

На правах рукописи

Кувшинников Владимир Сергеевич

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ
МЕХАТРОННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ В ЦИФРОВОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**

Специальность: **2.3.3** – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Брянск – 2022

Работа выполнена в Научно-инженерной и образовательной лаборатории цифровых компьютерных систем и автоматизации НИКИМТ акционерного общества «Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии – Атомстрой» (предприятие Госкорпорации Росатом).

Научный
руководитель: **Ковшов Евгений Евгеньевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты: **Фролов Евгений Борисович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
профессор кафедры информационных технологий и
вычислительных систем (ИТиВС)

Крахмалев Олег Николаевич
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Финансовый университет при
Правительстве Российской Федерации»
доцент департамента анализа данных и машинного
обучения

Ведущая
организация: Федеральное государственное автономное
учреждение науки Институт конструкторско-
технологической информатики Российской академии
наук (ИКТИ РАН)

Защита состоится «24» мая 2022 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 99.0.033.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» и Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет», по адресу: Россия, 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д.10-Б, учебный корпус №4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», а также на сайте университета <https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/kuvshinnikov-vladimir-sergeevich>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 99.0.033.02
кандидат технических наук, доцент

В.А. Хандожко

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Автоматизация производственных процессов и машиностроительных производств в виде глобального замещения человеческого труда на предприятиях машинами различных видов и робототехническими устройствами – распространённое явление во всех отраслях. Атомная отрасль, с самого основания находящаяся на пике научного прогресса в энергомашиностроении, испытывает потребность в специализированном технологическом оборудовании для решения нетривиальных задач в неблагоприятных для человека условиях при растущих объёмах строительства объектов атомной энергетики.

В качестве группы задач в структуре автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) выступают задачи, связанные с формированием траекторий перемещения как исполнительного органа технологической машины, так и материалов, непосредственно используемых в технологическом процессе. От уровня автоматизации технологических процессов зависит работоспособность, надёжность и безопасность промышленных автоматизированных систем в атомной отрасли.

Для управления специализированными технологическими объектами на практике нередко прибегают к «ручному» методу алгоритмизации маршрутов, алгоритмам с последовательным перемещением звеньев и к управлению оператором. Эти решения позволяют оперативно добиться работоспособности оборудования в пределах имеющихся ограничений на этапе внедрения, но приводят к росту подготовительного и подготовительно-заключительного времени, повышенному вовлечению обслуживающего персонала в процесс эксплуатации технологических объектов в опасной среде, полный или частичный отказ от универсальности и гибкости автоматизированной системы при управлении перемещениями. Перечисленные недостатки сказываются на этапах сопровождения и эксплуатации человеко-машинных систем.

В зависимости от особенностей технологического процесса и реализованного уровня автоматизации, снижение влияния негативных факторов окружающей среды возможно путём автоматизации формирования траекторий и маршрутов перемещения. Исходя из вышеизложенного, структуризация и организация специализированного программного обеспечения автоматизированных систем управления с применением методов и моделей интеллектуального анализа в АСУ ТП, является **актуальной** научной задачей.

Степень разработанности проблемы. Задача поиска пути и формирования траектории сохраняет актуальность во многих направлениях научно-практических задач. Она широко исследована в работах многих авторов: Э.В. Дейкстра, П.Э. Харт, Э.Ф. Мур, С.М. Лаваль, Д.Д. Харabor и других авторов. В зависимости от способа формализованного описания задачи для поиска пути могут применяться различные инструменты. Одним из подходов является метод на основе нейронной карты, исследованный в работах таких авторов, как: Р. Гласиус, А. Комода и С.С. Гилен, М.Г. Лагудакис, получивший развитие в работах: Д.В. Лебедева, Й.Д. Стейла и Х. Риттер. Кроме того, находят применение методы эволюционного моделирования, исследованные в работах В.М. Курейчика, В.В. Курейчика, И.П.

Норенкова, Т.В. Панченко, Д.И. Батищева, Л.А. Демидовой, Л.А. Гладкова и других отечественных и зарубежных учёных и исследователей.

Высоко оценивая вклад вышеперечисленных исследователей и результаты проведённой ими работы, отметим, что в контексте особенностей управления специализированными мехатронными устройствами, существует ряд нерешённых научно-практических задач. В их числе: выбор и адаптация метода формирования траектории для управления специализированным мехатронным устройством-манипулятором в неоднородном трёхмерном пространстве, поиск способа формализованного описания и решения задачи формирования схемы перемещений мехатронного устройства-манипулятора в условиях ограничений и другие.

Объектом исследования диссертационной работы являются автоматизированные системы управления специализированными мехатронными устройствами в цифровом производстве.

Предметом исследования диссертационной работы являются модели представления данных, программно-алгоритмическое обеспечение для решения задачи поиска траекторий и формирования маршрутов движения специализированных мехатронных устройств с распределённой системой управления и применением средств интеллектуализации.

Целью работы является интеллектуализация формирования траекторий и маршрутов специализированных мехатронных устройств в условиях неоднородности рабочей зоны.

Для достижения указанной цели сформулированы и решены следующие **научные задачи**:

1. Анализ ограничений, налагаемых условиями эксплуатации и техническими требованиями на системы управления мехатронными устройствами в составе специализированных технологических комплексов в цифровом производстве.

2. Разработка обобщенной архитектуры интеллектуального управления мехатронными устройствами с распределённым управлением.

3. Анализ методов решения задач формирования траектории движения и маршрутов мехатронных устройств и выбор предпочтительных методов.

4. Разработка математических моделей и проведение вычислительных экспериментов для решения задач формирования схем маршрутов и трёхмерных траекторий движения мехатронных устройств в неоднородном пространстве.

5. Анализ результатов программной реализации полученных математических моделей с включением их в структуру прикладного программного обеспечения распределённых систем управления специализированными мехатронными устройствами.

Методы исследования. При выполнении диссертационных исследований использовались методы промышленной автоматизации, системного анализа, экспертных оценок, имитационного моделирования, визуализации многомерных поверхностей, машинного обучения, эволюционного поиска.

Достоверность и обоснованность научных положений, теоретических выводов и рекомендаций обеспечиваются корректным использованием математического аппарата, применением интеллектуальных методов на основе нейронных карт и генетических алгоритмов. Достоверность подтверждается результатами вычислительных экспериментов, компьютерного моделирования,

экспериментальной апробацией и практическим применением результатов диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана модель формирования траектории движения исполнительного органа специализированного мехатронного устройства в пространстве с препятствиями, отличающаяся её трехмерным представлением и учетом неоднородности рабочего пространства (п. 19 – «*Цифровизация управления в промышленности, функциональное моделирование объектов автоматизации.*»).

2. Разработана параметрическая модель создания схемы маршрутов автоматизированного перемещения грузов для специализированного мехатронного устройства, отличающаяся способом представления решений и формирования пространства поиска с учётом набора выполняемых технологических операций (п. 19 – «*Цифровизация управления в промышленности, функциональное моделирование объектов автоматизации.*»).

3. Предложены интеллектуальные методы формирования маршрутов и траекторий для систем управления специализированными мехатронными устройствами в цифровом производстве, отличающиеся алгоритмическими решениями и инвариантностью их промышленного применения (п. 14 – «*Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.)*»).

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с пунктами 14, 19 паспорта специальностей научных работников по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Теоретическая значимость состоит в развитии интеллектуальных методов и вычислительных алгоритмов поиска решения в части обобщенных решений прикладных задач управления специализированными мехатронными устройствами с учетом характерных особенностей технологической среды.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработанных алгоритмических и прикладных программных решениях для автоматизированных систем управления специализированными технологическими устройствами и оборудованием.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель распределённого управления специализированными мехатронными устройствами в составе автоматизированного технологического оборудования с блоком интеллектуальных вычислений.

2. Модель цифрового представления исходных данных для автоматического формирования схемы маршрутов движения специализированных мехатронных устройств в составе технологического оборудования.

3. Метод формирования схемы маршрутов движения мехатронных устройств с применением эволюционных вычислений.

4. Метод формирования опорных точек траектории движения мехатронных устройств в трехмерном пространстве на основе искусственной нейронной сети, представленной в виде нейронной карты.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению/внедрены при создании автоматизированной

системы неразрушающего контроля и ремонта облицовки бассейна выдержки объектов атомной энергетики; определена целесообразность применения результатов исследования для разработки прикладного программного обеспечения автоматизированного управления технологическими установками участков комплекса переработки твёрдых радиоактивных отходов (ТРО) при разработке интеллектуальных систем управления автоматизированными технологическими участками на АЭС; материалы диссертационной работы используются при обучении специалистов по неразрушающему контролю согласно профессиональным стандартам и квалификациям: 40.108 – «Специалист по неразрушающему контролю» и 40.107 – «Контролер сварочных работ» (*Лицензия на осуществление образовательной деятельности №036809 от 30 ноября 2015 года, выдана Департаментом образования города Москвы (Приказ №1271Л от 30.11.2015) АО «НИКИМТ-Атомстрой», серия 77Л01 №0007618, на срок: бессрочно — Дополнительное профессиональное образование*). Все внедрения подтверждаются соответствующими актами и справками предприятий, организаций и/или их структурных подразделений, входящих в Госкорпорацию Росатом: АО «НИКИМТ-Атомстрой», «Эксперт-Центр НИКИМТ», Отраслевой центр компетенций «Неразрушающий контроль».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены и всесторонне обсуждены на международных и всероссийских научных и научно-практических конференциях: Международная научно-практическая конференция «Наука и образование в XXI веке» (28 февраля, 2018, Тамбов, Россия); Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании», СТНО-2018, (28 февраля - 02 марта, 2018, Рязань, Россия); International Conference on Psychology and Education, ICPE 2018, (25-26 июня, 2018, Москва, Россия); VIII международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА-2019», (29 мая - 01 июня, 2019, Санкт-Петербург, Россия); Международная научно-практическая конференция «Машиностроение и металлообработка», (10-11 октября, 2019, Могилёв - Бобруйск, Беларусь); Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» (1-3 октября, 2019, Москва, Россия); Всероссийская научная конференция «Цифровая трансформация в энергетике», (17-18 декабря, 2019, Тамбов, Россия); Международная научно-техническая конференция молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», (29-30 октября, 2020, Могилев, Россия); 13th International Symposium on Intelligent Systems, INTELS 2018, (22-24 октября, 2018, Санкт-Петербург, Россия); 2019 Workshop on Materials and Engineering in Aeronautics, MEA 2019, (16-17 октября, 2019, Москва, Россия); 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020, (10-13 ноября, 2020, Липецк, Россия); 1st International Scientific Conference «Advances in Science, Engineering and Digital Education», ASEDU-2020, (08-09 октября, 2020, Красноярск, Россия); IX международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА-2021», (25 августа - 28 августа, 2021, Санкт-Петербург, Россия), а также многократно заслушивались и всесторонне обсуждались на расширенных заседаниях секций научно-технического совета АО «НИКИМТ-

Атомстрой» «Информационные технологии и цифровые компьютерные системы» и «Методики и оборудование контроля состояния металла».

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 научная работа, включая 3 статьи в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, 4 статьи в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и Scopus, получены 3 Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 176 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и одиннадцати приложений. Список литературы включает в себя 132 источника.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационного исследования; формулируются цели и задачи исследования; представляются положения, выносимые на защиту; определяется практическая значимость и отражается новизна полученных научных результатов; приводится аннотированное описание разделов диссертации.

В **первой главе** исследуются роль и особенности специализированного мехатронного оборудования с позиций требований к системе управления. Выявлены актуальные направления для развития функций автоматизированных систем на объектах атомной энергетики на примере объектов завершающей части ядерного топливного цикла (ЗЧ ЯТЦ): повышение уровня автоматизации промышленных систем, повышение безопасности и сокращение участия персонала в основных и вспомогательных операциях при обработке радиоактивных отходов и обслуживании опасных объектов. Проведён анализ существующих решений на примере мехатронных устройств ЗЧ ЯТЦ: машины перегрузочной бассейна выдержки и мостового крана комплекса переработки ТРО. Определены особенности условий эксплуатации мехатронных устройств: высокий радиационный фон, наличие источников повышенного ионизирующего излучения в рабочей зоне, крупные габариты объектов управления, ограниченные возможности оснащения датчиками и видеокамерами, отсутствие готовых технических и технологических решений, работа в контакте с жидкими химически агрессивными средами, изменчивость конфигурации рабочей зоны. Выделены сопутствующие технические решения, определяющие особенности структуры и компонентов систем управления. Определены правила эксплуатации и технические ограничения, налагаемые на оборудование мехатронных устройств-манипуляторов в составе участка электрохимической дезактивации¹ (УЭХД) ТРО

¹ Комплекс по переработке радиационных отходов: здание Электрохимической дезактивации КП ТРО Курской АЭС. Кран координатный мостовой подвесной электрический специальный г/п 1,0 т [Электронный ресурс]: Техническое задание / С.Е.Крестников, Д.В.Плохотников. – СПб.: ООО «ЗПТО им. С.М.Кирова», ООО «УфаАтомХим-Маш», 2017 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

(рисунок 1а) и устройства ремонта облицовки бассейна выдержки² (УРОБВ) (рисунок 1б).

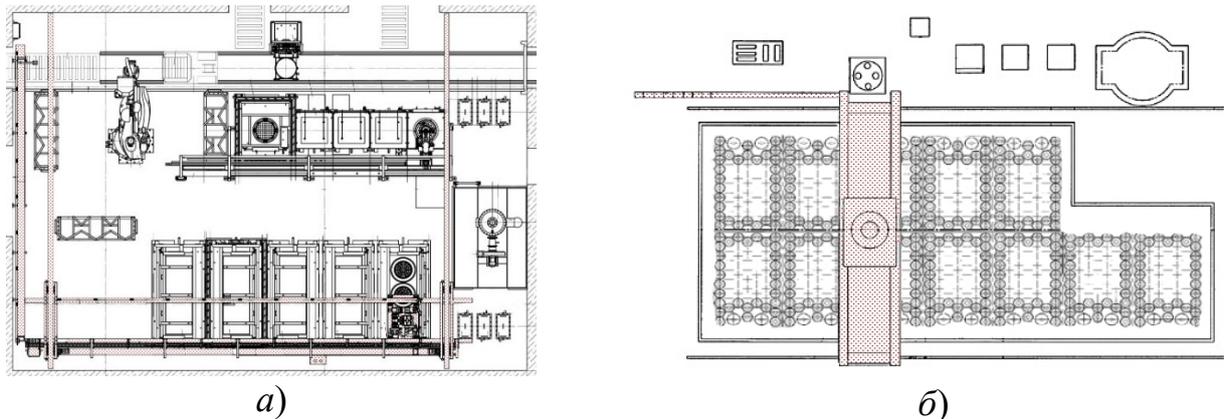


Рисунок 1 – Мехатронные устройства-манипуляторы УЭХД(а) и УРОБВ(б), установленные на технологических участках (вид сверху).

Требования ограничивают скорость перемещения звеньев манипуляторов от 1,2 до 5 м/мин, устанавливают правила попеременной работы групп приводов и соблюдения границ безопасных зон. Рассмотрен технологический процесс ремонта облицовки бассейна выдержки, применяемые рабочие модули, схемы проведения контроля (рисунок 2) и ремонта.

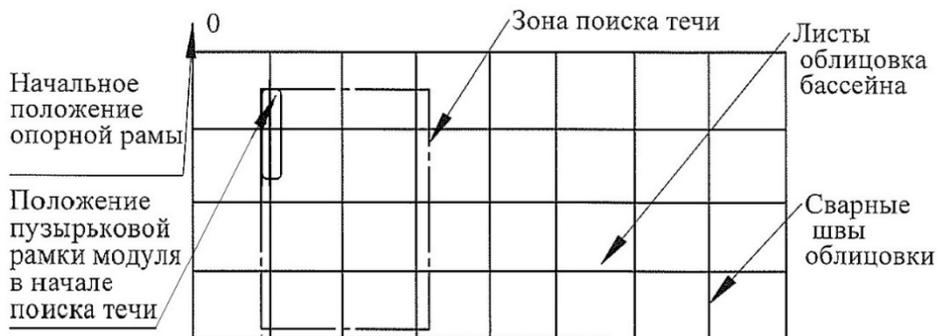


Рисунок 2 – Схема проведения контроля облицовки бассейна выдержки

На основе систематизированной информации о технологических процессах и выявленных особенностях рассматриваемого оборудования обосновывается востребованность, целесообразность и актуальность задачи автоматизированного формирования траекторий специализированных мехатронных манипуляторов в составе промышленных автоматизированных систем на основе создания и развития математических и программно-алгоритмических решений.

Во **второй** главе рассматриваются системы управления мехатронными манипуляторами в составе специализированных автоматизированных технологических комплексов и исследуются особенности архитектуры сетевой инфраструктуры объекта автоматизации, протоколов обмена данными, функций

² Устройство для ремонта облицовки бассейна выдержки : пат. 2661335 С1 Рос. Федерация: МПК G21C 17/01 / Карасев Н. И., Попов В. С., Просвирина В. П.; заявитель Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии-Атомстрой» (АО «НИКИМТ-Атомстрой»). – №2017143595; заявл. 13.12.2017; опубл. 16.07.2018, Бюл. № 20. – 38 с.

управляющих контроллеров, датчиков и других компонентов, выбор которых в том числе обусловлен агрессивностью среды эксплуатации.

В соответствии с функциональной задачей мехатронного устройства-манипулятора УЭХД с учётом ограничений эксплуатации и требований к гибкости системы управления, для верхнего уровня системы управления УЭХД в работе поставлена задача автоматизации формирования схемы маршрутных линий. Задача среднего уровня системы управления (контроллеры манипулятора) сводится к осуществлению навигации в рамках схемы маршрута с использованием двух управляемых координат в декартовой системе. Алгоритм навигации представлен на рисунке 3а.

Формулируется задача для верхнего уровня управления УРОБВ, подразумевающая автоматизацию формирования последовательности опорных точек траектории мехатронного устройства-манипулятора для доставки модуля-инструмента в выбранный участок рабочей зоны с использованием трёх управляемых декартовых координат. Средний уровень системы управления обеспечивает навигацию, формируя потоки данных для решения полноты траекторных задач в соответствии с последовательностью опорных точек, что отражено на рисунке 3б.

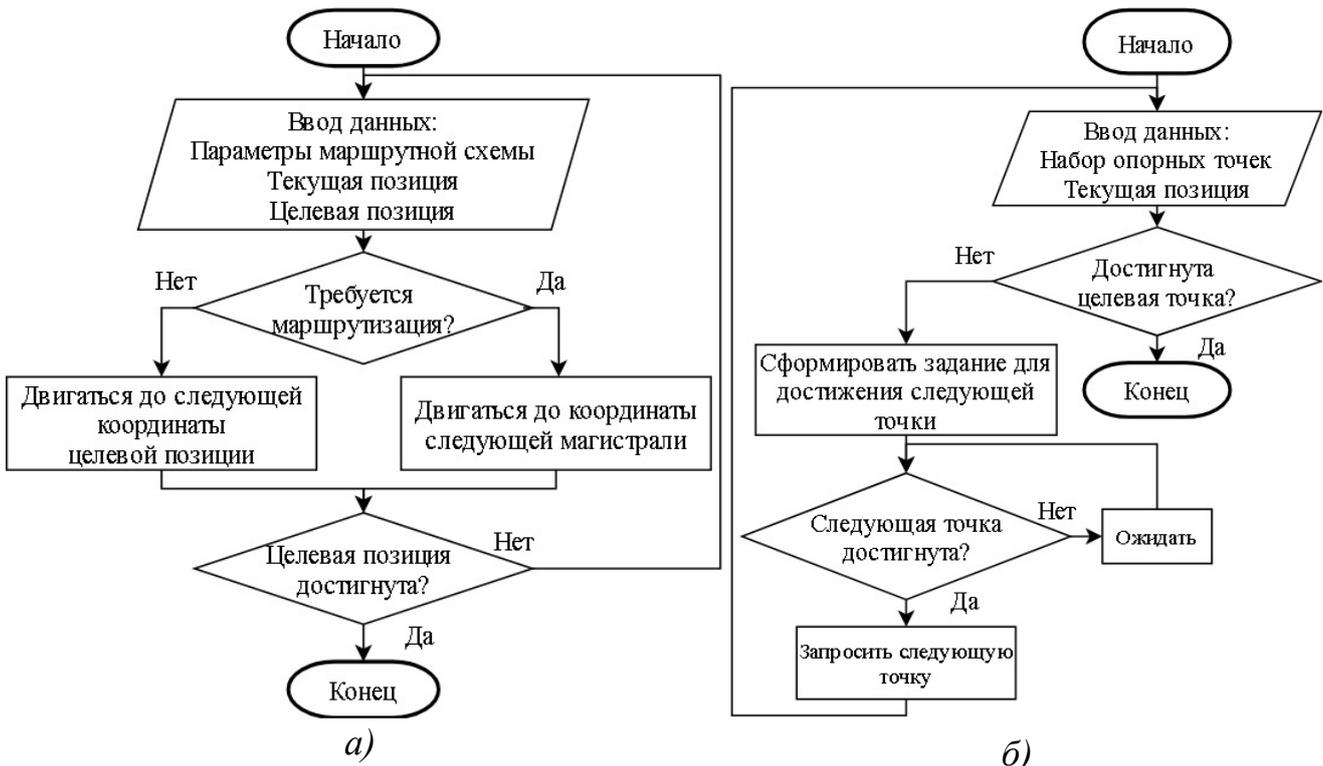


Рисунок 3 – Алгоритмы работы среднего уровня УЭХД (а) УРОБВ (б)

Большую часть рабочей зоны манипулятора УРОБВ занимает объём бассейна выдержки ОЯТ, заполненный специальным водным химическим раствором. Манипулятор, установленный в рабочее положение, представлен на рисунке 4а, а система координат и расположение приводов манипулятора приведены на рисунке 4б.

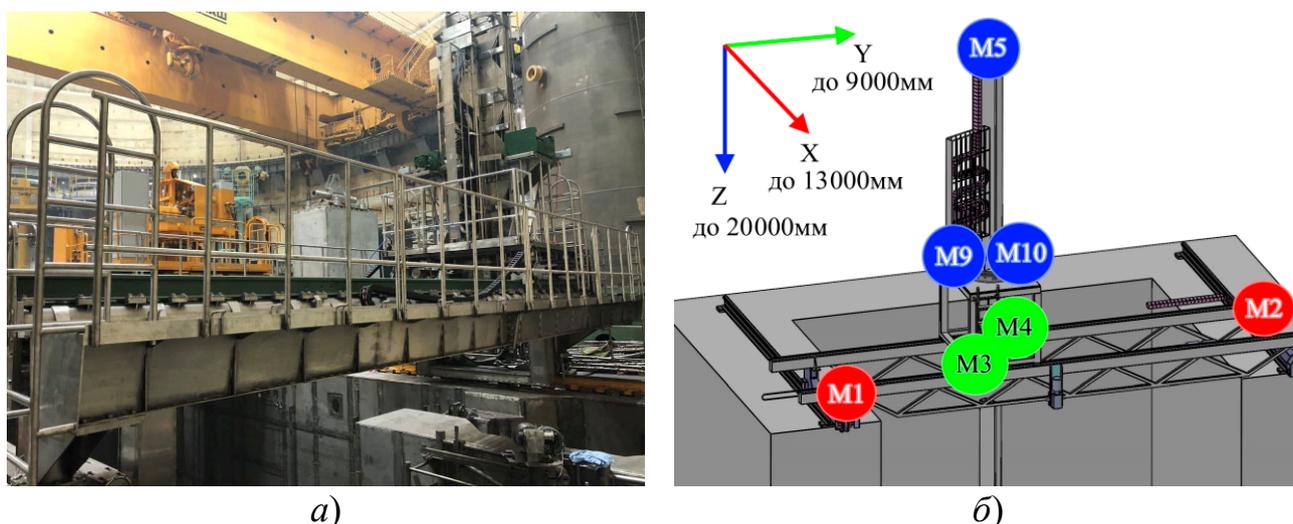


Рисунок 4 – УРОББ и бассейн выдержки: вид сверху (а) и 3D вид в разрезе (б)

В результате анализа особенностей и задач рассматриваемых систем управления, предложена модель распределённого управления специализированными мехатронными устройствами, отличающаяся применением функциональных блоков в составе распределённого программного обеспечения для реализации функций интеллектуального стратегического и тактического планирования. Обобщённая схема архитектуры распределённого управления мехатронными устройствами приведена на рисунке 5.

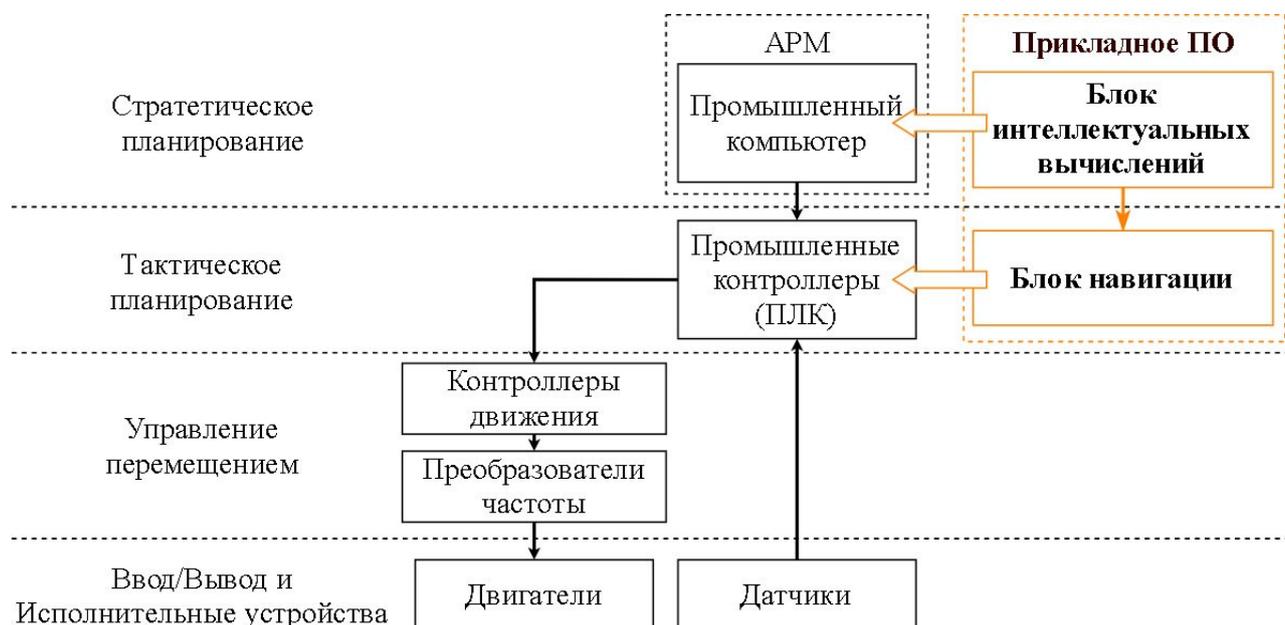


Рисунок 5 – Обобщенная схема архитектуры распределенного управления с блоками интеллектуальных вычислений и навигации

Реализуются функции системы управления среднего уровня на языках программирования стандарта МЭК 61131-3 (IEC 61131-3) для соответствующих электронно-вычислительных компонентов систем управления мехатронными устройствами, включая человеко-машинный интерфейс с функциями имитационного моделирования для наладки и тестирования программно-аппаратного комплекса.

Третья глава посвящена выбору методов решения задачи поиска пути, в том числе, методами искусственного интеллекта.

Рассмотрены методы поиска пути и их групповая классификация. Различные подходы и их множественные реализации объединяет необходимость описания рабочего пространства при помощи того или иного представления, карты, но отличает форма представления и принцип работы алгоритма проведения поиска.

Приведена характеристика методов на основе теории графов, потенциальных полей, клеточной декомпозиции, вероятностных методов, оптимизационных методов, методов с применением интеллектуальных технологий. Рассмотрены типичные представители основных групп методов поиска пути и выделены их особенности в контексте сформулированных задач управления, представленные в Таблице 1.

Таблица 1 – Сводная таблица особенностей методов формирования траекторий

Группа	Метод	Формирование трёхмерной траектории	Расположение магистральных линий
На основе графов	Граф видимости	Нацелен на обход препятствий на однородной карте	Не соответствует поставленной задаче
	Диаграмма Вороного	Ресурсоёмкая в трёхмерном исполнении	Не соответствует поставленной задаче
Декомпозиция	Дейкстры, Алгоритм Ли	Применимы	Не соответствует поставленной задаче
	Эвристические: A^* и др.	Плохо применимы для неоднородной среды	
Потенциального поля	–	Применим с ограничениями (форма препятствий, вид неоднородности карты)	Нарушает требования к форме маршрутных линий
Интеллектуальные	Искусственные нейронные сети	Применимы	Применимы с ограничениями (формат входных параметров)
	Генетические алгоритмы	Сложности формализации задачи	Применимы
Вероятностные	Маршрутные сети	Сложности представления неоднородности, нестабильность решения	Не соответствует поставленной задаче
	Случайные деревья	Сложности представления неоднородности, нестабильность решения	

Проведён выбор методов решения поставленных задач с применением аналитического метода и метода экспертных оценок. Для этого приведены результаты обобщённого ранжирования методом среднего арифметического и методом медианы с учётом оценки компетентности экспертов. Выполнен анализ согласованности мнений экспертов с помощью коэффициента конкордации Кендалла и проведена оценка значимости его значения.

Приведено описание структуры генетического алгоритма, используемого в работе для последующего решения задачи поиска параметров безопасной схемы маршрутных линий с учётом соответствия линиям технологического маршрута, указаны «сильные» и «слабые» стороны эвристического поиска решения.

Представлен хронологический обзор интеллектуальных моделей для формирования траектории на основе нейронных карт. Отмечены особенности известных вариантов реализации этих моделей в виде локально связанных нейронных сетей. Схемы-прототипы наиболее распространённых топологий локальных связей представлены на рисунке 6.



Рисунок 6 – Схемы топологий связей единичного нейрона в нейронной карте

На рисунке 6 отражены нейроны-соседи выбранного нейрона i , обозначенные i_1-i_n ; весовые коэффициенты связей, обозначенные W_{ij} ; сигнал сдвига, обозначенный θ_i .

Четвертая глава иллюстрирует особенности практической реализации методов формирования траекторий, применительно к поставленным задачам управления, в виде программно-алгоритмических решений, реализованных как встраиваемое распределенное прикладное программное обеспечение.

Описана разработанная модель создания схемы маршрутов автоматизированного перемещения грузов для специализированного координатного крана. Выполнено формализованное математическое описание для цифрового представления данных. Предложен способ цифрового представления технологического маршрута и опасных зон для формирования пространства поиска. Предложен способ представления решения в виде обобщённой модели схемы магистральных линий. Выполнено графическое моделирование, проведен анализ результатов. Предложены и реализованы усовершенствованные версии моделей. Определены основные направления практического промышленного применения полученных программно-алгоритмических решений.

Для решения задачи верхнего уровня системы управления УЭХД разработана модель представления исходных данных: технологического маршрута и схемы ключевых (магистральных) маршрутных линий. Обобщённая модель магистральных линий M в соответствии с технологическими ограничениями содержит пересекающиеся под прямым углом линии, каждая из которых параллельна координатной оси установки OX или OY , и названные соответственно x -магистралями и y -магистралями. Выбор числа магистралей происходит с учетом количества координатно-обособленных групп технологических позиций участка. Модель M предполагает наличие двух x -магистралей и двух y -магистралей. В

качестве переменных параметров выбранной модели предложены соответствующие координаты ортогональных проекций магистралей схемы: x_1, y_1, x_2, y_2 . При этом для каждого набора параметров доступны два способа размещения магистралей описанного вида: с точками пересечения $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ и (x_1, y_2) либо (x_2, y_1) . При поиске решения выбирается способ с большим значением функции приспособленности. В качестве цифрового представления решения введён вектор параметров d_k из пространства поиска D следующего вида: $(x_{1k}, y_{1k}, x_{2k}, y_{2k})$. Для проведения сравнительной оценки решений предложена функция, оценивающая удалённость точек маршрута от точек маршрутных линий с учётом направления маршрутного перемещения (уравнение 2).

Представлены схемы маршрутных линий перегрузки корзин с ТРО: выполненная специалистом в соответствии с ограничениями технического задания (рисунок 7а) и построенная из кратчайших маршрутных линий без учёта технических ограничений (рисунок 7б). Синие точки соответствуют технологическим позициям на поддонах и в ваннах УЭХД. В связи с тем, что в рабочей зоне манипулятора присутствуют элементы конструкции, препятствующие перемещению корзин с ТРО, и зоны, требующие минимизации радиоактивного и химического загрязнения, введено понятие опасных зон. Пример схемы участка с опасными зонами (обозначены красным цветом) приведён на рисунке 7б.

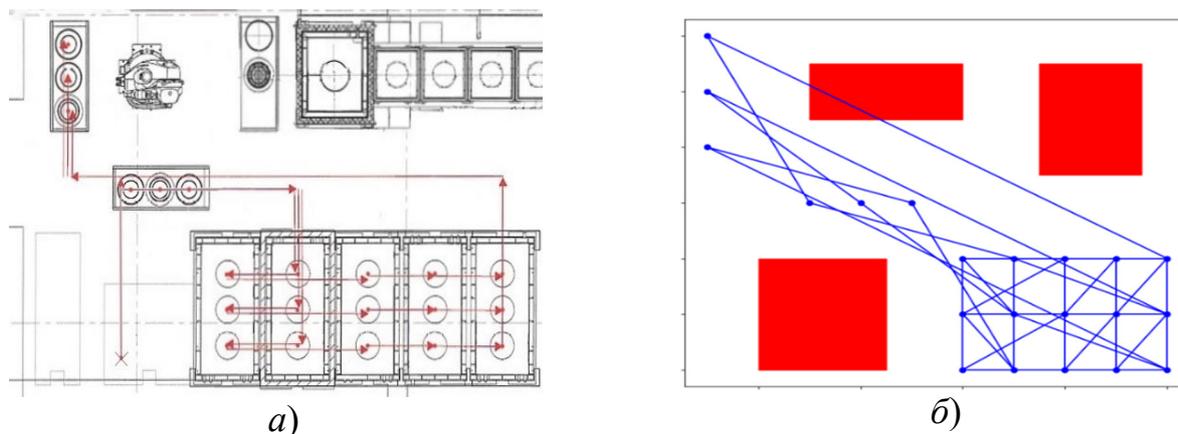


Рисунок 7 – Полная схема технологического маршрута без опасных зон (а) и с опасными зонами (б)

Цифровое представление технологического маршрута формируется на основе векторного поля \mathbf{F} над множеством E радиус-векторов в горизонтальной плоскости $ХОУ$: $\mathbf{F} : E \rightarrow E$; $\mathbf{F}(\mathbf{r}) = (F_x(x,y), F_y(x,y))$, где \mathbf{r} – радиус вектор, лежащий в плоскости $ХОУ$ и определяющий конфигурацию мехатронного устройства. Технологический маршрут представлен множеством векторов перемещений \mathbf{P} . Вектор-функция $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ отражает влияние выбранного технологического маршрута на «востребованность» перемещения в точке рабочей зоны, заданной \mathbf{r} .

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \sum_{i=0}^k Gauss_2(\mathbf{r}_i(\mathbf{P}_i, \mathbf{r}), \mathbf{r}), \quad (1)$$

где \mathbf{P}_i – вектор i -того перемещения; k – общее число перемещений в технологической программе; $Gauss_2(\mathbf{r}_i, \mathbf{r})$ – нормализованная двумерная гауссова

функция с центром рассеивания в \mathbf{r}_i ; \mathbf{r}_i – радиус-вектор ближайшей точки вектора i -го перемещения маршрута \mathbf{P}_i к точке рабочей зоны, заданной вектором \mathbf{r} .

В соответствии с осевыми группами приводов мехатронного устройства, элементы $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ проецируются на оси, формируя скалярные поля $F_x(x,y)$, $F_y(x,y)$, позволяющие оценить «востребованность» перемещения, выполняемого соответствующей группой приводов. Ориентированная модель M_0 предполагает формирование полей $F_{xf}(x,y)$, $F_{yf}(x,y)$ для анализа «востребованности» перемещений в направлении роста координат и $F_{xb}(x,y)$, $F_{yb}(x,y)$ в направлении убывания. В работе приведён алгоритм формирования скалярных полей, реализованный в программном модуле и графики полученных скалярных полей.

Моделирование опасных зон производится с помощью скалярного поля «индекса безопасности» перемещений. В областях, соответствующих опасным зонам, индекс принимает значение 0, а при удалении возрастает до 1. Графики скалярных полей с учётом опасных зон приведены на рисунке 8.

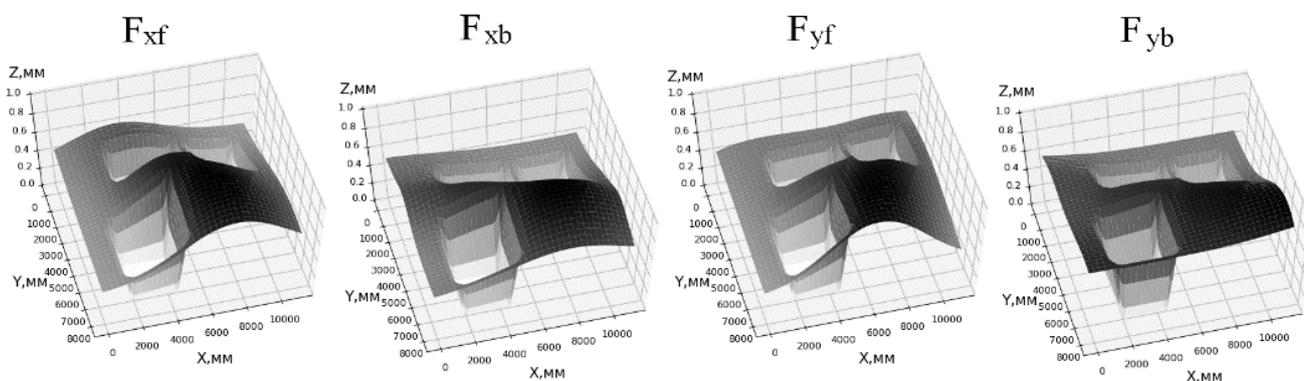


Рисунок 8 – Формирование скалярных полей на основе технологического маршрута с опасными зонами

В рамках предложенного метода формирования схемы маршрутов на основе модели M_0 рассматривается решение в виде вектора $\mathbf{d}_0 \in D_0$ следующего вида: $(x_{1k}, y_{1k}, x_{2k}, y_{2k}, x_{3k}, y_{3k}, x_{4k}, y_{4k})$. Предложена функция W_d для оценки соответствия \mathbf{d}_0 маршруту на основе скалярных полей F_{xf} , F_{xb} и F_{yf} , F_{yb} :

$$W_d = \sum_{i=1}^{n-J} \sum_{l_i} F_{xf}(x, y_i) \Delta x + \sum_{j=1}^{n-I} \sum_{l_j} F_{xb}(x, y_j) \Delta x + \sum_{g=1}^{m-V} \sum_{l_g} F_{yf}(x_g, y) \Delta y + \sum_{v=1}^{m-G} \sum_{l_v} F_{yb}(x_v, y) \Delta y, \quad (2)$$

где W_d – оценка соответствия маршруту решения \mathbf{d}_0 ; n – число х-магистралей; m – число у-магистралей; I, J, G, V – количество х-магистралей и у-магистралей для каждого из направлений движения; y_i, y_j, x_g, x_v – постоянная координата i -ой/ j -той/ g -той/ v -той магистрали; l_i, l_j, l_g, l_v – i -ая/ j -ая/ g -тая/ v -тая магистраль, представленная конечным числом точек в соответствии с дискретизацией модели.

Предложенная функция позволяет сравнивать наборы параметров схемы магистральных линий \mathbf{d}_0 , исходя из близости точек направленных линий магистралей к точкам соответственно направленных линий полного технологического маршрута.

Для решения задачи поиска \mathbf{d}_0 из D_0 разработан генетический алгоритм. В качестве генов выступают нули и единицы, в роли локуса выступают двоичные разряды координат магистральных линий. Приспособленность решений определяется с помощью функции W_d . Реализован набор базовых операторов:

отбора, скрещивания, репродукции и мутации. Выбор особей-родителей производится на основе ранжирования с функционально заданной вероятностью репродукции. Вероятности скрещивания составляет 80%. В результате ранжирования скрещивание происходит преимущественно с участием представителей элитной группы (в 68% случаев). В алгоритме применяется оператор гауссовой мутации. Создание начальной популяции производится случайно, по принципу «дробовика». Алгоритм поиска использует комплексный критерий завершения: не более 50 поколений; оценка схождения популяции по неизменности лучшей особи в сочетании с размахом приспособленности популяции менее 1% в течение 5 поколений.

Предложенные методы цифрового представления технологического маршрута, опасных зон, обобщенной схемы линий перемещений, а также критерий оценки решения и алгоритм генетического поиска в совокупности представляют модель эмпирического поиска решения для автоматического формирования схемы маршрутов движения мехатронных устройств с применением эволюционных вычислений.

Расположение направленных магистральных линий, как результат работы алгоритма, приведено на рисунке 9а. Пунктиром обозначены маршрутные линии, сплошными жёлтыми обозначены магистральные линии для движения в положительном направлении осей OX , OY , зелёными – в отрицательном. На рисунке 9б приведена скорректированная с учётом опасных зон схема маршрутных линий.

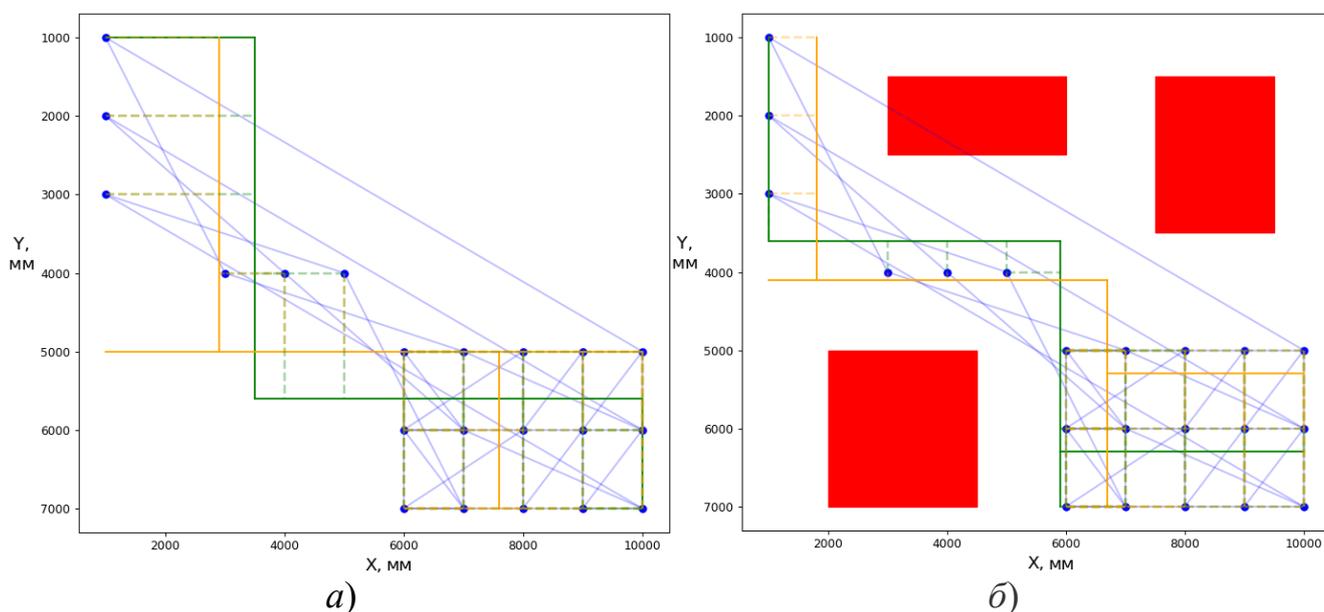


Рисунок 9 – Схема перемещений и ориентированных магистральных линий без учёта опасных зон (а) и с учётом опасных зон (б)

Вычислительный эксперимент показал, что применение блоков интеллектуальных вычислений и навигации позволяет при сохранении безопасности сократить общую протяженность маршрута для режима обработки трёх корзин на 9,44%, двух корзин на 11,31%, а для режима обработки одной корзины сохранить результат схемы, предложенной специалистом.

Описан предложенный метод формирования траектории движения рабочего органа специализированного мехатронного устройства с препятствиями в рабочей зоне. Выполнено формализованное описание структуры искусственной нейронной сети типа «нейронная карта» для трёх измерений с учётом модификаторов неоднородности рабочей зоны. Предложен алгоритм активации нейронной карты, учитывающий неоднородность распространения выходного сигнала. Реализованы модели нейронных карт для двух размеров нейронной области.

Для решения задачи верхнего уровня системы управления УРОБВ предложен метод формирования опорных точек траектории движения мехатронных устройств в трехмерном пространстве на основе модели проблемно-ориентированной, топографически детерминированной искусственной нейронной сети, называемой нейронной картой. Выполнена дискретизация конфигурационного пространства манипулятора (пространства состояний, описываемого значениями обобщённых координат). Введены понятия безопасных и опасных конфигураций. Трёхмерные группы конфигураций ставятся в соответствие искусственным нейронам.

Согласно предложенному методу каждый нейрон находится в узле регулярной трёхмерной решётки и синаптически связан с соседними нейронами (локальная связанность) в некоторой «нейронной» области. В работе приведены результаты моделирования для нейронных карт с нейронными областями, содержащими по 6 и по 26 соседних нейронов. Нейрон i характеризуется вектором Y входных сигналов v_j , вектором весовых коэффициентов W_i , вектором смещения θ_i , которые формируют взвешенный суммарный сетевой сигнал входных синапсов

$$u_i = W_i \times Y + \theta_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} v_j + \theta_i. \quad (3)$$

Взвешенный суммарный сигнал обрабатывается функцией активации Φ и формируется выходной сигнал нейрона Y_i . Обучение нейронной сети производится путём вычисления весовых коэффициентов по предложенной формуле:

$$w_{ij} = \frac{1}{1+k_{ij}}; k_{ij} = \varepsilon(q_i, q_j) + Mod, \quad (4)$$

где k_{ij} – коэффициент, корректирующий стоимость перехода; Mod – полный модификатор стоимости перемещения; $\varepsilon(q_i, q_j)$ – Евклидово расстояние между конфигурациями, соответствующими нейронам i и j .

Модификатор вычисляется на основе известных данных о неоднородности рабочей зоны по координатам участка и объединяет независимую и зависимую осевые составляющие. Формирование траектории движения рабочего модуля манипулятора производится на основании карты выходных сигналов нейронов (навигационной карты), получаемой в ходе активации.

В работе предложен алгоритм активации нейронной карты, представленный на рисунках 10а и 10б, который позволяет активировать все достижимые нейроны в порядке приоритета по уровню сигнала. Проведён ряд вычислительных экспериментов, проанализированы полученные результаты. При анализе результатов моделирования навигационной карты, полученной в ходе эксперимента, учитывается полученный набор опорных точек траектории, равномерность активации и форма эквискалярных поверхностей сигналов нейронов. Результаты моделирования для карты с характерными для бассейна выдержки препятствиями, приведены в тексте диссертации на рисунках 11а, 11б.

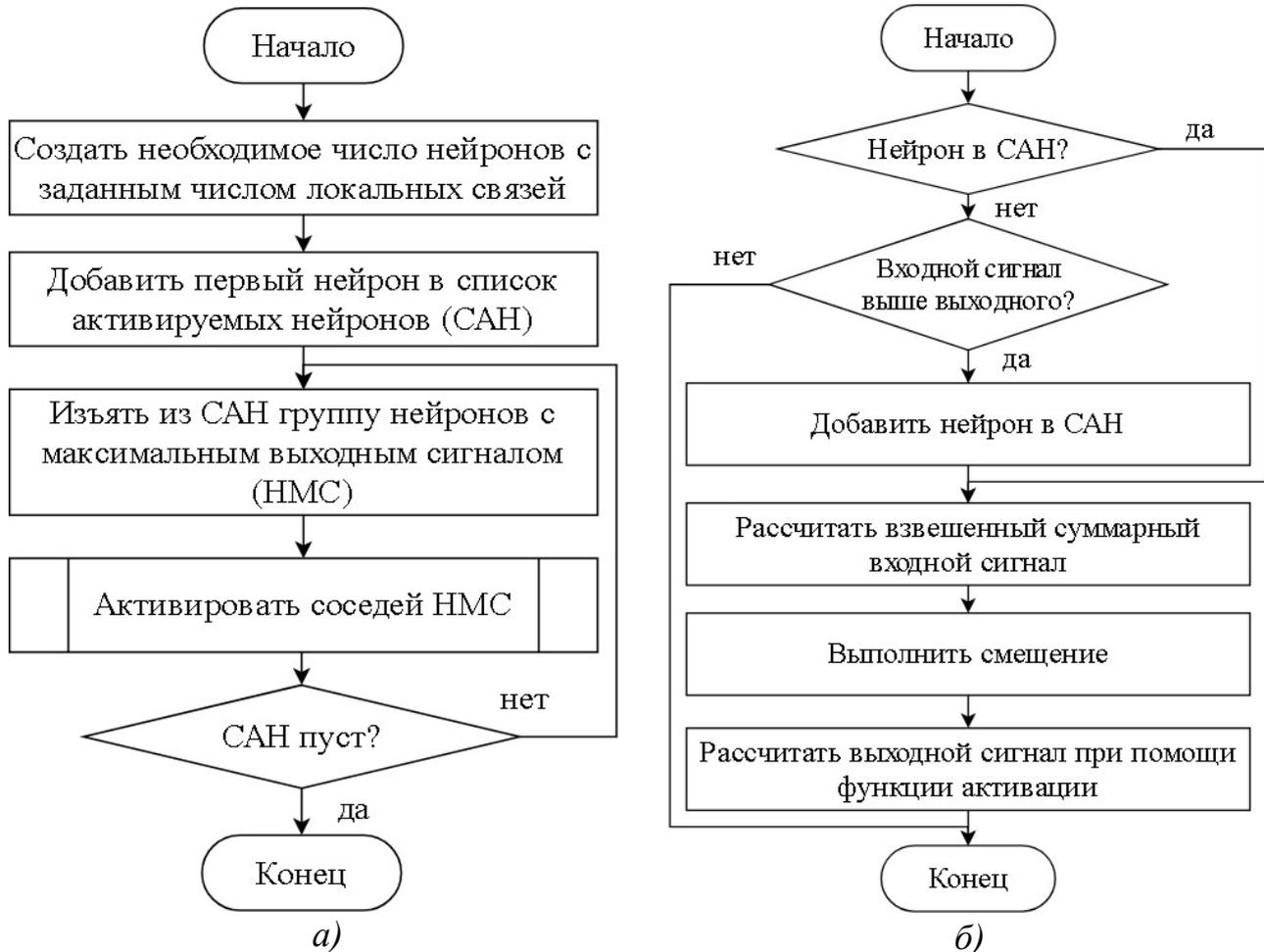


Рисунок 10 – Алгоритмы активации нейронной карты (а) и нейрона (б)

На рисунке 11а красным цветом представлена область, которая содержит нейроны с близкими по величине значениями сигнала (эквискалярная область). На рисунке 11б изображена полученная траектория. Зависимые и независимые осевые составляющие модификатора влияют на форму эквискалярных областей (рисунки 11в и 11г) и траектории (рисунок 11д). Величина неоднородности определяется в ходе опытно-конструкторских работ и зависит от большого числа параметров, среди которых можно выделить: температуру жидкости (от 20 до 60 градусов); габариты, форму и ориентацию рабочего модуля; относительное расположение и глубину залегания целевой и начальной точек перемещения.

Для модели нейронной карты с нейронной областью $r = 1$ предложено несколько видов функции активации для снижения неоднородности активации. В результате анализа результатов численных экспериментов моделирования рекомендован следующий вид функции активации:

$$\Phi(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \leq 0 \\ u_i \cdot \left(1 + k_{ij} \cdot \varepsilon \frac{(n-1)}{6}\right) & 0 < u_i < 1, \\ 1 & u_i \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

где u_i – взвешенный суммарный сигнал входных синапсов i – го нейрона, n – число входящих синапсов нейрона, k_{ij} – коэффициент, корректирующий стоимость перехода; $\varepsilon(q_i, q_j)$ – Евклидово расстояние между конфигурациями, соответствующими нейронам i и j .

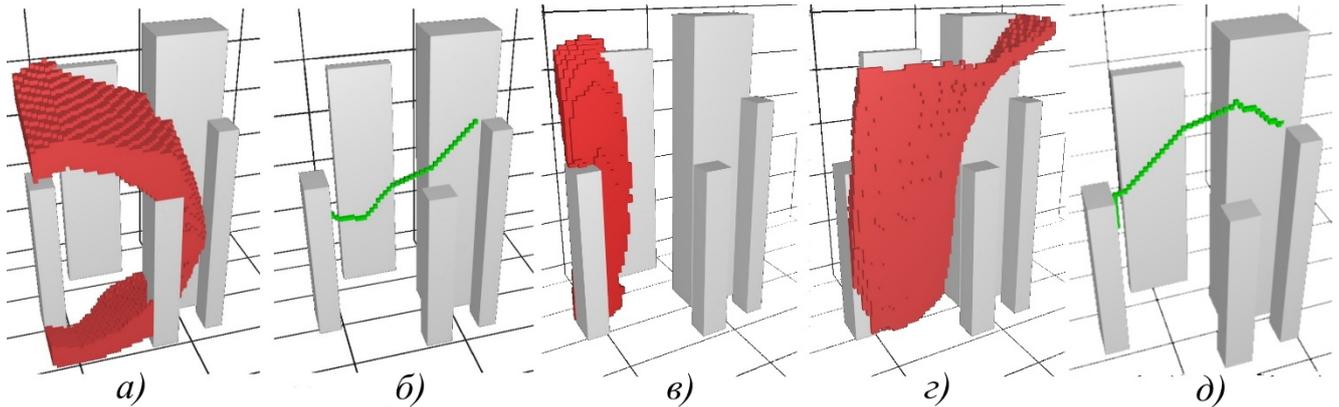


Рисунок 11 – Моделирование поиска траектории с помощью нейронной карты

Автоматизация перемещений позволяет повысить безопасность управления в условиях ограниченной видимости и низкой оснащённости датчиками. Время вспомогательного перемещения дополнительно сокращается в 2-3,5 раза за счёт снижения технологических ограничений на скорость и синхронность работы приводных групп, действующих при управлении оператором.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что применение интеллектуального формирования траекторий с учётом неоднородности рабочей зоны при выполнении вспомогательных технологических операций в ходе ремонта облицовки бассейна выдержки позволяет снизить расчётную работу, совершаемую приводной частью мехатронного манипулятора, на величину до 14,2% и в среднем на 3,37%.

Применение разработанной архитектуры распределенного управления с программными блоками интеллектуальных вычислений и навигации на основе методов искусственного интеллекта обеспечивает решение задачи управления специализированными мехатронными устройствами при выполнении вспомогательных технологических операций. При этом достигается автоматизация процесса изменения и внедрения адаптированной схемы маршрутных линий координатного крана участка дезактивации ТРО с уровнем автоматизации $K_A = 66,7\%$, и на 5,5% увеличивается уровень автоматизации процесса ремонта бассейна выдержки ($K_A = 67,1\%$).

Основные выводы и результаты работы

1. Решена актуальная научная задача, заключающаяся в автоматизации процесса формирования траекторий и маршрутов специализированных мехатронных устройств в условиях неоднородности рабочей зоны путём применения разработанных интеллектуальных моделей и программного обеспечения. Полученное решение отличается от имеющихся использованием элементов искусственного интеллекта, адаптированных под налагаемые на системы управления требования.

2. В результате исследования особенностей системы управления мехатронными устройствами-манипуляторами УЭХД и УРОБВ, разработана модель распределённого интеллектуального управления, отличающаяся интеграцией программных блоков интеллектуальных вычислений и навигации.

3. Осуществлён и обоснован выбор предпочтительных методов формирования траектории движения и маршрутов мехатронных устройств на основе коллективных экспертных оценок. Выполнен обзор методов решения задач поиска траектории движения и формирования маршрутов при управлении специализированными мехатронными устройствами в составе автоматизированного технологического оборудования.

4. Разработана модель цифрового представления данных для решения задачи формирования маршрутных схем движения мехатронного устройства-манипулятора на основе технологического маршрута, опасных зон и технологических ограничений перемещений устройства.

5. Предложен метод решения задачи формирования маршрутных схем движения мехатронного устройства-манипулятора на основе эволюционного поиска параметров схемы технологического маршрута, отличающийся применением метода эвристического поиска на основе эволюционных вычислений для выбора параметров схемы магистральных линий, набором и реализацией операторов алгоритма генетического поиска, и сокращающий протяженность маршрута на 9-11%.

6. Предложен метод решения задачи формирования траекторий движения специализированного мехатронного устройства-манипулятора, отличающийся применением трёхмерной нейронной карты, способом активации нейронов, учётом неоднородности и препятствий рабочей зоны. Применение модели позволяет избежать рисков, связанных с «человеческим фактором», сократить время вспомогательного перемещения в 2-3,5 раза за счёт снижения технологических ограничений, и, согласно результатам вычислительных экспериментов, на 3,37% снизить работу электрических приводов.

7. Проведена оценка результатов реализации цифровых моделей для распределенных систем управления специализированными мехатронными устройствами. В результате оценки установлено, что предложенные средства интеллектуализации автоматизируют процесс актуализации схемы маршрутных линий координатного крана участка дезактивации ТРО с уровнем автоматизации $K_A = 66,7\%$, и повышают на 5,5% уровень автоматизации процесса ремонта бассейна выдержки до уровня $K_A = 67,1\%$.

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Кувшинников, В.С. Применение нейронной карты для вспомогательного управления в работе портального манипулятора / В.С. Кувшинников, Е.Е. Ковшов // Cloud of Science. – 2018. – Т. 5. – № 2. – С. 310-324.

2. Кувшинников, В.С. Формирование навигационных паттернов на основе нейронной карты для управления перемещением манипулятора / В.С. Кувшинников, Е.Е. Ковшов // Cloud of science. – 2019. – Т. 6. – №. 4, С. 727-736.

3. Кувшинников, В.С. Автоматизация управления специализированным портальным краном для перемещения твердых радиоактивных отходов на основе алгоритмов генетического поиска / В.С. Кувшинников, Е.Е. Ковшов // Cloud of science. – 2020. – Т. 7. – №. 4, С. 827-843.

В изданиях, индексируемых Web of Science/Scopus:

4. Kuvshinnikov V. Improvement of specialized industrial manipulator movement control / V. Kuvshinnikov, E. Kovshov // ITM Web of Conferences. – 2018. – Vol. 18. – P. 01004.

5. Stebulyanin M.M. Interval quadratic connected control systems in industrial robotics and mechatronics / M.M. Stebulyanin, E.E. Kovshov, V.S. Kuvshinnikov // Procedia Computer Science: Proceedings of the 13th International Symposium «Intelligent Systems», INTELS 2018, St. Petersburg, 22-24 октября 2018 года. – St. Petersburg: Elsevier B.V., 2019. – P. 579-585.

6. Kuvshinnikov V.S. Unified Approach to Solving the Trajectory Problem by Usage of Neural Maps / V.S. Kuvshinnikov, E.E. Kovshov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 Workshop on Materials and Engineering in Aeronautics, Moscow, 16-17 октября 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012015.

7. Kuvshinnikov V.S. Special-Purpose Solid Radwaste Transfer Gantry Crane Control Automation Using Genetic Algorithm / V.S. Kuvshinnikov, E.E. Kovshov // Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020: 2, Virtual, Lipetsk, 10-13 ноября 2020 года. – Virtual, Lipetsk, 2020. – P. 449-454. – DOI 10.1109/SUMMA50634.2020.9280659.

8. Kovshov E.E. Digital engineering school on the way to digital production / E.E. Kovshov, S.M. Lesin, V.S. Kuvshinnikov // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1691. – №. 1. – P. 012076.

В других изданиях:

9. Kuvshinnikov V.S. Approaches to improving the movement control of a large-sized portal manipulator / V.S. Kuvshinnikov, E.E. Kovshov // Наука и образование в XXI веке: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, Тамбов, 28 февраля 2018 года. – Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2018. – P. 64-67.

10. Кувшинников, В.С. Аудит действий оператора при управлении специализированным порталным манипулятором / В.С. Кувшинников // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2018: Сборник трудов международного научно-технического форума: в 11 томах, Рязань, 28 февраля - 02 2018 года / Под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2018. – С. 117-120.

11. Applied Researches In A Field Of Robotics For Technical Personnel Training / E.E. Kovshov, V.S. Kuvshinnikov, A.A. Kosach, V.A. Kravtsov // ICPE 2018 – International Conference on Psychology and Education, Moscow, 25-26 июня 2018 года. – Moscow: Future Academy, 2018. – P. 311-316.

12. Казаков, Д.Ф. Системы «малой» автоматизации и энергоэффективность промышленного производства / Д.Ф. Казаков, Е.Е. Ковшов, В.С. Кувшинников // Цифровая трансформация в энергетике: Материалы Всероссийской научной конференции, Тамбов, 17-18 декабря 2019 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 281-284.

13. Кувшинников, В.С. Формирование траектории перемещения рабочего органа порталного манипулятора при вспомогательном управлении на основе

нейронной карты / В.С. Кувшинников, Е.Е. Ковшов // VIII научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов атомной отрасли «Повышение доли на международных рынках в условиях цифровой трансформации отрасли»: Сборник тезисов. – СПб.: Изд-во ДЕПО, 2019. С.17-19.

14. Kuvshinnikov V.S. Machine shop portal manipulator movement path modeling for digital manufacturing / Е.Е. Kovshov, V.S. Kuvshinnikov // Машиностроение и металлообработка: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Ин-т технологии металлов Нац. акад. наук Беларуси, Администрация свобод. экон. зоны «Могилев» –Могилёв: Белорусско-Российский университет, 2019. – С. 70-72.

15. Кувшинников, В.С. Применение нейронной карты для вспомогательного управления в работе порталного манипулятора / В. С. Кувшинников, Е.Е. Ковшов // Cloud of Science. – 2018. – Т. 5. – № 2. – С. 310-324.

16. Кувшинников, В.С. Энергоэффективное управление порталным манипулятором / В.С. Кувшинников, Е.Е. Ковшов // Цифровая трансформация в энергетике: Материалы Всероссийской научной конференции, Тамбов, 17-18 декабря 2019 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 303-306.

17. Кувшинников, В.С. Формирование карты безопасных перемещений подъемно-транспортной системы на основе эволюционного алгоритма / В.С. Кувшинников, Е.Е. Ковшов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: Материалы Междунар. научно-технической конф. молодых ученых. – Могилёв: Белорусско-Российский университет, 2020. С. 40.

18. Кувшинников, В.С. Применение эволюционного алгоритма для автоматизированного управления перемещением твёрдых радиоактивных отходов / В.С. Кувшинников, Е.Е. Ковшов // IX научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов атомной отрасли «Молодёжные решения для достижения лидерства атомной отрасли на мировом энергетическом рынке в эпоху трансформации экономики»: Сборник тезисов. – СПб.: СИНЭЛ, 2021. С. 217-220.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

19. Ковшов Е.Е. Программа для ЭВМ «Дистанционный контроль герметичности» / Е.Е. Ковшов, А.А. Косач, В.С. Кувшинников // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661591 от 24.08.2017.

20. Ковшов Е.Е. Программа для ЭВМ «Управление порталным манипулятором» / Е.Е. Ковшов, В.С. Кувшинников // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617688 от 16.05.2018.

21. Ковшов Е.Е. Программа для ЭВМ «Управление регистрами PLC» / Е.Е. Ковшов, В.С. Кувшинников // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020619327 от 05.08.2020.

Подписано в печать 24.03.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,22. Тираж 120.

Акционерное общество
«Научно-исследовательский и конструкторский институт
монтажной технологии — Атомстрой»
127055, г. Москва, Алтуфьевское ш., 43, стр. 2.