i} \cdot (1 - Pr^{+i}), Pr^{+i}]$, $W_i = [\omega_1^i \ \omega_2^i \ \omega_3^i \ \omega_4^i \ \omega_5^i \ \omega_6^i]$ – матрицы весовых коэффициентов приоритетности показателей.

Планирование движения в технологическом методе предлагается организовать согласно схеме (рис. 12). В результате численных экспериментов доказана эффективность предложенного решения по отношению к каждому алгоритму в отдельности. Настройка функционала качества обеспечивает возможность реализации любого установленного в ТП критерия эффективности.

В заключительном разделе главы предложен оригинальный комплексный алгоритм, интегрирующий разработанное ранее алгоритмическое обеспечение в целях планирования и оптимизации движения КР по реализации части ТО в недетерминированной среде КРТП. Алгоритм определяет ключевые

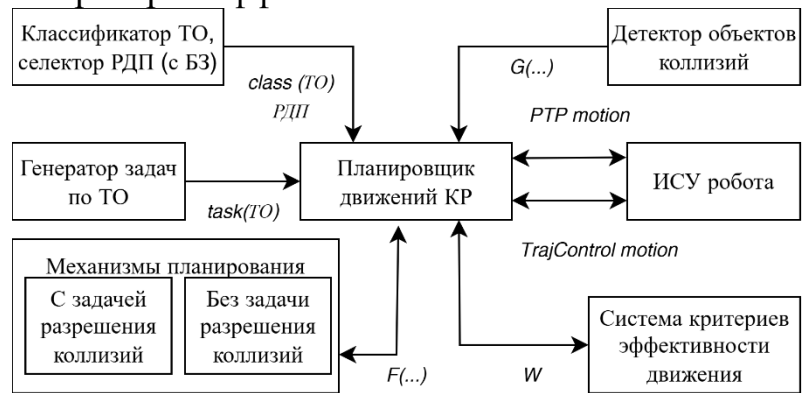


Рисунок 12 – Обобщенная схема планирования движения КР в недетерминированной среде

концептуальные взаимосвязи для программного обеспечения (ПО) программно-аппаратного комплекса (ПАК), предназначенного для управления КР в КРТП, в задачах максимизации производительности комплекса при исполнении ТО, обеспечения требуемого уровня безопасности для оператора и максимизации энергоэффективности СУЭП КР и оснащающего оборудования.

Шестая глава посвящена разработке алгоритмического и программного обеспечения ИСУ КРТП, а также проектированию аппаратной части программно-аппаратного комплекса ИСУ. Целевой задачей такого ПАК следует считать обеспечение надежного и эффективного функционирования ИСУ КРТП, а также создание инфраструктуры для синтеза законов управления основным и вспомогательным КР для исполнения частей ТО, работы систем сенсорики и оповещения, механизмов оптимизации, инструментов диагностики и моделей состояний.

Концептуально поле вариантов параметризации стратегии планирования движения КР в АСУ КРТП представлены на рис. 13. Стратегия планирования включает: 1) синтез функционала качества движений КР; 2) идентификацию части ТО; 3) выбор актуального КП и способа нахождения движения; 4) выбор режима управления и шаблона траектории движения; 5) выбор стратегии реагирования на изменения поведения оператора; 6) идентификацию режима совместной работы; 7) выбор механизмов разрешения коллизий в полном и редуцированном КП и др.

Функциональная схема ПАК представлена на рис. 14. В качестве позиционирующих устройств в рамках научных исследований в зависимости от рассматриваемого ТП были использованы одноосевой позиционер KUKA md250, мобильный робот KUKA youBot, 6-осевой робот малой грузоподъемности (WHEELTEC moveit с устройством управления на базе Raspberry Pi и STM32F103VET6), имитаторы роботов, стационарная оснастка, а также КР KUKA LBR IIWA7 R800 в роли удерживающего устройства.

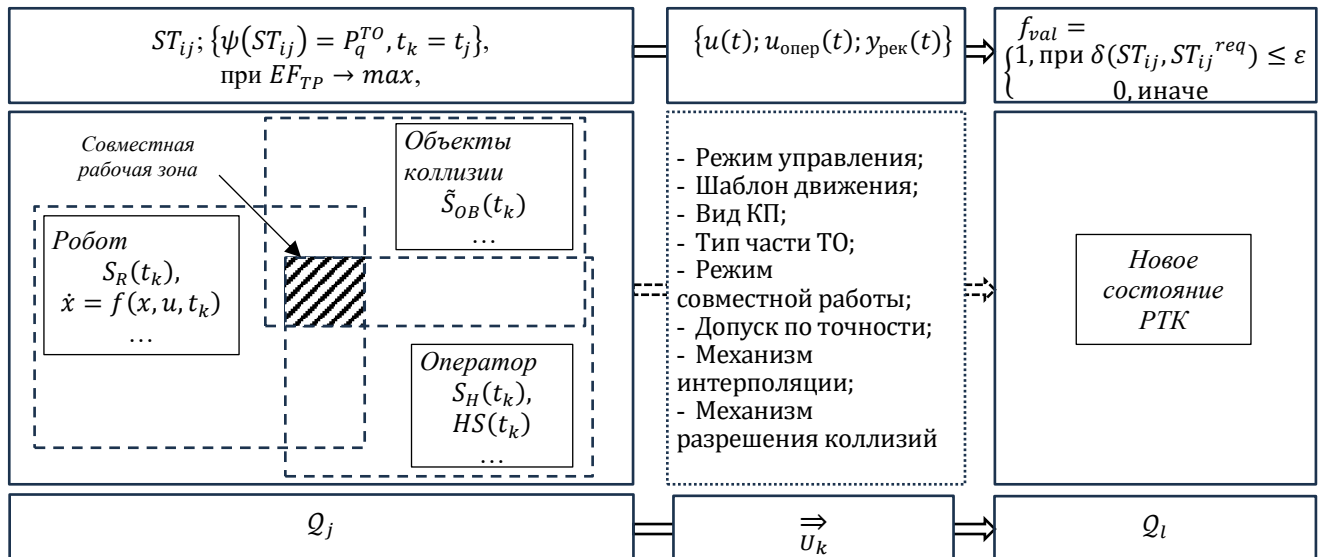


Рисунок 13 – Увеличенная схема групп параметров, определяющих стратегию движения КР

В результате предложена унифицированная структура аппаратной части КРТК, позволяющая обеспечить исполнение алгоритмических, информационных и программных задач по управлению и оптимизации режимов функционирования КРТП.



Рисунок 14 – Функциональная схема ПАК

Предложена новая структура зависимостей компонентов ПО ИСУ КРТП (рис. 15). Набор компонентов обеспечивает синтез закона управления для планирования, оптимизации и реализации движений КР в рамках

установленных задач ТО с учетом текущего сценария течения ТП. Продемонстрированы новые решения по интеграции дискретных моделей и моделей реального времени в единую систему, позволяющие непосредственно оптимизировать закон управления, а также обеспечивать возможность управления временем реакции системы в зависимости от требований по безопасности. Модульность структуры и унификация ключевых интерфейсов позволяют ИСУ варьировать не только параметрами и режимами для максимизации целевой функции оптимизации, но и осуществлять выбор наиболее подходящих текущему сценарию моделей.

Детализация классов программных объектов АСУ ТО и их зависимостей формирует теоретические основы и прототипы практической реализации для архитекторов, системных интеграторов и программистов при создании образцов промышленных систем управления КРТП. Реализация методов планирования частей ТО для SRP- и HRP-движений представлены для режимов позиционного (например, метода *moveOnly(...)*) и траекторного (например, метода *drilling(...)*) управления. Все программные методы планирования движений поддержаны инструментами оптимизации, рассмотренными в предыдущих главах.

Разработанное в текущем разделе математическое и алгоритмическое обеспечение, определяющее внутренние принципы и механизмы АСУ ТО при синтезе дискретных управляющих сигналов, позволяет снабдить системы планирования и оптимизации движения в КРТП исходными задающими параметрами в соответствии с технологическим описанием выполняемых ТО.

Разработано объектно-ориентированное ПО для АСУ ТО (рис. 16).

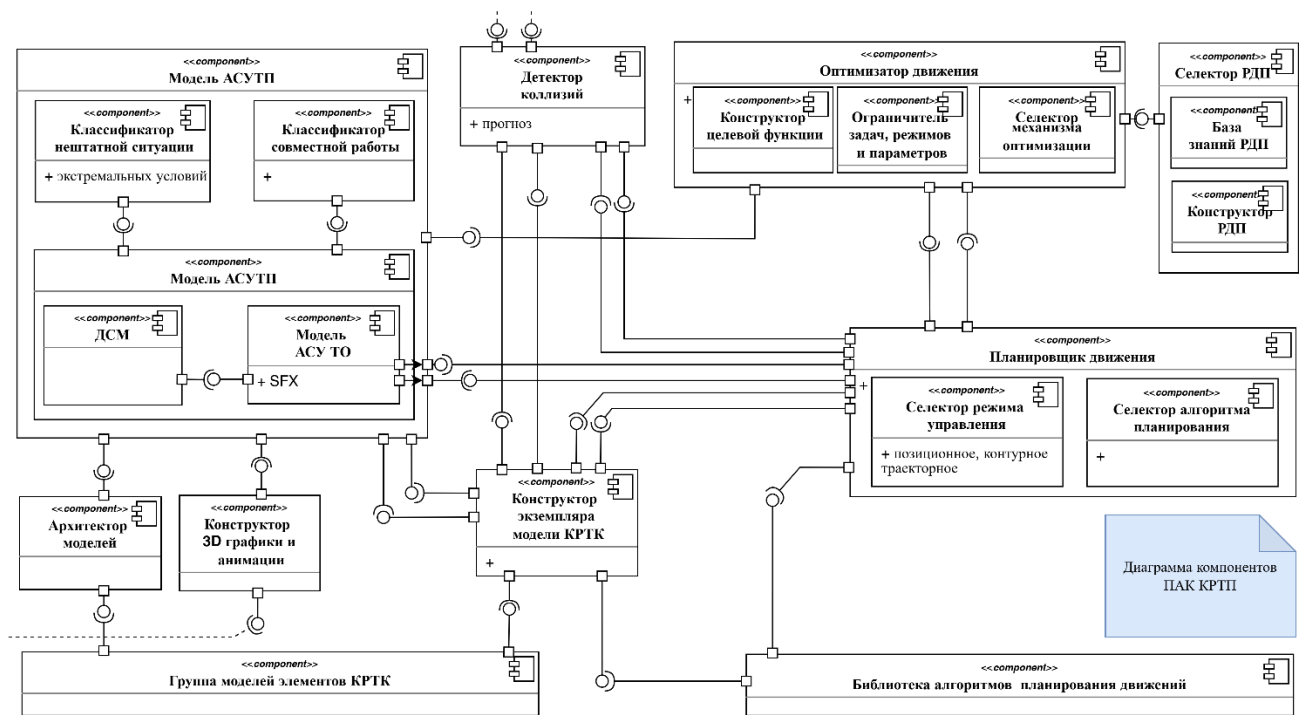


Рисунок 15 – Диаграмма компонентов ПАК.

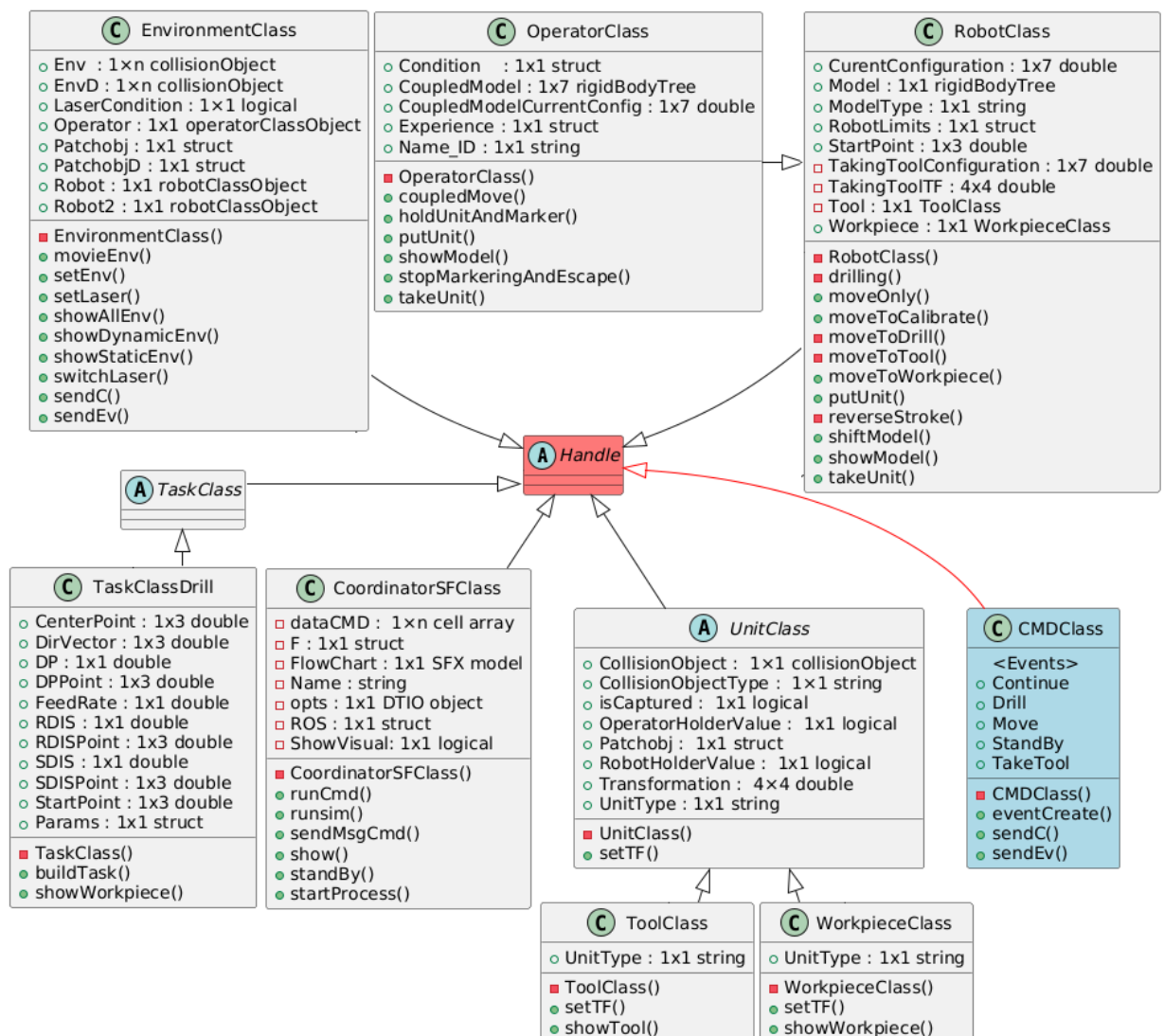


Рисунок 16 – Диаграмма классов ПО АСУ ТО

В седьмой главе представлена серия экспериментов на промышленном оборудовании научно-образовательного центра «Промышленная робототехника и передовые промышленные технологии» ФГБОУ ВО «КнАГУ», подтверждающая научные и технические решения (см. предшествующие главы), а также результаты моделирования технико-экономических показателей при внедрении ИСУ КРТП в производство. При рассмотрении отдельных параметров ТП учитывались результаты анализа задач и целей модернизации АСУ ТП камеры роботизированной покраски на базе манипуляторов серии ABB IRB 5500-22 в гальваническом цехе 96 Филиала ПАО «ОАК» - КнААЗ им. Ю.А. Гагарина, о чем имеется акт о внедрении.

Апробация предложенных решений при синтезе закона управления КР в задачах исполнения ТПд продемонстрировано на примере КРТП окрашивания изделий сложной конфигурации. Для точного отслеживания траектории перемещения факела использовался имитатор факела – лазерный указатель. Программное управление было реализовано в траекторном режиме. Критерий эффективности – минимальное возможное время исполнения движения. Внешний вид КРТК в ТП окрашивания представлен на рис. 17. Анализ траекторий перемещения центра пятна окрасочного факела (пятно лазера имитатора) и графиков изменения переменных состояния шарниров, позволяет заключить, что все траектории получены в пределах установленных линейных и угловых допусков.

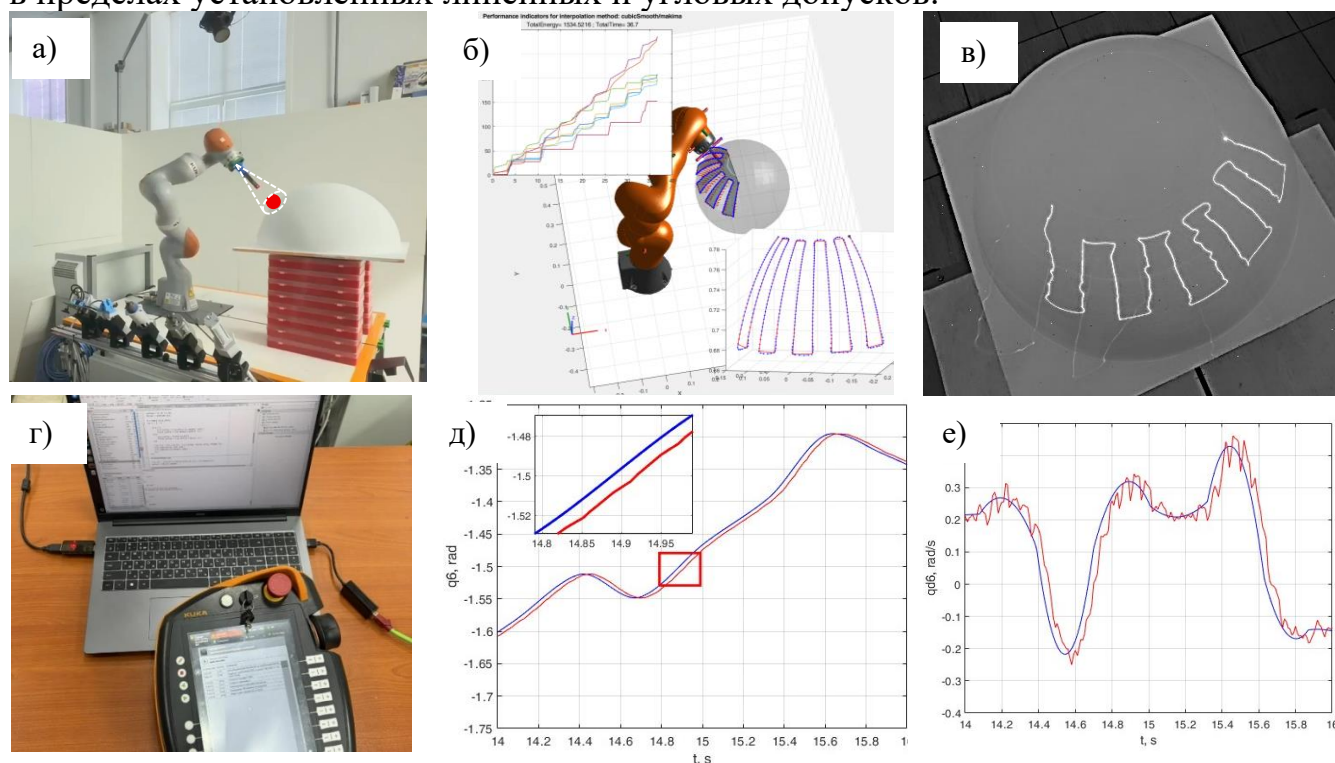


Рисунок 17 – Эксперимент: а – КРТК; б – траектория перемещения ЦТИ КР по имитационной модели; в - траектория перемещения пятна лазера; г – интерфейс управления; д – графики изменения угла положения q_6 КР; е – графики изменения угловой скорости $\dot{q}_6$ КР

Апробация предложенных решений при синтезе закона управления КР в задачах исполнения ВП и ВХ продемонстрировано на примере КРТП механообработки и нанесения полимерных материалов в недетерминированной среде (рис. 18, 19).

Усредненные экспериментальные и модельные данные результатов разрешения коллизии представлены в табл. 5. На рис. 20 а) представлен пример фазовой траектории переменных состояния шарнира КР на примере одного движения.

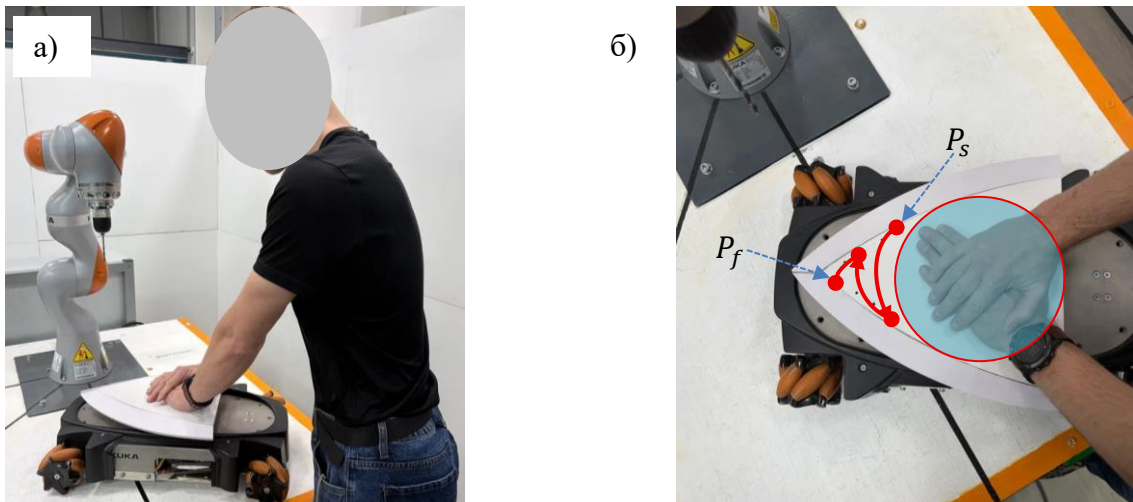


Рисунок 18 – Рабочая зона КРТП механообработки (с участием оператора)

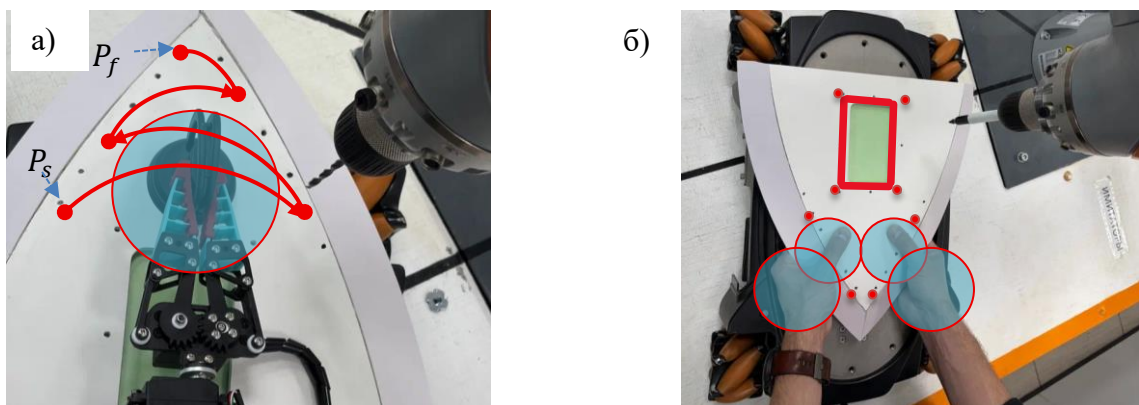


Рисунок 19 – Рабочая зона КРТП: а – механообработки; б - нанесения полимерных материалов (ПМ) по периметру люка (установлен имитатор автоматического дозатора ПМ)

Данные эксперимента подтверждают обозначенные зависимости, составленные по имитационной модели, и определяют целесообразность варьирования алгоритмами для исполнения каждой конкретной части ТО. Анализ графиков изменения переменных состояния шарниров КР позволяет сделать заключение об отсутствии отклонения от установленных линейных и угловых допусков.

Таблица 5 – Усредненные экспериментальные и модельные данные результатов разрешения коллизии алгоритмами RRT, CHOMP, PTS и RLOS

	RLOS	RRT	CHOMP	PTS
P_r^+ , % (эксперимент)	75,3	88,5	91,33	95,1
P_r^+ , % (модель)	76,8	89,8	93,6	94,3
$\bar{t}_{calc}^+$, с (эксперимент)	0,351	1,539	0,730	0,135
k_{ratio}^E (эксперимент)	3,15	1,04	1,16	1,98
k_{ratio}^E (модель)	2,63	1,08	1,26	1,54

Были проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности предложенного полного комплекса решений на имитационной модели КРТП. Выполнен расчет и оценка интегральных показателей для варианта ТП, характеризующегося недетерминированной рабочей сценой при $Pr=0,2$, при этом АСУТП оснащена механизмом разрешения коллизий.

Сравнение эффективности алгоритмов разрешения коллизий по группе показателей, приведены на рис. 20 б). Установлен общий положительный эффект от применения механизма разрешения коллизий.

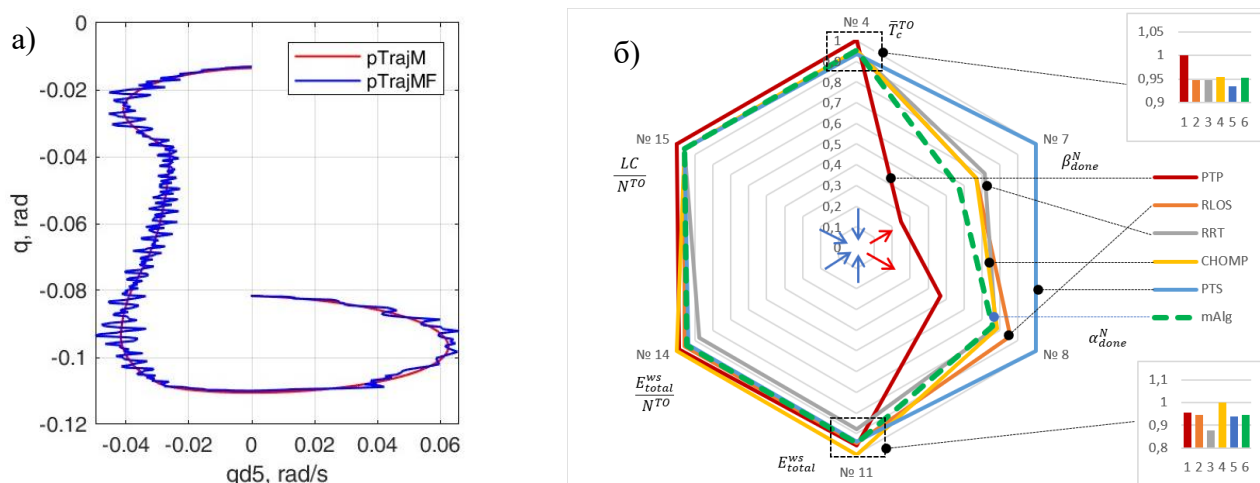


Рисунок 20 – Результаты эксперимента: а – фазовая траектория для пятого шарнира КР при движении для алгоритма RLOS; б – сравнение эффективности алгоритмов разрешения коллизий

Результаты экспериментов подтверждают предлагаемые автором теоретические подходы. Показано, что реализация механизма автоматического планирования и реализации движений по исполнению ТПд, ВП и ВХ методом программного управления в реальном времени на промышленном оборудовании позволяет обеспечить требуемую точность позиционирования ЦТИ в пределах установленных угловых и линейных допусков. При этом удастся оптимизировать движения по исполнению частей ТО в соответствии с актуальными критериями качества в условиях недетерминированной среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе при решении научно-исследовательской проблемы современной теории ситуативного управления – идентификации слабоструктурированных объектов управления и выявлении критериев оптимального управления ими – разработаны комплекс моделей и методов, а также технологии их синтеза, образующие формализованную методологию оптимального управления движениями робота в недетерминированной среде коллаборативного роботизированного технологического процесса в рамках оригинального подхода применения базы знаний редуцированных пространств. Уникальность подхода заключается в адаптивном использовании методов и алгоритмов оптимального управления движением коллаборативного робота в зависимости от текущего состояния рабочей зоны. Систематизация и интеграция результатов исследований позволила обобщить актуальные знания в форме теоретических основ управления и методов проектирования оптимальных коллаборативных роботизированных технологических процессов в недетерминированной среде.

На основании изложенного сформулированы следующие выводы:

1) Предложенные теоретические основы оптимального управления КРТП расширяют классическую теорию ситуационного управления за счет включения спецификации недетерминированной среды, определенную наличием взаимодействия КР и человека.

2) Сформированы и впервые формализованы функциональные и интегральные взаимосвязи компонентов КРТП промышленных предприятий, что позволяет проектировать производственные системы, включающие КР, на основе оптимальных принципов управления.

3) Показано, что необходимым условием возможности оптимального управления движением КР в совместной с оператором рабочей зоне при различных сцена-

риях недетерминированной среды и типах ТО является наличие комплекса специализированных математических моделей, детерминирующих КРТП.

4) Установлено, что предложенный многофункциональный комплекс математических моделей КРТП и его компонентов, включая МЧФ, позволяет существенно расширить адаптивные свойства АСУ, повысить оперативность синтеза оптимального закона управления с учетом знаний о полной ситуации.

5) Установлена возможность и доказана эффективность применения предложенного метода снижения размерности задач оптимального управления КРТП за счет введения ограничений ОП и КП КР, обеспечивающих эффективные для текущей ТО пространственные расположения ЦТИ.

6) Выявлено, что предложенные подходы к проектированию оптимальных КРТП и алгоритмическое обеспечение по управлению и оптимизации движения КР в недетерминированной среде позволяют существенно повысить эффективность исполнения ТО по критериям максимизации производительности, минимизации энергопотребления и максимизации степени безопасности оператора в рабочей зоне.

7) Выявлены необходимый набор элементов аппаратного обеспечения КРТК и комплекс требуемых компонентов программного обеспечения ИСУ КРТП, позволяющие обеспечить исполнение алгоритмических, информационных и программных задач по управлению и оптимизации режимов функционирования КРТП.

8) Показана высокая эффективность и работоспособность предложенного механизма автоматического планирования и исполнения движений методом программного управления в недетерминированной среде. Реализация механизма в разработанном специализированном программном обеспечении позволяет гарантировать требуемую точность позиционирования центральной точки инструмента на промышленном роботизированном оборудовании в режиме реального времени в соответствии с настраиваемыми критериями качества

9) Экспериментально доказана и подтверждена эффективность предложенных теоретических подходов и технических решений по оптимальному управлению КРТП в недетерминированной среде при различных типах ТО. Показано, что в среднем удалось сократить среднее время исполнения ТО на 6,7 %, увеличить показатель ритма производства на 4,5 %, снизить общую потребленную энергию за смену (E_{total}^{ws}) на 8,2 %, снизить энергоемкость ТО на 11,1 %, снизить удельные трудозатраты на 4,4 % и в целом обеспечить повышение степени безопасности оператора и сохранность оборудования КРТК.

Перспективы дальнейших разработки темы. Наиболее перспективное направление развитие теории и практики оптимального управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами связано с созданием интегрированных систем управления в рамках концепции цифровых фабрик для человекоориентированных производственных систем. Такие системы являются сложными и комплексными в силу высокой степени недетерминированности входящих в них объектов управления и в настоящее время не созданы и не внедрены на промышленном производстве. Материалы диссертации дают возможность успешного проектирования и синтеза эффективных взаимосвязей внутри систем человекомашинного взаимодействия и развития производственной роботизиро-

ванной инфраструктуры с целью формирования синергетических эффектов и повышения степени интеллектуализации систем управления.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в российских журналах из перечня ВАК РФ и/или RSCI:

1. **Горькавый, М. А.** Планирование и оптимизация движений коллаборативного робота при разрешении коллизий в ограниченном операционном пространстве / М. А. Горькавый // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2025. – Т. 68. – № 3. – С. 56-69.
2. Автоматизация выбора метода интерполяции при планировании движения коллаборативного робота в технологических операциях механической обработки / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, В. А. Соловьев, А. И. Горькавый // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2025. – № 3. – С. 96-105.
3. Анализ эффективности алгоритмов интерполяции траекторий перемещения коллаборативного робота-манипулятора в технологическом процессе сверления / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, В. А. Соловьев, А. И. Горькавый // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2025. – Т. 68, № 1. – С. 38-48.
4. Синтез нечеткой модели энергопотребления промышленного робота на базе гибридных систем управления электрическим приводом / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый, А. С. Гудим // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2024. – Т. 67, № 2. – С. 45-55.
5. **Горькавый, М. А.** Оптимизация роботизированного технологического процесса на базе нейросетевой имитационной модели энергопотребления / М. А. Горькавый, А. И. Горькавый, М. А. Мельниченко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66, № 2. – С. 85-95.
6. Алгоритмы поиска энергоэффективного положения комплекса траекторий движения промышленного робота в составе технологического процесса / **М. А. Горькавый**, А. Ю. Ефимов, В. П. Егорова, В. А. Соловьев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 84-91.
7. **Горькавый, М. А.** Алгоритм планирования движения коллаборативного робота при разрешении коллизий на базе RL агента / М. А. Горькавый // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2026. – Т. 25, № 2. – С. 172-184.
8. **Горькавый, М. А.** Последовательное применение алгоритмов разрешения коллизий в технологическом методе планирования движений коллаборативного робота / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко // Программные продукты и системы. – 2026. – № 3(8). – С. 401-412.
9. **Горькавый, М. А.** Синтез имитационной модели энергопотребления промышленного робота на базе нейросетевых модулей систем управления электрическим приводом / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, В. Д. Ворощенко // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 2-1(68). – С. 317-325.
10. Внедрение интеллектуальных роботизированных систем в производственные процессы судостроительного предприятия / **М. А. Горькавый**, А. И. Горькавый, А. С. Гудим [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2(52). – С. 97-104.
11. Экспериментальные исследования алгоритмов планирования движений коллаборативных роботов в автоматизированных технологических комплексах / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, В. Д. Ворощенко, Е. П. Иванкова // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4-3(70). – С. 66-75.

12. **Горькавый, М. А.** Функциональная модель инфраструктуры синтеза коллаборативных роботизированных технологических процессов / М. А. Горькавый, А. И. Кучерова, А. И. Горькавый // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4-3(70). – С. 76-85.
13. **Горькавый, М. А.** Дискретно-событийная модель автоматизированного технологического процесса нанесения лакокрасочных покрытий на крупногабаритные детали сборочных единиц / М. А. Горькавый, А. И. Кучерова, А. И. Горькавый // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4-3(70). – С. 99-109.
14. Алгоритм поиска оптимальных параметров движения при прямолинейных технологических переходах коллаборативного робота / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, В. А. Соловьев, А. И. Горькавый // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2024. – № 5 (77). – С. 22–35.
15. Кучерова, А. И. Исследование роботизированных процессов покраски деталей сборочных единиц авиационного назначения / А. И. Кучерова, Е. П. Иванкова, **М. А. Горькавый** // Ученые записки КнАГТУ. – 2025. – № 7(87). – С. 35-42.
16. **Горькавый, М. А.** Оптимизация режима позиционного управления коллаборативным роботом в технологическом процессе / М. А. Горькавый // Ученые записки КнАГТУ. – 2025. – № 7(87). – С. 58-65.
17. Ворощенко, В. Д. Моделирование столкновений подвижных объектов в роботизированном технологическом процессе / В. Д. Ворощенко, **М. А. Горькавый** // Ученые записки КнАГТУ. – 2024. – № 1(73). – С. 82-89.
18. Разработка архитектуры системы управления роботизированным производственным процессом на базе технологии цифрового двойника / **М. А. Горькавый**, В. П. Егорова, В. А. Соловьев [и др.] // Ученые записки КнАГТУ. – 2023. – № 1(65). – С. 40-46.
19. Ворощенко, В. Д. Интеллектуальный модуль оптимизации и управления эффективностью производственного процесса на базе агентной имитационной модели / В. Д. Ворощенко, В. П. Егорова, **М. А. Горькавый** // Ученые записки КнАГТУ. – 2023. – № 1(65). – С. 85-93.
20. Автоматизация расчёта кинематики шестиосевого промышленного робота и моделирование его траекторных перемещений / **М. А. Горькавый**, А. И. Горькавый, М. А. Мельниченко, В. П. Егорова // Ученые записки КнАГТУ. – 2023. – № 7(71). – С. 40-49.
21. Исследование особенностей применения метода функциональной декомпозиции при разработке имитационных моделей цифрового двойника роботизированного процесса / **М. А. Горькавый**, В. П. Егорова, А. И. Горькавый, М. А. Мельниченко // Ученые записки КнАГТУ. – 2022. – № 3(59). – С. 27-34.
22. Исследование процессов энергопотребления промышленного робота-манипулятора с помощью систем внешней сенсорики / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, Р. Д. Григорец, Н. С. Шушарин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 5. – С. 486-491.
23. Специфика архитектуры цифрового двойника коллаборативного роботизированного процесса на базе мультиагентных систем / **М. А. Горькавый**, А. И. Горькавый, В. А. Соловьев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 4. – С. 147-156.
24. Горькавый, А. И. Компенсация возмущений в системе управления мехатронным модулем с оптимальным регулятором / А. И. Горькавый, **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 6. – С. 57-61.

25. **Горькавый, М. А.** Синтез нечеткой модели компетенций технического персонала промышленного предприятия / М. А. Горькавый, В. А. Соловьев // Информатика и системы управления. – 2010. – № 1(23). – С. 128-140.
26. **Горькавый, М. А.** Нечеткий подход к оценке компетентности технического персонала промышленного предприятия / М. А. Горькавый, В. А. Соловьев // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 3(18). – С. 63-72.
27. **Горькавый, М. А.** Автоматизация синтеза нечетких подсистем экспертной системы промышленного предприятия / М. А. Горькавый, В. А. Соловьев // Ученые записки КНАГТУ. – 2010. – Т. 1, № 1. – С. 27-35.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах Scopus и/или Web of Science:

28. **Gorkavyy, M.** Improving collaborative robotic complex efficiency: an approach to the intellectualization of the control system / M. Gorkavyy, Y. Ivanov, S. Sukhorukov, S. Zhiganov, M. Melnichenko, A. Gorkavyy, D. Grabar // Engineering Proceedings. – 2023. – Vol. 33, iss. 1. – Article 18.
29. Automated method based on a neural network model for searching energy-efficient complex movement trajectories of industrial robot in a differentiated technological process / **M. A. Gorkavyy**, A. I. Gorkavyy, V. P. Egorova, M. A. Melnichenko // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 11.
30. Generalized functioning algorithm and conceptual description of the main models of a synergetic system based on a collaborative robot / **M.A. Gorkavyy**, Y.S. Ivanov, M.A. Melnichenko, D.B. Solovev // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2910. – Art. 020149.
31. Hybrid approach to synthesis of electromechanical block control system of mechatronic module / A.I. Gorkavyy, **M.A. Gorkavyy**, M.A. Melnichenko, A.A. Kuznetsov // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2700. – Art. 040010.
32. **Gorkavyy, M.A.** Development of RL DDPG agent for planning energy-efficient trajectory of collaborative robot / M.A. Gorkavyy, V.D. Voroshchenko, A.I. Gorkavyy // Materials of the International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – Sochi, Russia, 2025. – P. 472–476.
33. **Gorkavyy, M.** Research the potential for energy saving and maximizing productivity in rectilinear transitions of a collaborative robot / M. Gorkavyy, Y. Ivanov, M. Melnichenko // Materials of the International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – 2024. – P. 912.
34. **Gorkavyy, M. A.** Process automation for robot-based manufacturing components of prospective aviation complexes / M. A. Gorkavyy, V. P. Egorova, A. Y. Efimov // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 187-195.
35. Improving the functioning of the cybernetic control system of the mechatronic module of the robotic complex / A. I. Gorkavyy, **M. A. Gorkavyy**, M. A. Melnichenko, A. V. Berkh // Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. Proceedings of 10th Computer Science On-line Conference 2021, Vol. 3 : Proceedings of 10th Computer Science On-line Conference, online, 21 апреля – 02 2021 года. – online, 2021. – P. 702-709.
36. Optimization of technological parameters of robotized mechanical processing processes of aviation products / A. Y. Efimov, **M. A. Gorkavyy**, V. P. Egorova, A. I. Gorkavyy // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 204-215.
37. Melnichenko, M. A. Combined control in the system with modal pi-regulator / M. A. Melnichenko, A. I. Gorkaviy, **M. A. Gorkaviy** // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 507-517.

38. Efimov, A. Predicting power consumption of robotic complex based on neuro-fuzzy system / A. Efimov, **M. Gorkavyy**, A. Gorkavyy // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, 2020. – P. 9112066.
39. Synthesis of an optimally-modal PI-regulator in a position control system of mechatronic module / M.A. Melnichenko, A.I. Gorkaviy, **M.A. Gorkaviy**, D.B. Solovev // Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2020. – P. 9271322.
40. Algorithmization and principles of construction of information support of the automated module for energy outlays optimization of technological processes at robotized productions / **M.A. Gorkavyy**, A.S. Gudim, A.Y. Efimov, D.B. Solovev // Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2018. – P. 8602433.
41. Intelligent system for prognostication and optimization of power expenses of technological processes at robotized productions / **M.A. Gorkavyy**, A.S. Gudim, A.Y. Efimov, D.B. Solovev // Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2018. – P. 8602503.
42. Improving the efficiency of automated precision robotics-enabled positioning and welding / A.Y. Efimov, **M.A. Gorkavyy**, A.I. Gorkavyy, D.B. Solovev // Proceedings of the International Science and Technology Conference «EastConf». – Vladivostok, 2019. – P. 8725362.
43. Design of intelligent decision support system for robotized welding technological processes optimization / A.Y. Efimov, **M.A. Gorkavyy**, V.P. Egorova, D.B. Solovev // Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2019. – P. 8933908.
44. Synthesis of modal PI-regulator with multiple integration / A.I. Gorkaviy, **M.A. Gorkaviy**, M.A. Melnichenko, D.B. Solovev // Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2019. – P. 8934225.
45. Synthesis of an adaptive system for diagnosing the quality of automated welding products / V.P. Egorova, **M.A. Gorkavyy**, A.Y. Efimov, D.B. Solovev // Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2019. – P. 8934286.
46. **Gorkavyy, M.A.** Conceptual model of intelligent system supporting situation evaluation, forecast and control at power grid companies / M.A. Gorkavyy, A.I. Gorkavyy, V.A. Solovyev // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Chelyabinsk, 2017. – P. 8076136.
47. Robotic technological processes optimization in the context of digital transformation of industry / M. Melnichenko, **M. Gorkavyy**, Y. Ivanov, A. Gorkavyy // The Future of Industry. – Cham: Springer, 2024. – P. 249–269. – (Lecture Notes in Information Systems and Organization).
48. **Gorkavyy, M.A.** Research of the impact of trajectory algorithms interpolation on energy efficiency and operation execution time for collaborative robots / M.A. Gorkavyy, V.D. Voroshchenko, Y.S. Ivanov // Intelligent Systems : Proceedings of the 16th International Conference on Intelligent Systems (INTELS 2024, Moscow, Russia, December 2–4, 2024). – Moscow : Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2025. – P. 285–299. – (Communications in Computer and Information Science ; vol. 1770).

49. Melnichenko, M.A. Mathematical description of atypical scenarios in a robotic process discrete-event model / M.A. Melnichenko, A.I. Kucheroва, **M.A. Gorkavyy** // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2025): Conference Proceedings. – Sochi, 2025. – P. 649–654. – (Lecture Notes in Mechanical Engineering ; vol. 11236).
50. Voroshchenko, V.D. Development of an automation module for planning trajectories for painting aircraft fuselage elements / V.D. Voroshchenko, **M.A. Gorkavyy**, A.S. Gudim // Advances in Automation VI (RusAutoCon 2024) : Conference Proceedings. – Springer, 2025. – P. 75–84. – (Lecture Notes in Electrical Engineering ; vol. 1324).
51. **Gorkavyy, M.** Development of a system for detecting production parts within the framework of technological processes in the aviation industry / M. Gorkavyy, A. Gudim, A. D. Grabar // International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2024). – 2024. P. 992-997.
52. Grabar, D.M. Software and hardware platform development for the synthesis of adaptive algorithms and methods for controlling the behavior of collaborative robotic system / D.M. Grabar, **M.A. Gorkavyy**, Y.S. Ivanov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2024). – 2024. – P. 824–830.
53. **Gorkavyy, M.A.** Identification of the functioning modes of a robotic technological process based on a discrete-event model / M.A. Gorkavyy, Y.S. Ivanov, D.M. Grabar // International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2023). – 2023. – P. 796–800.
54. **Gorkavyy, M.A.** Modeling of operator poses in an automated control system for a collaborative robotic process / M.A. Gorkavyy, V.D. Voroshchenko, A.S. Gudim // International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2023). – 2023. – P. 680–684.
55. Human factor modelling in the collaborative robotic process control system / **M.A. Gorkavyy**, Y.A. Tyurina, Y.S. Ivanov, D.M. Grabar // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): Proceedings. – Sochi, 15–19 May 2023. – P. 954–960.
56. Hybrid model process design of joint operator-robot interaction within a synergistic system / **M. A. Gorkavyy**, Y. S. Ivanov, D. M. Grabar, D. B. Solovev // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2910, iss. 1. – Art. 020150.

Монография

57. Оптимизация режимов работы роботизированных технологических процессов средствами вычислительного интеллекта / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, В. А. Соловьев, Д. М. Грабарь. – Старый Оскол : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2026. – 192 с. – ISBN 978-5-94178-924-5.

Патенты и зарегистрированные программы для ЭВМ:

58. Патент № 2831288 С1 РФ, МПК В25J 9/00. Способ оптимизации положения обрабатываемой заготовки для сокращения энергозатрат промышленного робота в технологическом процессе механообработки: № 2024105025: опубл. 03.12.2024 / М. А. Мельниченко, **М. А. Горькавый**, А. С. Гудим.
59. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022668069 РФ. Программа синтеза нейросетевой имитационной модели энергопотребления и оптимизации комплекса траекторий перемещений робота манипулятора в ограниченном пространстве задач технологического процесса позиционирования: № 2022666799: опубл. 04.10.2022 / **М. А. Горькавый**, А. И. Горькавый, В. П. Егорова [и др.].
60. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025661813 РФ. Программа вычисления параметров движения коллаборативного робота в конфигурационном пространстве для задачи перемещения центральной точки инструмента по

прямолинейной траектории в операционном пространстве: опубл. 13.05.2025 / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый, С. Е. Мельникова.

61. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025661923 РФ. Программа вычисления параметров движения коллаборативного робота в конфигурационном пространстве для задачи перемещения центральной точки инструмента по дуге окружности в операционном пространстве: опубл. 14.05.2025 / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый, В. В. Геращенко.

62. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025662013 РФ. Программа вычисления параметров движения коллаборативного робота в конфигурационном пространстве для задачи перемещения центральной точки инструмента от точки к точке в операционном пространстве: опубл. 16.05.2025 / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, А. И. Кучерова, Н. П. Бобровский.

63. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024617307 РФ. Программа оптимизации траектории перемещения коллаборативного робота в пространстве задач по взвешенной сумме критериев максимизации производительности и энергоэффективности: № 2024616250: опубл. 01.04.2024 / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, Ю. С. Иванов [и др.].

64. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024660568 РФ. Программа поиска энергоэффективного положения заготовки детали внутри рабочей зоны робота-манипулятора, входящего в состав роботизированного технологического комплекса механической обработки: № 2024618944: опубл. 08.05.2024 / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, Ю. С. Иванов [и др.].

65. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024688368 РФ. Программа обнаружения коллизий и перепланирования отдельных траекторий перемещения коллаборативного робота : № 2024687316: опубл. 27.11.2024 / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый, Д. М. Грабарь.

66. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024688555 РФ. Программа оптимизации траекторий вспомогательных переходов коллаборативного робота в технологическом процессе сверления : № 2024687081: опубл. 28.11.2024 / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый, Д. М. Грабарь.

67. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024688595 РФ. Программа обучения RL DDPG агента для планирования энергоэффективной траектории коллаборативного робота по критерию минимизации затрат электрической энергии: № 2024687312: опубл. 28.11.2024 / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, В. Д. Ворощенко, А. И. Горькавый.

68. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023614080 РФ. Программа управления коллаборативным роботом с внешнего устройства на базе нейросетевых алгоритмов: опубл. 22.02.2023 / **М. А. Горькавый**, М. А. Лямин, М. А. Мельниченко [и др.].

69. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023666745 РФ. Программа обнаружения факта коллизии аппроксимирующих тел моделей подвижных объектов роботизированного комплекса: № 2023666051: опубл. 04.08.2023 / В. Д. Ворощенко, **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый.

70. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023667029 РФ. Программа для автоматизированного расчета прямой задачи кинематики общепромышленных и коллаборативных роботов KUKA: № 2023666318: опубл. 09.08.2023 / **М. А. Горькавый**, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый [и др.].

71. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022668069 РФ. Программа синтеза нейросетевой имитационной модели энергопотребления и оптимизации комплекса траекторий перемещений робота манипулятора в ограниченном пространстве задач технологического процесса позиционирования: № 2022666799: опубл. 04.10.2022 / **М. А. Горькавый**, А. И. Горькавый, В. П. Егорова [и др.].

72. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020664545 РФ. Программа оптимизации комплекса траекторий движения и повышения энергоэффективности промышленного робота, входящего в состав автоматизированного технологического процесса: № 2020617707: опубл. 13.11.2020 / **М. А. Горькавый**, А. Ю. Ефимов, В. В. Болдырев, В. П. Егорова.

Личный вклад автора. Все результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Для всех направлений исследований, представленных в диссертации, автором самостоятельно выполнены работы по обоснованию актуальности, формулированию объекта и предмета, формализации концепции, постановке целей и задач теоретических и экспериментальных исследований, определению методологии, непосредственному проведению теоретических исследований и экспериментов, системному анализу и интерпретации результатов, обобщению полученных результатов и прогнозированию перспектив развития.

Личный вклад автора в публикациях с соавторами кратко характеризуется следующим образом: в работах [12, 18, 19, 20, 23, 48] автором сформированы функциональные модели интеграции, общие модели управления КРТП и их цифровых двойников; в работах [13, 50, 54] предложены дискретно-событийные модели КРТП учитывающие технологические особенности функционирования КР и человека в совместном пространстве при различных сценариях недетерминированной среды и типах ТО. Соискателем разработаны теоретические основы проектирования КРТП в условиях специфики авиа- и судостроительного производств [10, 15, 34, 43]; интеллектуализации АСУ КРТП [21, 28, 13]; идентификации СУЭП КР [24, 31, 35, 37, 39, 44] и оценки энергопотребления робота [33, 40, 41] для синтеза упрощенных нечетких, нейро-нечетких и нейросетевых моделей [4, 5, 9, 22, 33, 38, 40, 41, 46]; формализации человеко-машинного взаимодействия [26, 27, 30], в рамках предложенных моделей [17, 25, 54 - 56]. В работах [11, 14, 16, 36, 42, 45, 50] соискателем сформулированы методологические основы оптимизации управления КР в технологических процессах позиционирования, сборки, сварки, окрашивания и механообработки; в работах [2, 48, 3] разработаны методы оптимизации движений КР при интерполяции пути; в работах [6, 29, 32] – методы оптимального управления по критерию минимизации энергопотребления с помощью нейросетевых и RL-агентов; в работах [1, 7, 8, 51] – автором синтезированы методы оптимизации движений КР при разрешении коллизий. В работах [6, 7, 11, 14, 20, 48, 52, 57, 58–72] соискателем сделан вклад в разработку алгоритмического и информационного обеспечения разработанных методов.