

Акционерное общество «Научно-исследовательский и
конструкторский институт монтажной технологии – Атомстрой»

на правах рукописи

Кувшинников Владимир Сергеевич

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

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор
Ковшов Евгений Евгеньевич

Москва – 2022

Оглавление

Оглавление.....	2
Список условных обозначений и сокращений	4
Введение.....	7
Глава 1. Выявление особенностей систем управления специализированными мехатронными устройствами на примере автоматизированных комплексов ЯТЦ.....	17
1.1 ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ И ОСОБЕННОСТЕЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УЧАСТИЮ В ЯДЕРНОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ	17
1.2 АНАЛИЗ СПЕЦИФИКИ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ОБОРУДОВАНИЮ РАССМАТРИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ	19
1.3 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ	24
1.4 АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К СУ И ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ В КП ТРО НА ПРИМЕРЕ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ДЕЗАКТИВАЦИИ.....	28
1.5 АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К СУ И ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ В ТОИР НА ПРИМЕРЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕМОНТА БАССЕЙНА ВЫДЕРЖКИ	33
1.6 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	44
Глава 2. Анализ систем управления специализированными мехатронными устройствами УЭХД ТРО и УРОБВ ОЯТ.....	45
2.1 АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО МЕХАТРОННОГО УСТРОЙСТВА-МАНИПУЛЯТОРА: КООРДИНАТНЫЙ МОСТОВОЙ КРАН УЭХД	45
2.2 АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО МЕХАТРОННОГО УСТРОЙСТВА-МАНИПУЛЯТОРА: МЕХАТРОННЫЙ МАНИПУЛЯТОР УРОБВ	59
2.3 МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ МЕХАТРОННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ В СОСТАВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	71
2.4 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	75
Глава 3. Обзор подходов к решению задач управления перемещением специализированных мехатронных устройств	77
3.1 ОБЗОР МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ	77
3.2 ВЫБОР МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ	89
3.3 МЕТОД ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОИСКА	95
3.4 МЕТОД НЕЙРОННОЙ КАРТЫ.....	100
3.5 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	105
Глава 4. Реализация моделей и методов для решения задач интеллектуализации формирования траекторий и маршрутов специализированных мехатронных устройств	106

4.1	МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СХЕМЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РАБОЧЕГО ОРГАНА ПОРТАЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА УЭХД	106
4.2	МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СХЕМЫ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ	115
4.3	МОДЕЛЬ НЕЙРОННОЙ КАРТЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ РАБОЧЕГО ОРГАНА ПОРТАЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА УРОБВ	124
4.4	МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНЫХ ТОЧЕК ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА МЕХАТРОННОГО МАНИПУЛЯТОРА УРОБ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ КАРТЫ..	134
4.5	ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПРОГРАММНЫМИ БЛОКАМИ НАВИГАЦИИ И ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА	158
4.6	ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	164
Заключение		165
Список использованной литературы		167
Приложение А. Справки и акты о внедрении		177
Приложение Б. Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ		180
Приложение В. План компоновки УЭХД		183
Приложение Г. Управление пневматическими приводами		184
Приложение Д. Программный код функциональных блоков среднего уровня управления		185
Приложение Е. Алгоритмы цифрового представления данных и генетического поиска.....		190
Приложение Ж. Программный код цифрового представления технологического маршрута в виде скалярных полей.....		191
Приложение И. Программный код алгоритма эволюционного поиска решения		195
Приложение К. Результаты вычислительных экспериментов с моделью нейронной карты		199
Приложение Л. Нейронная карта для производственного участка.....		201
Приложение М. Результаты вычислительных экспериментов к Главе 4....		203

Список условных обозначений и сокращений

ЧПУ	–	числовое программное управление;
АЭС	–	атомная электростанция;
ЯЭУ	–	ядерная энергетическая установка;
ЯТЦ	–	ядерный топливный цикл;
САР	–	системы автоматического регулирования;
АСУ	–	автоматизированные системы управления;
ЗЧ ЯТЦ	–	завершающая часть ядерного топливного цикла;
ОЯТ	–	отработанное ядерное топливо;
КП ТРО	–	комплекс переработки твёрдых радиоактивных отходов;
АСУ ТОиР	–	автоматизация систем управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования;
РАСУ	–	Росатом Автоматизированные Систему Управления;
ЭКБ	–	электронно-компонентная база;
ЧМИ	–	человеко-машинный интерфейс;
СКУ	–	системы контроля и управления;
ГЭЗ	–	глубокоэшелонированная защита;
ТВС	–	тепловыделяющая сборка;
КГО	–	контроль герметичности оболочек;
СУМП	–	система управления машиной перегрузочной;
УВК	–	управляющий вычислительный комплекс;
ПМ	–	перегрузочная машина;
ТЗ	–	техническое задание;
РАО	–	радиоактивные отходы;
ГК «Росатом» «Росатом»;	–	государственная корпорация по атомной энергии
ЖРО	–	жидкие радиоактивные отходы;
ТРО	–	твёрдые радиоактивные отходы;
ГХК	–	ФГУП «Горно-химический комбинат»;

СХК	–	ОАО «Сибирский химический комбинат»;
НАО	–	низкоактивные отходы;
САО	–	среднеактивные отходы;
ВАО	–	высокоактивные отходы;
КП РАО	–	комплекс переработки радиоактивных отходов;
ОН РАО	–	очень низкоактивные радиоактивные отходы;
ДУМ	–	дистанционно-управляемый механизм;
СКУ УЭХД	–	система контроля и управления установкой электрохимической дезактивации;
ПТК	–	программно-технические комплексы;
АПТС	–	аппаратура программно-технических средств;
БВ	–	бассейн выдержки;
УРОБВ	–	устройство ремонта облицовки бассейна выдержки;
МРАО	–	металлические радиоактивные отходы;
ПТК	–	программно-технический комплекс;
АРМ	–	автоматизированные рабочие места;
ЛСУ	–	локальная система оборудования;
ИБП	–	источник бесперебойного питания;
КИП	–	контрольно-измерительный прибор;
СКУ КП ТРО	–	система контроля и управления комплекса переработки твёрдых радиоактивных отходов;
ПНР	–	пуско-наладочные работы;
ПБМ-2.4.1	–	прибор безопасности для кранов мостового типа;
НПИ	–	наибольший предел измерения;
SSI	–	синхронный последовательный интерфейс;
CFC	–	язык потоковых функциональных схем (Continuous Function Chart);
FBD	–	язык функциональных блоковых диаграмм (Function Block Diagram);
CAN	–	стандарт промышленной сети Controller Area Network;
SDO	–	сервисные посылки (Service Data Objects);

- PDO** – данные процессов (Process Data Objects);
- PC** – персональный компьютер;
- ГА** – генетический алгоритм;
- DWENN** – нейронные сети с динамически распространяемой волной;
- ПЛК** – программируемый логический контроллер;

Введение

Актуальность темы исследования. Автоматизация производственных процессов и машиностроительных производств в виде глобального замещения человеческого труда на предприятиях машинами различных видов и робототехническими средствами – распространённое явление во всех отраслях, включая машиностроение и металлообработку, лесную, деревообрабатывающую и целлюлозно-бумажную промышленность, лёгкую промышленность, энергетическую отрасль, пищевую промышленность и другие. Перечень задач, выполняемых автоматизированными системами, увеличивался по мере расширения их технологических возможностей в структуре промышленного производства, изменяя структуру и масштаб систем автоматизации (рисунок 1).



Рисунок 1 – Эволюция производства с развитием автоматизации

Сегодня средства автоматизации способны частично участвовать в процессе проектирования, настройки и анализа работы производственных участков, успешно выполняя функции, ранее свойственные лишь деятельности нервной системы живых существ. Эти функции стали доступны благодаря комплексному развитию технологии сразу в нескольких направлениях, таких, как робототехника, большие данные и машинный анализ, облачные вычисления, симуляция, интернет вещей и других, обуславливающих успешное развитие производства в ходе четвёртой промышленной революции, называемой Индустрия 4.0 (рисунок 2) [1].



Рисунок 2 – Составляющие четвёртой промышленной революции

Современный уровень развития техники отвечает на многие вызовы со стороны промышленности [2], когда конструкторско-технологические задачи требуют создания уникальных решений с применением особого оборудования, призванного выполнять сложные технологические операции в условиях ограничений и требований как к качеству их реализации, так и потребительским свойствам конечного продукта.

Атомная отрасль с самого момента её основания, находящаяся на пике научного прогресса в энергомашиностроении, испытывает потребность в уникальном специализированном оборудовании для решения нетривиальных задач в условиях динамично меняющейся производственной среды. В качестве группы задач в структуре автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) выступают задачи, связанные с формированием траекторий перемещения рабочего органа технологической машины. Подобные задачи часто возникают в цифровом производстве при управлении технологическим оборудованием, оснащённом системой программного управления (ПУ), как, например, механообрабатывающие станки, мобильные и стационарные роботы, мехатронные устройства. От качества решения этого рода задач зависит работоспособность промышленных автоматизированных систем, в первую очередь, их надёжность и безопасность эксплуатации.

Поскольку специализированное оборудование в атомной отрасли сталкивается с очень высокими требованиями к качеству проектирования, исполнения узлов, управления процессами и эксплуатации установок, существует немало препятствий для внедрения новых технологий. В то время, как промышленность во всю оснащена средствами малой и крупной автоматизации и наращивает темпы технического совершенствования, атомная отрасль вынуждена иметь дело с значительно более инерционным аппаратом принятия инновационных решений в области цифрового производства. В качестве областей, остро нуждающихся в использовании средств автоматизации технологических процессов, на станциях и смежных предприятиях выступают работы по перемещению особо опасных грузов, а также обслуживанию участков, прилегающих к местам использования и хранения этих объектов. Задачи поиска безопасных траекторий перемещения опасных грузов и инструментов требуют не только специального, но и общего решения, включая математическую модель и программно-аппаратную реализацию с промышленно интегрируемым выходом. Подобные решения позволят гибко адаптировать управление действиями исполнительных узлов установок под изменения условий эксплуатации и параметров технологических процессов. Традиционный путь решения подобных задач включает применение интеллектуального человеческого труда, однако, в условиях развития компьютерных технологий, некоторые функции анализа и планирования в цифровом производстве, доступные человеческому мозгу, теперь могут быть эффективно делегированы цифровым вычислительным системам.

Для управления специализированными технологическими объектами на практике нередко прибегают к ручному программированию маршрутов, алгоритмам последовательного перемещения звеньев и к ручному управлению с места оператора. Эти решения позволяют обеспечить работоспособность оборудования в пределах имеющихся ограничений. Недостатком подобного рода решений являются увеличение подготовительного и подготовительно-заключительного времени, возрастание экономических затрат на эксплуатацию инфраструктуры объекта автоматизации, повышенное вовлечение

обслуживающего персонала в процесс управления, полный или частичный отказ от универсальности и гибкости автоматизированной системы в части управления перемещениями в технологической среде, существенное ограничение масштабируемости решения. Для снижения влияния вышеуказанных негативных факторов необходимо редуцировать участие специалиста в соответствующих уровнях управления оборудованием. При этом, в зависимости от особенностей технологического процесса и реализованного уровня автоматизации функций оборудования, востребована как автоматизация формирования безопасной траектории перемещения рабочего органа, например, мехатронного устройства-манипулятора к месту проведения технологических операций, так и поиск эффективного способа формирования множества согласованных траекторий заданного вида для перемещения опасных грузов.

Исходя из вышеизложенного, исследование областей предпочтительной применимости и развитие существующих методов формирования траекторий при подготовке распределённых программ управления специализированным технологическим оборудованием в структуре АСУ ТП, является **актуальной** научной задачей.

Степень разработанности проблемы. Задача поиска пути и формирования траектории сохраняет актуальность не только в картографических сервисах, мехатронике и робототехнике, но и в компьютерном моделировании, а также для недетерминированных конечных автоматов. Она широко исследована в работах многих авторов: Э.В. Дейкстра [3], П.Э. Харт [4], Э.Ф. Мур, С.М. Лаваль [5], Д.Д. Харabor [6] и других авторов. В зависимости от способа формализации 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 [7, 8], М.Г. Лагудакис [9, 10], получивший развитие в работах Д.В. Лебедева [11, 12], Й.Д. Стейла и Х. Риттер. Также находят применение методы эволюционного моделирования, исследованные в работах В.М. Курейчика, В.В. Курейчика, И.П. Норенкова [13], Т.В. Панченко [14], Д.И. Батищева [15], Л.А. Демидовой [16], Гладкова Л.А [17],

Д. Рутковской [18], Е. Г. Шоповой [19], М. Митчелл [20], А. Де Йонг Кеннет [21], С. Алиппи [22]. и других отечественных и зарубежных исследователей.

Высоко оценивая вклад вышеперечисленных исследователей и результаты проведённой ими работы, отметим, что в контексте особенностей управления специализированными мехатронными устройствами, существует ряд нерешённых проблем, среди которых можно выделить как общие, так и частные. К общим относятся: выбор и адаптация унифицированного метода формирования траектории для управления мехатронным устройством-манипулятором в неоднородной трёхмерной среде, поиск способа формализации задачи упрощения схемы перемещений мехатронного устройства - манипулятора в условиях ограничений. В качестве частных можно выделить: выбор структуры нейронной карты для трёх измерений, поиск способа равномерной активации нейронной карты, формализация представления схемы упрощённых перемещений манипулятора, выбор функции соответствия рассматриваемой схемы перемещений манипулятора технологическому маршруту.

Цель работы: интеллектуализация формирования траекторий и маршрутов специализированных мехатронных устройств в условиях неоднородности рабочей зоны.

Задачи исследования:

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 распределенным управлением.
3. Анализ методов решения задач формирования траектории движения и маршрутов мехатронных устройств, 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 распределенных систем управления специализированными мехатронными устройствами.

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.

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

Научная новизна:

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 специализированных мехатронных устройств 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.)»).

Теоретическая и практическая значимость: 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. 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 твердых радиоактивных отходов 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 №1271П от

30.11.2015) АО «НИКИМТ-Атомстрой», серия 77Л01 №0007618, на срок: бессрочно — Дополнительное профессиональное образование). Все внедрения подтверждаются соответствующими актами и справками (Приложение А) предприятий, организаций и/или их структурных подразделений, входящих в Госкорпорацию Росатом: АО «НИКИМТ-Атомстрой», «Эксперт-Центр НИКИМТ», Отраслевой центр компетенций «Неразрушающий контроль».

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.

Степень достоверности и апробация работы: Достоверность научных положений, теоретических выводов и рекомендаций обеспечиваются корректным использованием математического аппарата, применением биоинспирированных методов на основе нейронных карт и генетических алгоритмов. Достоверность подтверждается результатами вычислительных экспериментов, компьютерного моделирования, экспериментальной апробацией и практическим применением результатов диссертационной 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».

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа выполнена в соответствии со следующими пунктами паспорта специальностей научных работников по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: 14. Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при

построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУЦ, АСПШ и др.); 19. Цифровизация управления в промышленности, функциональное моделирование объектов автоматизации.

Публикации по теме работы.

По теме диссертации опубликована 21 научная работа, включая 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки России, 4 статьи в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и Scopus, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (Приложение Б).

Объем и структура 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.

Глава 1. Выявление особенностей систем управления специализированными мехатронными устройствами на примере автоматизированных комплексов ЯТЦ

1.1 Исследование роли и особенностей специализированных мехатронных устройств применительно к участию в ядерном топливном цикле

Известно, что технологии, применяемые в ядерном топливном цикле, содержат подавляющее большинство химических, металлургических и сопутствующих процессов современных отраслей промышленности, как правило, отражают высший из доступных для отрасли уровней, могут служить образцом для создания высокоэффективных промышленных технологий [23]. Обоснованный выбор наиболее эффективных технологий требует проведения анализа в основных направлениях развития прогрессивных технологий. Отмечается значительная степень противоречия показателей технологической эффективности друг другу, что повышает требования к опыту исследователя, а также открывает широкие возможности для применения методов многопараметрической и многокритериальной оптимизации.

Опираясь на принципиальные схемы ЯТЦ, приведённые в книге Лебедева В.М. [23], можно заключить, что автоматизация процессов востребована в атомной промышленности на всех этапах ЯТЦ. Это вызвано двумя взаимосвязанными причинами: наличием широкого разнообразия доступных средств автоматизации благодаря достижениям четырёх промышленных революций и четырёх выделяемым особенностям технологий ЯТЦ.

Работа с микроколичествами вещества высокой очистки требует высокого уровня автоматизации химических процессов, где применяется широкий спектр видов САР [24]. Химическая токсичность материалов и сред, а также опасность самопроизвольной цепной реакции – поднимают планку технологичности процессов как для всего комплекса ЯТЦ, так и отдельно для операций

транспортировки, распаковки/упаковки и множества прочих вспомогательных операций. Высокие требования к качеству основных и вспомогательных процессов ЯТЦ приводит к необходимости применения АСУ. Эти системы сочетают интеллект человека, мощный математический аппарат и большие возможности современной вычислительной техники [24].

Из числа этапов всех ЯТЦ особенно выделяются этапы, относящиеся к ЗЧ ЯТЦ. Именно эти этапы требуют работы с наиболее опасными с точки зрения радиационной активности материалами. Самую высокую опасность представляют элементы с ОЯТ и другие опасные отходы ядерного цикла на этапах выдержки и переработки, а в особенности в процессе транспортировки, упаковки, погрузки/выгрузки. В перечень специализированного мехатронного оборудования, участвующего в ЗЧ ЯТЦ, входит устройство - манипулятор КП ТРО, используемое в процессе дезактивации поверхности твёрдых радиоактивных отходов. Однако, не только конструкции и основное оборудование ЗЧ ЯТЦ должны отвечать высоким требованиям по радиационной и химической устойчивости, а также безопасности, но и всё вспомогательное технологическое оборудование, используемое на этапах жизненного цикла оборудования ЗЧ ЯТЦ. Примером такого оборудования могут служить установки для проведения различных видов неразрушающего контроля материала конструкций и соединений.

Развитие средств АСУ ТОиР, а также включение этих средств в единую систему управления старением в настоящее время особенно актуально [25]. Тенденция к переходу предприятий атомной промышленности от подхода с обслуживанием «по регламенту», являющегося традиционным, к более современному обслуживанию оборудования «по техническому состоянию», которое требует внедрения большого числа новых методов технической диагностики, создаёт необходимость в разработке средств для учёта и анализа результатов диагностики, а также для прогнозирования технического состояния в краткосрочном, среднесрочном и долгосрочном периоде [26, 27, 28] на основании функциональной мониторинговой информации о техническом состоянии оборудования. Внедрение новых методов технической диагностики нередко

связано с применением специализированных мехатронных устройств, входящих в состав комплекса мер по диагностике и ремонту объектов ЗЧ ЯТЦ, таких, как УРОБВ.

Таким образом, решение задач интеллектуализации управления специализированными мехатронными устройствами, используемыми как в составе комплексов ЗЧ ЯТЦ, так и в комплексе мер по диагностике и ремонту объектов ЗЧ ЯТЦ, востребовано, актуально и вписывается в рамки существующих тенденций развития атомных предприятий.

1.2 Анализ специфики требований, предъявляемых к оборудованию рассматриваемых объектов, применительно к задачам управления и автоматизации

Вне всякого сомнения, технологические процессы и оборудование, применяемое на АЭС и в ЯТЦ, должны как обеспечивать требуемый уровень качества, так и, в первую очередь, отвечать высоким требованиям с точки зрения надёжности и безопасности. Вопрос стандартизации требований к надёжности оборудования рассмотрен в исследовательской работе Галиева И.И., который выделяет три группы стандартов, напрямую или косвенно касающихся надёжности и безопасности оборудования, введенных в действие начиная с 1983 г. [29].

Высокие требования, предъявляемые к АСУ и САУ, применяемым в атомной отрасли, нередко вынуждают конструкторов и инженеров прибегать к использованию компонентов, зарубежных фирмам-разработчиков и производителей. Галиев отмечает: «Исходя из обзора нормативных документов и стандартов, можно сделать вывод об идентичности международных и отечественных требований надёжности и безопасности. При этом политика предприятий-изготовителей аппаратных средств АСУ ТП в части предоставляемых данных различна.» [29].

Согласно новости, опубликованной на портале РАСУ 24 февраля 2021 года [30], проблемой унификации компонентов и импортозамещения для нужд автоматизации в атомной энергетике в настоящее время занимается целая группа экспертов с таких ведущих предприятий отрасли, как: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», АО «НИКИЭТ», АО «УЭМЗ», АО «СНИИП», АО «ФНПЦ ПО «Старт» им. М.В. Проценко», ФГУП «ПСЗ», АО «Наука и инновации».

При оценке насколько компонент отвечает требованиям надёжности перед приобретением изделия отечественного производства, потребителю в большинстве случаев доступна информация о средней наработке на отказ [29] (камеры (рисунок 1.1 [31]), датчики (рисунок 1.2), реле и т.д.).



Рисунок 1.1 – Радиационно-стойкие телевизионные системы

В ряде случаев изготовитель приводит какие-либо стандарты, которым удовлетворяют показатели его продукции (ТУ, ГОСТ, свидетельства об одобрении, об утверждении средств измерений и т.д.). Однако можно резюмировать, что без существенного добросовестного участия производителя потребителю не удастся с приемлемой точностью определить, к примеру, такой статистически важный параметр, как вероятность ложного срабатывания. Наличие сертификатов соответствия стандартам безопасности не позволяет однозначно оценить реальный уровень безопасности по интервальным значениям. За рубежом фирмы, производящие аппаратное оборудование для систем автоматизации, отдают предпочтение показателю уровня полноты безопасности. Это позволяет провести

интервальную оценку гарантированного диапазона значений для параметра вероятности отказа.



Рисунок 1.2 – Преобразователи давления радиационно-стойкие

Показатели надежности делятся на четыре группы: показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости [29]. Показатель «сохраняемость» характеризует способность объекта обеспечивать заявленные производителем характеристики в ходе хранения, транспортировки и при эксплуатации. Технологические объекты в атомной отрасли нередко требуют применения сложных специализированных систем и устройств для обслуживания. Иногда, как в случае с устройством ремонта облицовки бассейна выдержки АЭС, обслуживаемое оборудование требуется длительное время складировать и периодически собирать на территории объектов АЭС.¹ В таких случаях для элементов системы управления показатель «сохраняемости» становится критически важным.

Однако при проектировании и в ходе эксплуатации АСУ и САУ нет возможности руководствоваться соображениями максимизации показателей надёжности системы. Поддержание определённого уровня надёжности за счёт затрат на плановое обслуживание и ремонт при сохранении допустимого уровня потерь, связанных с отказами, сопутствующими простоями и внеплановым ремонтом – вот основная цель специалистов. Попытки повысить надёжность выше

¹ Устройство для ремонта облицовки бассейна выдержки: пат. 2661335 С1 Рос. Федерация: МПК G21C 17/01 / Карасев Н. И., Попов В. С., Просвирин 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.

определённого уровня напротив принесут убытки за счёт затрат на приобретение и обслуживание дополнительного оборудования в целях дублирования и резервирования элементов системы, превышающих затраты на потенциальные потери за полный цикл эксплуатации. Кроме того, избыточное усложнение может повлечь увеличение числа ложных срабатываний системы обнаружения неисправностей, последствия которых могут оказаться намного серьёзнее, чем потенциальные последствия действительного возникновения неисправности.

В системах автоматизации, разрабатываемых для участия в ЗЧ ЯТЦ, показатели надёжности учитываются на всех этапах разработки. Однако, особое внимание уделяется влиянию агрессивных факторов внешней среды на этапе выбора аппаратных частей цифрового программного оборудования, частей видео, радио, сетевого и другого чувствительного оборудования, включая датчики, контроллеры электродвигателей, энкодеры и материалы конструкции установок.

На ряду с требованиями к показателям надёжности, современное состояние атомной отрасли диктует и другие требования к проектированию АСУ и САУ, отражающие общемировую тенденцию к развитию с учетом внутреннего и внешнего опыта. Управляющие системы развиваются в сторону большей эффективности взаимодействия человека и машины за счёт более совершенных ЧМИ. Меренов С. В. и Коптелов М. В. в своём исследовании отмечают: «Современные технические и системные решения управляющих систем предполагают: использование интегрированной управляющей системы, использование унифицированных, серийно выпускаемых программно-технических средств, применение интеллектуальных сенсоров и приводов арматур с оптоволоконной передачей информации и команд, реализацию единой системы комплексного диагностирования технологического оборудования, объединение стационарных систем контроля и управления в единую, внедрение защиты программно-технических средств и комплексов, применение дисплейных пультов управления для локальных СКУ с объединением по общей шине.» [32].

Авторы склоняются к тому, что для развития систем управления в рамках современной концепции потребуется параллельная модернизация как самой

системы, так и ЧМИ в её составе. Следующим шагом в развитии ЧМИ могут послужить интеллектуальные управляющие системы, которые окажут положительное влияние на надёжность и эффективность управления за счёт ряда факторов, в числе которых снижение общей сложности освоения интерфейса взаимодействия, повышение уровня интуитивности и удобства, смещение части функций в сторону автоматизированной системы. Хотя многие концепции развития не устаревают и сохраняются десятки лет, но способы реализации требуют постоянной актуализации [33].

Архитектура управляющих систем третьего поколения должна быть построена с соблюдением принципов глубокоэшелонированной защиты, защиты от отказа по общей причине, обеспечения безопасного отказа и предотвращения ошибок оператора. Действия оператора должны быть основаны на базе знаний. В качестве «помощника» оператора должны быть внедрены экспертные системы. Третье поколение систем автоматизации подразумевает использование интеллектуальных стратегий управления и регулирования.

Следующим этапом развития управляющих систем должна стать:

- 1) всережимная автоматизация блока;
- 2) интеграция системы путем использования информационных сетей и общей базы данных и базы знаний;
- 3) интеграция всех функций контроля и управления;
- 4) использование роботизированных и телемеханических систем. [34].

Что подтверждает наблюдаемую тенденцию сведения задачи оператора к наблюдению и экспертной оценке работы автоматизированных систем. Внедрение функций экспертного управления позволит взять на себя и часть задач по исправлению ошибок.

Можно заключить, что существует целый ряд важных требований, предъявляемых к оборудованию, применяемому на объектах ЗЧ ЯТЦ и компонентам в составе этого оборудования. В контексте мехатронных устройств следует отметить, что границы возможностей проектирования устройства и подбора элементной базы под нужды задач управления крайне ограничены. В

число факторов, существенно влияющих на свободу проектирования оборудования входят нестандартность значений параметров, повышенные требования к безопасности, высокие требования к стойкости, а также требования в рамках политики импортозамещения и др. Необходимость осуществлять управление с учетом доступных средств и предъявляемых требований вынуждает отказаться от использования готовых решений и адаптировать решения, применяемые в мировой практике под нужды атомной промышленности.

1.3 Анализ существующих решений

К настоящему моменту, предприятия и организации атомной отрасли Российской Федерации активно используют автоматизированные технологические установки для проведения вспомогательных технологических процессов при работе с химически токсичными объектами, а также грузами, представляющими радиационную опасность. Как отмечено в главе ранее, наибольшей опасности персонал и оборудование подвергаются на этапах разгрузки, транспортировки и погрузки ОЯТ и ТРО. Написанное как в порядке очередности, так и по степени подверженности опасному агрессивному воздействию в первую очередь это касается перегрузочных машин. Перегрузочная машина является одним из важнейших элементов функционирования АЭС (рисунок 1.3). Эта машина может рассматриваться в качестве крупного робота-манипулятора, представляющего собой комплекс из мостового крана и других механизмов, включая систему управления. Согласно специализированному учебнику Будова В. М. и Фарафонова В. А.: «Мостовой кран включает подвижный напольный мост с установленной на него передвижной тележкой, на которую смонтирована выдвижная штанга с захватывающим устройством на конце. Перегрузочная машина предназначена для перемещения ТВС ядерного реактора под слоем воды с выполнением следующего ряда операций: выгрузка отработавших ТВС из реактора, транспортировка и установка их в ячейки стеллажа бассейна выдержки; выгрузка

свежих ТВС из герметичных пеналов в стеллажах бассейна выдержки; транспортировка свежих ТВС из бассейна выдержки и установка их в реактор; перестановка ТВС внутри реактора; выгрузка ТВС из реактора, транспортировка и установка их в пеналы КГО; установка-извлечение пробок в пеналах КГО и герметичных пеналах; перегрузка проверенных ТВС из пеналов КГО в реактор или бассейн выдержки в зависимости от результатов контроля; зачистка посадочных гнезд под ТВС с помощью специального устройства; осмотр зоны реактора, посадочных гнезд под ТВС в днище корзины и наблюдение за проведением операций по сцеплению-расцеплению рабочей штанги с транспортируемыми элементами с помощью телевизионных камер.» [35].



Рисунок 1.3 – Перегрузочная машина в реакторном зале Нововоронежской АЭС

Необходимость перегрузки ТВС внутри реактора обусловлена неравномерностью «сжигания» ядерного топлива и связана с понятиями энергонапряжённости топливной нагрузки и «эффективной кампании топлива», характеризующей время достижения проектной глубины выгорания при номинальной мощности, а потребность в перегрузке зависит от выбранного режима перегрузки топлива, которая подбирается с учетом многих параметров, зависящих от типа и параметров конкретного реактора, а также уровня требуемой мощности [36].

Управление ПМ прошлого поколения осуществлялось с помощью АСУ с ЧМИ. Оператор ориентировался на показания шкал аналоговых датчиков (сельсинов-индикаторов) при осуществлении всех операций: наведении захвата штанги на кассету ТВС, захвате кассеты поворотом внутренней секции рабочей штанги, извлечении, переносе и установке кассеты [35].

Согласно работе Якубенко И.А., в настоящее время СУМП представляет собой робототехнический мехатронный комплекс, способный работать с минимальным участием человека, что возможно за счёт оснащения перегрузочной машины системой управления, действующей на уровне УВК [37]. При этом в работе указывается, что распределенная двухканальная структура УВК обеспечивает выполнение требований отказоустойчивости при независимости информационных и управляющих функций [37].

Согласно вышеупомянутой статье: «УВК может функционировать в одном из режимов: «автоматический» режим, обеспечивающий выполнение циклов перегрузки или отдельных операций, установленных технологическими алгоритмами; «ручной» режим, обеспечивающий выполнение действий, установленных оператором (обеспечивается возможность работы только одного механизма ПМ); «тренажерный» режим, обеспечивающий обучение операторов ПМ, осуществляет имитационное моделирование на персональной ЭВМ в реальном масштабе времени процесса перегрузки без непосредственного управления механизмами ПМ.» [37].

В составе единого комплекса с высокоуровневой системой, автоматизирующей процесс формирования логистических последовательностей перегрузки кассет, весь комплекс перегрузки в целом достигает 4-го и даже 5-го уровней управления производственным объектом (рисунок 1.4) и способен выполнять часть функций планирования ресурсов АЭС.

Из эксплуатируемого оборудования, ПМ является наиболее близким объектом управления к установке, спроектированной для ремонта облицовки бассейна выдержки АЭС. Определённо, находящиеся в эксплуатации установки требуют проведения модернизации в контексте интеллектуализации функций, как

отмечено в разделе 1.1. Однако, стоит также отметить, что многие инновационные мехатронные системы, участвующие в вышеуказанных наиболее важных с точки зрения химической и радиационной опасности процессах ЗЧ ЯТЦ, проектируются продолжительное время. Первоначальные требования технического задания в целях ускорения создания прототипа, упрощения механизма проведения испытаний и скорейшего внедрения готового изделия, могут допускать организацию системы управления вспомогательного оборудования, отвечающую второму-третьему уровню модели автоматизации управления, что создаёт предпосылки для исследования путей их модернизации.

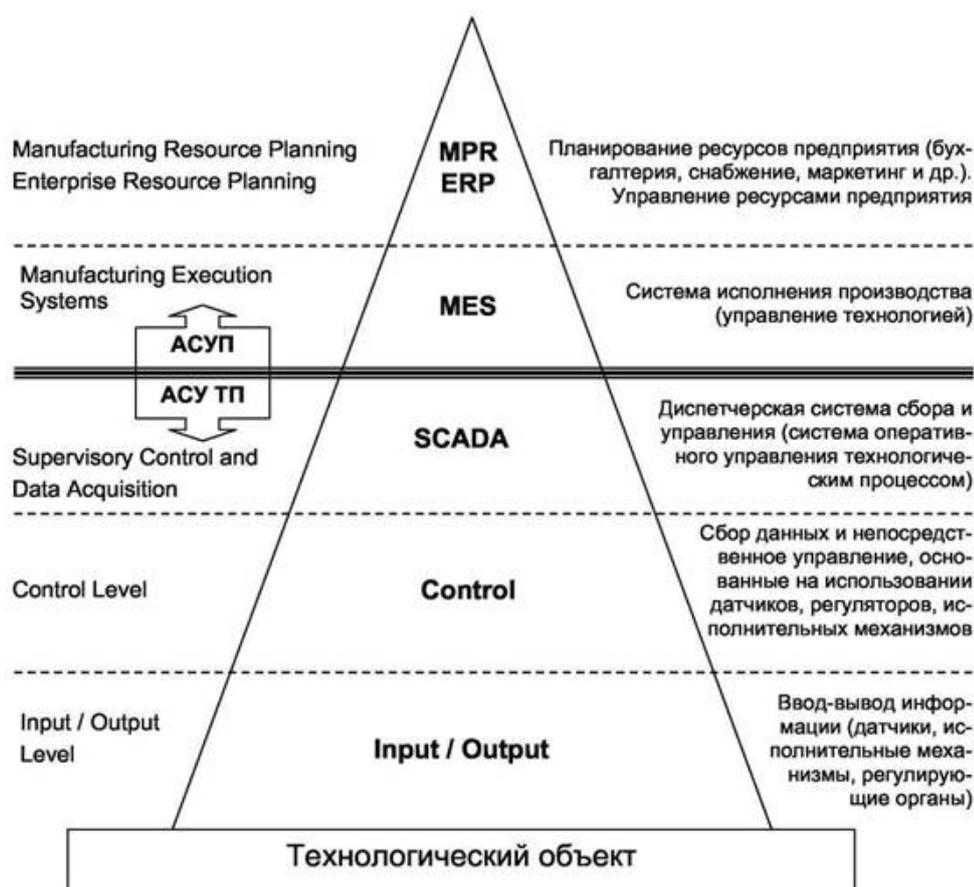


Рисунок 1.4 – Многоуровневая модель системы управления цифровым производством [38]

Отмеченное выше в частности касается рассматриваемых в исследовании мехатронных устройств, включённых в состав УЭХД и УРОБВ. В целях сокращения сроков разработки и изготовления оборудования, а также для повышения качества готовых систем, разработка и изготовление проводятся в несколько этапов, первый из которых призван обеспечить номинальное

выполнение системами их основных и самых востребованных функций. В исследовании рассмотрены методы управления мехатронными устройствами в составе вышеупомянутых систем, развивающие функции управления за счёт повышения гибкости и автономности автоматизированных комплексов, а также снижения роли оператора, что является востребованной задачей в силу аргументов, приведённых в разделах 1.1-1.3.

1.4 Анализ требований к СУ и задач управления в КП ТРО на примере установки электрохимической дезактивации

В ходе производства ядерных материалов, необходимых для выполнения оборонных, энергетических и научно-исследовательских программ государственной важности, встаёт проблема хранения и утилизации РАО, образование которых в ходе активной деятельности в атомной отрасли неизбежно. В среднем, при делении ядер U^{235} , U^{233} , Pu^{239} в активной зоне реактора, а также в результате активации нейтронами разных материалов, в зависимости от мощности и типа реакторной установки, за год образуется от 0,15 до 0,35 м³ жидких и от 0,1 до 0,3 м³ – твердых РАО на 1 МВт [39].

Согласно материалам исследования Хвостовой М. С., посвященного вопросам обращения с РАО, требующими крайне осторожного и в высшей степени специализированного подхода при обращении, на этапе зарождения атомной промышленности человечество допустило немало ошибок, следуя процедурам, предусмотренным для обращения с обычными промышленными отходами. Тепловое и радиационное воздействие РАО было учтено в недостаточной степени, что привело к ряду радиационных инцидентов в 1949—1951 гг. и радиационной аварии на ФГУП «ПО „Маяк“» в 1957 г. [40]. РАО несёт высокую потенциальную опасность для живой природы и человека, загрязняя радионуклидами (радиоактивными изотопами) воздушную среду, воду и почву.

В работе отмечается, что в настоящий момент на предприятиях ГК «Росатом» в пунктах хранения находится более 500 млн м³ ЖРО [41]. НАО – низкоактивные отходы, САО – среднеактивные отходы, ВАО – высокоактивные отходы.

Исходя из вышеизложенного можно подытожить, что комплексы, подобные КП РАО, сильно востребованы, а задача масштабирования и развития всех составляющих комплекса актуальна в настоящее время и в перспективе. Исследуем уровень автоматизации систем ЗЧ ТЯЦ на примере установки дезактивации из КП РАО на предмет пробелов и на возможность применения интеллектуальных методов и средств поиска решений.²

Установка электрохимической дезактивации предназначена для дезактивации металлических радиоактивных отходов САО, НАО и ОН РАО минимальными размерами 15 x 15 x 15 мм и максимальными, ограниченными размерами сетчатой корзины, поступающих на переработку в КП ТРО, входящий в состав КП РАО Курской АЭС. Тип установки: жидкостная с применением электролита, электрического поля и ультразвуковыми излучателями, участками приготовления электролита и его кондиционирования, в комплекте с транспортным оборудованием. Электрохимическая дезактивация совместно с ультразвуковой обработкой применяется в качестве дополнительной процедуры после механической дезактивации металлических поверхностей.

Согласно технической документации, на установку электрохимической дезактивации поступают потоки металлических радиоактивных отходов [41]. Компоновка элементов установки электрохимической дезактивации представлена на рисунке 1.5. Планы расположения оборудования для каждого уровня приведены на рисунках В.1 и В.2 в приложении В. Для удобства и компактности, элементы расположены на нескольких уровнях с отметками 0 и 6 метров.

² 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 «УфаАтомХимМаш», 2017 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

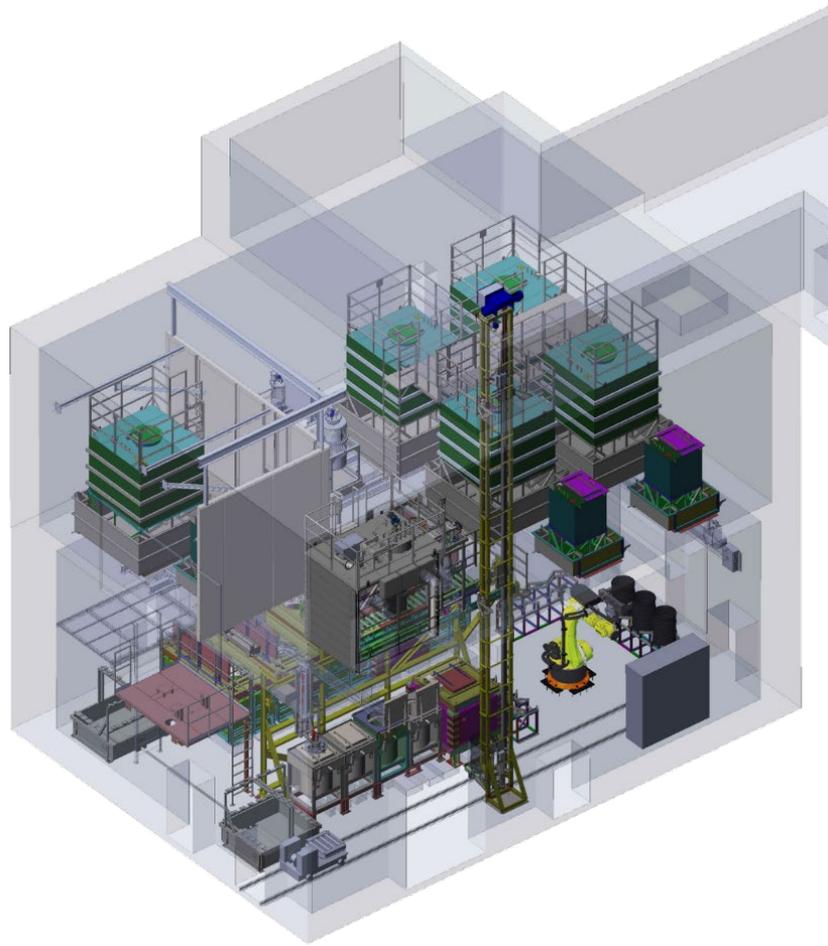


Рисунок 1.5 – Компоновка элементов установки электрохимической дезактивации
СКУ УЭХД, реализует следующие функции:

- 1) информационные вычислительные функции;
- 2) управляющую функцию;
- 3) вспомогательную функцию.

В состав информационно-вычислительной функции СКУ УЭХД входят следующие задачи: контроль сигналов о местном пуске систем; проверка достоверности информации; создание архива событий; вычисление интегральных показателей функционирования объекта (наработку в части основного оборудования, производительность установок); передача информации в смежные системы; вычисление и не прямое измерение параметров процесса; учёт циклов работы оборудования сбор, обработка и предоставление комплексных технических, технологических и экономических данных оперативному персоналу; централизованный контроль и измерение технологических параметров.

Управляющая функция должна обеспечивать автоматизированное управление выполнением технологического процесса, возможность безопасного для персонала дистанционного управления, защиту доступа к информационным ресурсам, управлением режимом работы с помощью защит и блокировок, перенастройка регуляторов, защит и блокировок, работа с архивами данных, модернизация справочной информации.

В СКУ УЭХД реализованы следующие виды автоматического управления: неотключаемые (жесткие защитные) блокировки технологического оборудования; отключаемые блокировки технологического оборудования; программы дискретного управления; технологические защиты (защиты оборудования и технологических процессов).

Требование к программному обеспечению СКУ УЭХД включают следующие важные для рассматриваемой в работе задачи пункты: СКУ УЭХД должно сопровождаться адаптируемым программным обеспечением с достаточным для выполнения требуемых задач во всех режимах функционалом; требуется предусмотреть возможность доработки и развития программного обеспечения для расширения возможностей решения алгоритмических задач, а также для актуализации и пополнения данных СКУ УЭХД в течение всего времени эксплуатации. ПТК СКУ УЭХД должны допускать возможность развития и последующей модернизации, как в части увеличения объёма контроля и управления, так и в части изменения алгоритмов функционирования, согласно требованиям технического задания.

Задача управления механизмами и арматурой в рамках управляющей функции СКУ УЭХД возложена на АПТС, представляющую распределённую систему управления и содержащую в своём составе промышленные программируемые логические контроллеры, а также контроллеры электромеханических преобразователей.

Согласно требованиям, с учётом габаритов механизмов, габаритов и массы опасного груза, скорость функционирования мехатронного устройства-

манипулятора в комплексе существенно ограничена в интересах безопасности при работе с опасными грузами (Таблица 1.1).

Предъявленные требования, касающиеся возможности адаптации программного обеспечения СКУ УЭХД, а также возможности наращивания алгоритмических задач с изменением имеющихся или вводом дополнительных данных, особенно сильно затрагивают функцию управления механизмами и арматурой. Весьма низкие значения допустимых скоростей перемещения крана, тележки и подъема груза при больших объемах грузов ТРО и высокой востребованности проведения процесса дезактивации способствуют повышению степени важности планирования траекторий перемещения конечного звена мехатронного устройства, осуществляющего перемещения корзин с ТРО в процессе дезактивации.

Таблица 1.1 – Номинальные параметры мехатронного устройства УЭХД

Наименование параметра	Значение параметра
Грузоподъемность нетто, т	
главного подъема*	1,0
вспомогательного подъема**	1,0
Пролет крана, м	10,85
Высота подъема, м	
главного подъема	1,7
вспомогательного подъема	1,3-3,0
Скорость перемещения крана, м/мин	
основная	5 ±5%
дополнительная	2,5 ±5%
доводочная	0,5 ±5%
Ускорение (замедление) перемещения крана при пуске, остановке и изменении скоростей, м/сек ²	0,15 _{-0,03}
Скорость перемещения тележки, м/мин	
основная	5±5%
дополнительная	2,5±5%
доводочная	0,5±5%
Ускорение (замедление) перемещения тележки при пуске, остановке и изменении скоростей, м/сек ²	0,15 _{-0,03}
Скорость подъема (опускания) главного крюка, м/мин	
основная	5±5%
дополнительная	2,5±5%
доводочная	0,5±5%
Ускорение (замедление) подъема (опускания) главного крюка при пуске, остановке и изменении скоростей, м/сек ²	0,05 _{-0,01}

В программе процесса дезактивации изменению могут подвергаться последовательность, число или пространственное расположение точек проведения соответствующих технологических операций (технологических точек). Также, согласно требованиям, функции комплекса могут быть расширены, что может привести к добавлению нескольких разных технологических циклов с различными последовательностями операций, а также к необходимости различным образом комбинировать выполнение этих программ во времени.

Согласно вышеописанному, востребована разработка математического и алгоритмического механизма, позволяющего автоматически выполнять планирование траекторий движения конечного звена мехатронного устройства-манипулятора с учетом изменений в цикле технологических операций и соблюдением всех требований к операциям перемещения.

1.5 Анализ требований к СУ и задач управления в ТОиР на примере устройства для ремонта бассейна выдержки

Теперь обратимся к установкам, призванным работать в условиях существенно меньшей определённости. К таким установкам с уверенностью можно отнести оборудование АСУ ТОиР. Системы, призванные производить ремонт или проводить контроль, работают в условиях существенных неопределённостей и должны отвечать более высоким требованиям универсальности, чем оборудование промышленных АСУ ТП. Однако среди установок автоматизированного неразрушающего контроля большая часть систем сводит всё множество поиска к управлению механизмами вдоль одной-двух координат. Этому стараются добиться доступными при проектировании способами. Например, для контроля сварных соединений труб используют кольцевые подвижные направляющие (рисунок 1.6).

Меньшее количество координатных осей существенно упрощает как механическую часть мехатронной системы и решение задач кинематики при

управлении конечным звеном, так и математическую сложность решения задачи автоматизации поиска пути за счет снижения размерности пространства поиска.

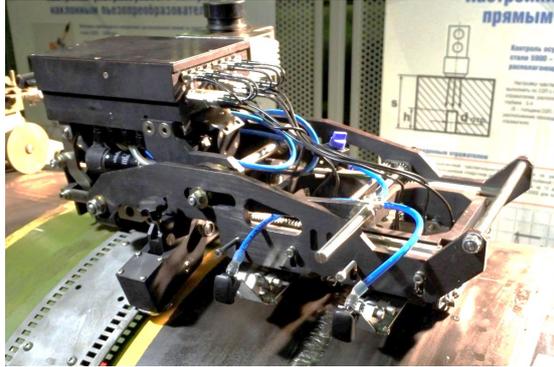


Рисунок 1.6 – Установка автоматизированного ультразвукового контроля продольных и кольцевых сварных соединений

К сожалению, не все задачи АСУ ТОиР, обслуживающих объекты ЗЧ ТЯЦ можно свести к простым в силу ряда причин:

- 1) большие габариты объекта обслуживания;
- 2) доступ к объекту физически ограничен;
- 3) высокая опасность среды по отношению к человеку;
- 4) агрессивность среды по отношению к материалам и электронике;
- 5) распределённость поверхностей контроля и ремонта по всей протяженности габаритов объекта;
- 6) неопределённость наличия и расположения посторонних объектов в рабочей зоне установки ТОиР.

Одной из задач, требующих применения АСУ ТОиР с мехатронным устройством является задача поиска и устранения течи БВ АЭС. Для решения этой задачи разработано устройство для ремонта БВ. Это устройство представляет собой роботизированную установку, состоящую из следующих частей: рама опорная (рисунок 1.7а-1), тележка (рисунок 1.7а-2), штанга телескопическая (рисунок 1.7а-5), модуль поиска течи – стена (рисунок 1.9а), модуль поиска течи – угол (рисунок 1.9а), модуль зачистки (рисунок 1.11а), модуль наложения пластыря – стена (рисунок 1.12а), модуль наложения пластыря – угол (рисунок 1.13а), транспортно-установочная тележка, стеллаж, подъёмник штанги, телевизионная система, аппаратура управления.

Опорная рама подвижна и располагается на рельсовом пути, используемом для перемещения перегрузочной машины. Машина перегрузочная переводится в крайнее положение над шахтой реактора и фиксируется на рельсовых направляющих (рисунок 1.7а-8) от несанкционированного перемещения на протяжении всего времени ремонта облицовки БВ. Внешний вид устройства для ремонта облицовки приведён схематично на рисунке 1.7а. Вид устройства с выдвинутой штангой при соблюдении масштаба приведён на рисунке 1.7б. Устройство включает набор специализированных модулей, закрепляемых на подвеске (рисунок 1.7а-10) конечного звена телескопической штанги и может обслуживать следующие участки облицовки: стены, дно, углы стена-стена, углы стена-дно.

Дно бассейна выдержки оборудовано стеллажами (рисунок 1.8).

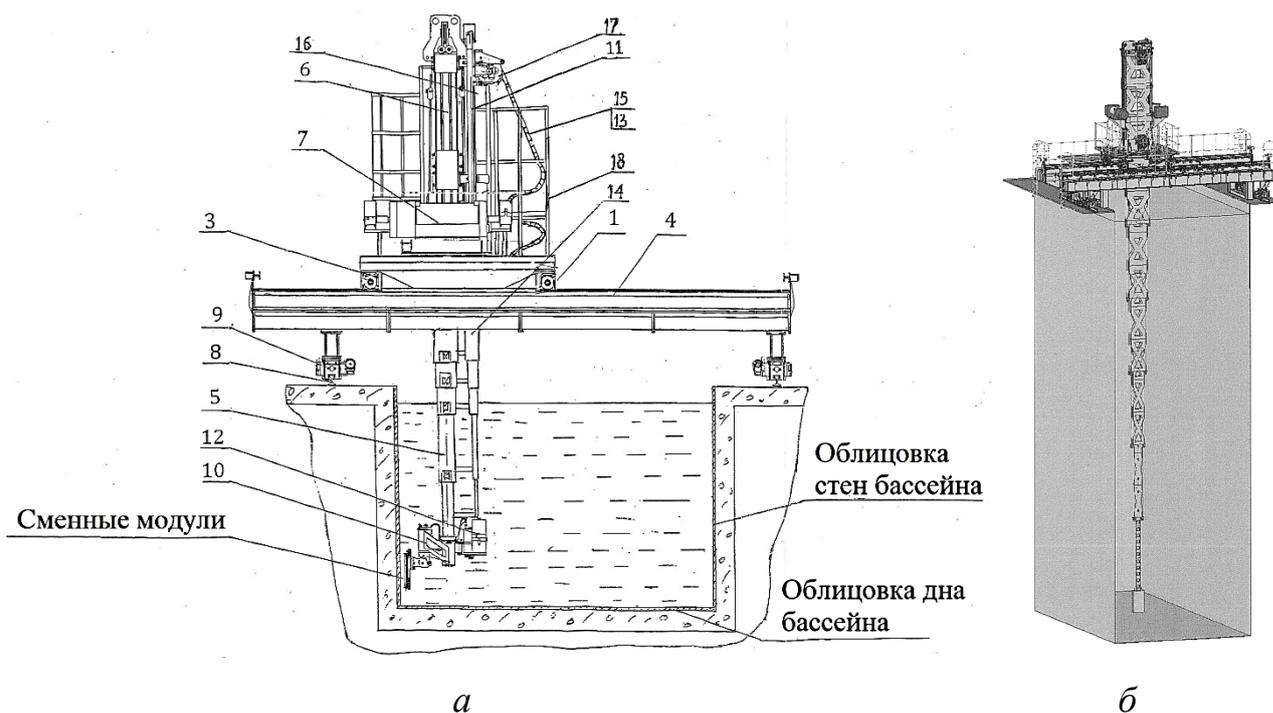


Рисунок 1.7 – Устройство для контроля и ремонта облицовки бассейна выдержки

Стеллажи являются оборудованием внутристанционного хранилища отработавшего топлива АЭС (бассейна выдержки) и служат для промежуточного хранения отработавшего топлива перед вывозом в региональные хранилища или на переработку.

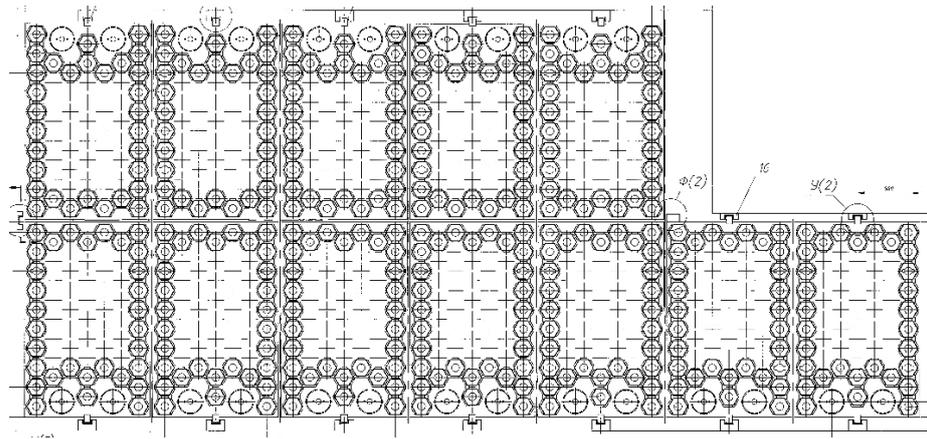


Рисунок 1.8 – Стеллажи бассейна выдержки

Модули устанавливаются на нижнюю секцию штанги вручную в специально отведённом для обслуживания устройстве положении. Крепление модулей позволяет закрепить установленный модуль в восьми направлениях в горизонтальной плоскости и в двух положениях в вертикальной. Комбинации соответствующих модулей и способа крепления позволяют осуществлять ряд процедур:

- 1) поиск течи, стена (рисунок 1.9б) с использованием модуля 1 поиска течи – стена (рисунок 1.9а);
- 2) поиск течи, дно (рисунок 1.9в) с использованием модуля 1 поиска течи – стена (рисунок 1.9а);

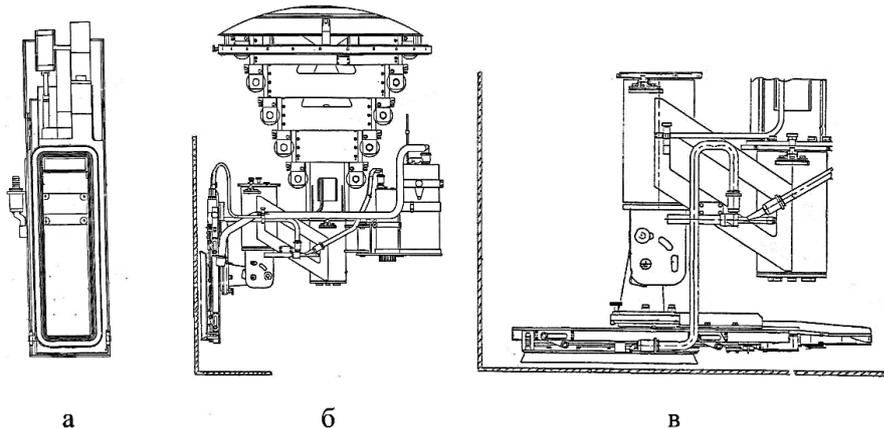


Рисунок 1.9 – Модуль 1 поиска течи, стена

- 3) поиск течи, угол стена-стена (рисунок 1.10б) с использованием модуля 2 поиска течи – угол (рисунок 1.10а);

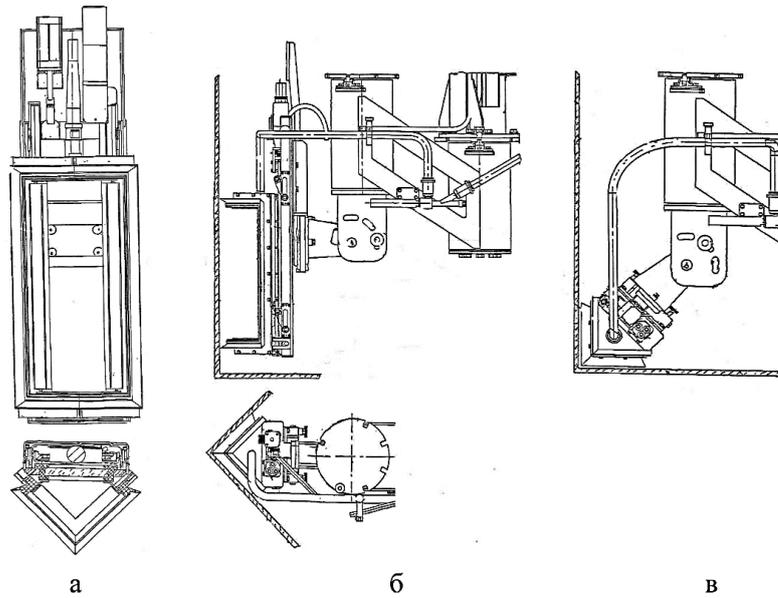


Рисунок 1.10 – Модуль 2 поиска течи, угол

- 4) поиск течи, угол стена-дно (рисунок 1.10в) с использованием модуля 2 поиска течи – угол (рисунок 1.10а);
- 5) проведение зачистки, стена (рисунок 1.11б) с использованием модуля 3 зачистки – стена (рисунок 1.11а);
- 6) проведение зачистки, дно (рисунок 1.11в) с использованием модуля 3 зачистки – стена (рисунок 1.11а);

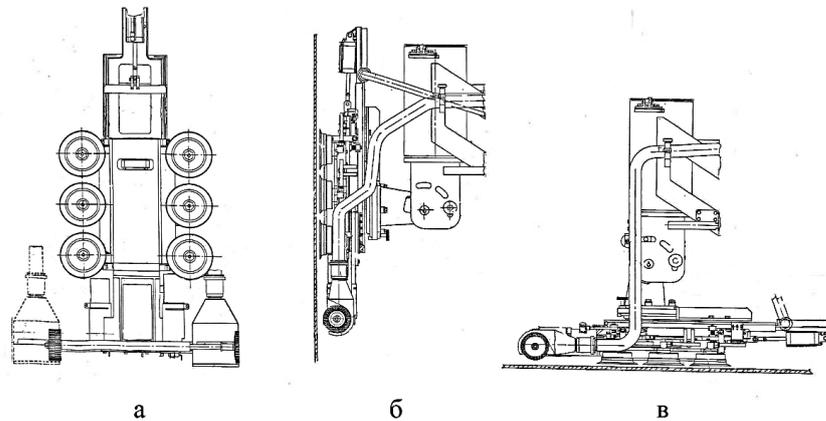


Рисунок 1.11 – Модуль 3 зачистки

- 7) наложение пластыря, стена (рисунок 1.12б) с использованием модуля 4 наложения пластыря – стена (рисунок 1.12а);
- 8) наложение пластыря, дно (рисунок 1.12в) с использованием модуля 4 наложения пластыря – стена (рисунок 1.12а);

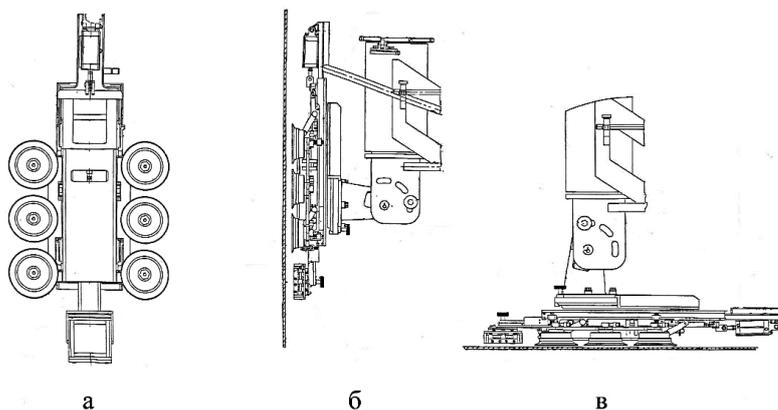


Рисунок 1.12 – Модуль 4 наложения пластыря, стена

- 9) наложение пластыря, угол стена-стена (рисунок 1.13б) с использованием модуля 5 наложения пластыря – угол (рисунок 1.13а);
- 10) наложение пластыря, угол стена-дно (рисунок 1.13в) с использованием модуля 5 наложения пластыря – угол (рисунок 1.13а).

Поиск точного местоположения начинается на ограниченных участках поверхности (зонах поиска течи) облицовки бассейна, на которых предварительно были обнаружены утечки. Пример расположения зоны поиска течи на стене облицовки БВ приведён на рисунке 1.14.

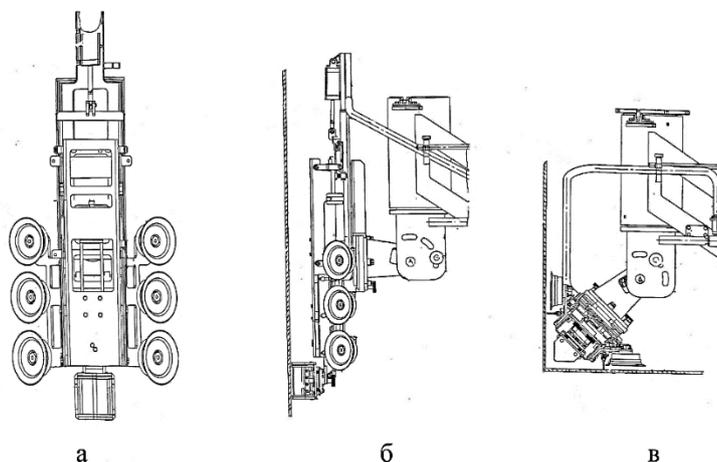


Рисунок 1.13 – Модуль 5 наложения пластыря, угол

После установки опорной рамы, тележки и штанги в требуемое положение и приведения рабочей поверхности установленного модуля в заданную точку с помощью электродвигателей, а также касания облицовки, при помощи пневматического привода производится поднятие платформы модуля и достигается прижатие пузырьковой рамки модуля поиска к поверхности облицовки

бассейна. Установленный на конце штанги насос начинает откачивать воду из пузырьковой камеры.

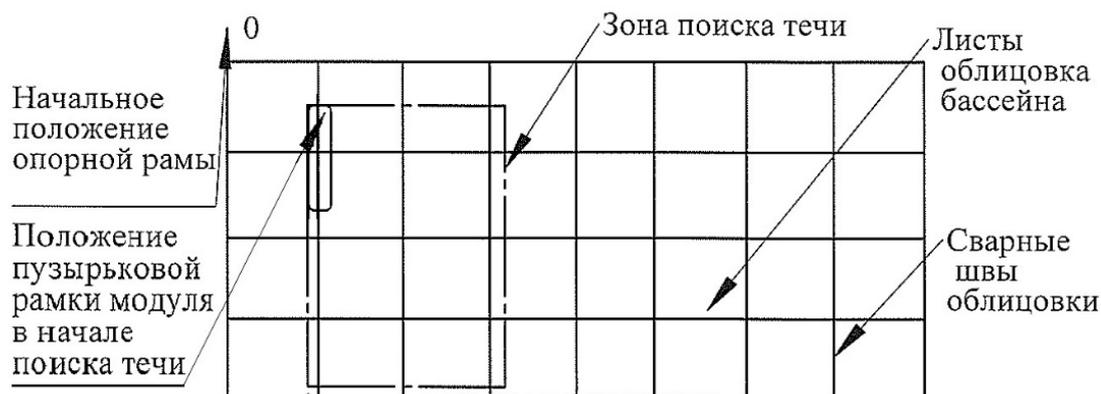


Рисунок 1.14 – Зона поиска течи на стене облицовки БВ

В камере формируется разрежение, которое приводит к прохождению воздуха через сквозные щели в области течи, если эта зона накрыта пузырьковой рамкой. При этом воздушные пузырьки попадают в поле видимости установленной на поисковом модуле радиационно-стойкой телекамеры (рисунок 1.15). Изображение пузырьков передаётся на монитор оператора. Оператор фиксирует координаты обнаруженной течи в программе управления.



Рисунок 1.15 – Радиационно-стойкая телевизионная камера и блок управления

Для более точного определения координат течи, в процессе поиска телекамера перемещается вдоль рамки пузырьковой камеры, а её положение фиксируется посредством тросового датчика. Телевизионная система наблюдения состоит из экрана монитора на пульте оператора, радиационно-стойких видеокамер со светильниками, установленными в местах крепления ремонтных модулей к штанге манипулятора и обеспечивает передачу изображения обстановки в зоне поиска течи на экран монитора оператора, наблюдение за перемещением манипулятора с ремонтными модулями к месту проведения работ по поиску течи,

зачистке поверхности облицовки и наложению пластыря, поиск течи и передачу изображения воздушных пузырьков на экран монитора оператора.

В случае необнаружения течи на проверяемом участке (отсутствие воздушных пузырьков), проводится поиск на следующем, соседнем участке зоны поиска с перекрытием площадей проверенного и нового участков на заданную величину. Перемещение телекамеры, поднятие и опускание платформы с пузырьковой рамкой осуществляется за счет пневматических приводов. Для этого модуль поиска оснащён пневматическим двигателем и поршневым пневматическим цилиндром. Управление пневмосистемой производится при помощи блока пневмораспределителей, расположенного на конце крайней секции штанги. Питание пневмосистемы производится установленным вне объема бассейна компрессором. После завершения операции, отключается насос пузырьковой рамки, платформа опускается, а модуль отводится от облицовки и переводится на следующий участок. Поиск течи может также проводиться и на облицовке дна при соответствующем расположении модуля поиска. Аналогичным образом, с использованием углового модуля поиска, производится поиск течи в угловых зонах поиска (рисунок 1.16).

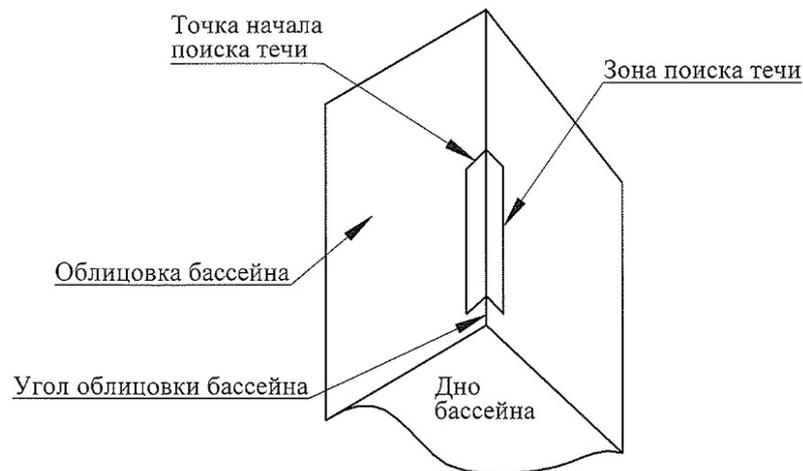


Рисунок 1.16 – Угловая зона поиска течи на стене облицовки БВ

В случае обнаружения сквозных щелей, вызывающих течи, производится замена модуля поиска на модуль зачистки. Используя координаты участков сквозных щелей, зафиксированные с помощью программного обеспечения с учетом поправки на координаты рабочего инструмента модуля зачистки,

производится вывод щёток модуля зачистки на участок течи. Модуль зачистки выполняет зачистку поверхности металлической облицовки бассейна от окислов металла, осадков посторонних частиц и загрязнений в местах обнаружения течи для последующего наложения в эти места клеёвого пластыря (рисунок 1.17). Это улучшает прилегание и закрепление на облицовке.

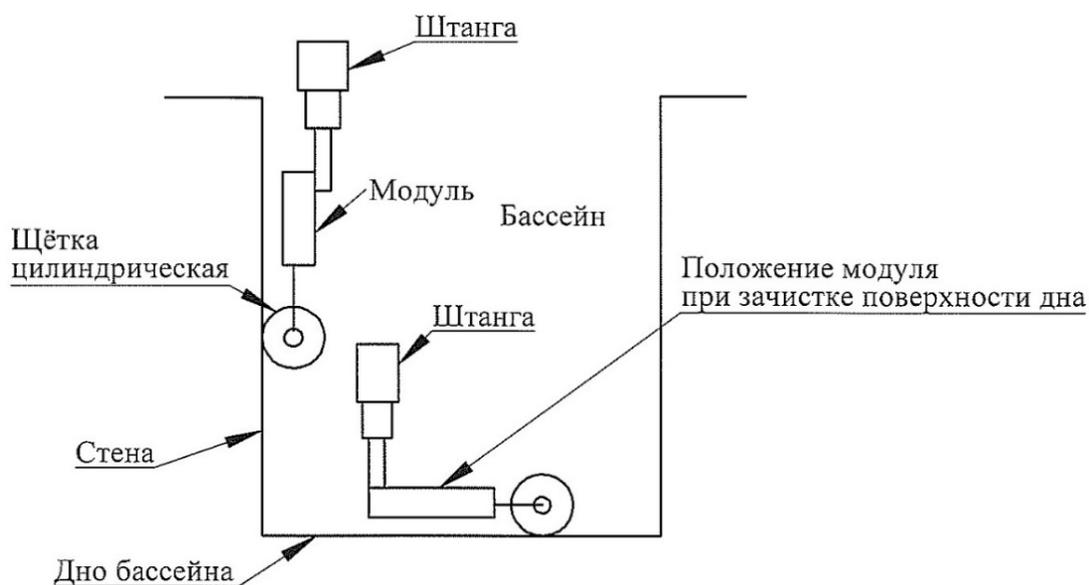


Рисунок 1.17 – Зачистка металлической облицовки в местах течи

Зачистка плоских поверхностей осуществляется круглыми цилиндрическими щётками из нержавеющей проволоки, а зачистка угловых поверхностей – круглыми коническими (чашечными) щётками. Опускание и вращение щёток, возвратно-поступательное поперечное и возвратно-поступательное продольное перемещение щёток производится с помощью пневмоприводов.

Для лучшего позиционирования и более сильного прижатия щёток, модуль крепится к облицовке набором гидроприсосок. Гидроприсоски приводятся в действие насосом. За счёт возвратно-поступательных движений по двум осям, закреплённый модуль зачищает участок облицовки размером 120x120мм. Продукты зачистки (абразив, грязь, шлам) втягиваются потоком воды и по всасывающему патрубку модуля зачистки поступают в фильтрующее устройство.

На финальной стадии зачистки движение щёток останавливается, рычаг с щётками поднимается, работа присосок прекращается остановкой насоса и модуль отводится от облицовки. Аналогичным образом производится зачистка дна при переориентированном положении модуля зачистки.

После зачистки проводится процедура наложения пластыря. В зависимости от вида участка обнаружения течи, на подвеску штанги крепится модуль с плоским зажимом пластыря либо модуль с угловым зажимом пластыря. После закрепления модуля гидравлическими присосками к облицовке БВ, пневматический привод обеспечивает прижатие специального зажима с пластырем. Пластырь выдерживается в прижатом состоянии определённое время, зависящее от температуры воды в бассейне, свойств компаунда-клея и других факторов (Таблица 1.2). Всё время затвердевания компаунда поддерживается работа насоса присосок и компрессора пневмоцилиндра.

По аналогичной технологии производится наложения пластыря на облицовку дна БВ, а также в углах облицовки стена-стена и стена-дно с применением углового модуля наложения пластыря. Процедура заполнения зажима клеевой композицией представлена на рисунке 1.18. Для фиксации положений опорной рамы и тележки на рельсах, все колёса устройства (и приводные и опорные) оборудованы электромагнитными тормозами. Тормоза включаются в момент остановки рамы или тележки при выключении приводов соответствующих двигателей.

Таблица 1.2 – Техническая характеристика клеевой композиции

Прочность сцепления на отрыв, МПа		≥ 8
Длительность отверждения под водой, ч	при $t = 20^{\circ}\text{C}$	18
	при $t = 28^{\circ}\text{C}$	12
	при $t = 45^{\circ}\text{C}$	6
Суммарная толщина клеевой композиции, мм		не менее 4 не более 7
Размер пластыря, мм		100x100
Термостойкость во влажных условиях при $t = 60^{\circ}\text{C}$		постоянная

После проведения необходимых операций, штанга полностью поднимается, тележка и опорная рама переводятся в положение для обслуживания. Используемый модуль деактивируется, демонтируется и закрепляется на

подвижном стенде для модулей. В случае завершения работы устройства, все части демонтируются и убираются на хранение, а рельсовые пути освобождаются для нормальной работы перегрузочной машины.



Рисунок 1.18 – Нанесение клеевой композиции в зажим для пластыря

Перемещение опорной рамы производится в диапазоне длиной 12,96 метров, тележки – в диапазоне шириной 7,07 метров, размер диапазона выдвижения телескопической штанги достигает 20-ти метров.

Управление механизмами доставки модулей зачистки и наложения пластырей к месту работы – автоматическое, по координатам, обнаруженным и зафиксированным при помощи модулей поиска течи. Правила эксплуатации ограничивают скорость движения звеньев мехатронного манипулятора в ручном режиме: опорной рамы и тележки не более 3 см/с вдоль каждой оси, подъём и опускание мультисекционной штанги не более 2 см/с. Принимая во внимание необходимость обследования произвольного участка облицовки при предусмотренной руководством многократной смене модуля в ходе устранения течи, возникает потребность в удобном для оператора способе безопасной доставки рабочего органа устройства с модулем к месту проведения операций. При этом существует ряд факторов ручного управления, которые устраняет автоматизация функции вспомогательного перемещения: предупреждение ошибок ручного управления, вызванных ограниченностью обзора и действием человеческого фактора, смягчение ограничений на скорость перемещения звеньев мехатронного устройства-манипулятора и совместное управление группами приводов, учет

влияния сил вязкого трения жидкости и массы подвижных сегментов при формировании траектории и т.д.

В связи с вышеперечисленным, разработка прикладного программного обеспечения с распределённой структурой для реализации математического и алгоритмического механизмов, позволяющих автоматически выполнять планирование траекторий движения конечного звена этой и подобных мехатронных устройств с учетом особенностей среды и информации о безопасной для перемещения зоне, является актуальной и востребованной научной задачей.

1.6 Выводы по главе 1

1. В результате анализа задач, стоящих перед системами цифрового управления специализированным технологическим оборудованием, выявлены и исследованы уникальные особенности мехатронных устройств-манипуляторов, входящих в состав рассматриваемых в ключе диссертационного исследования автоматизированных комплексов.
2. Проведён анализ технических ограничений в контексте управления функциями специализированных мехатронных устройств-манипуляторов.
3. Обоснована актуальность, целесообразность и востребованность решения задачи автоматизированного формирования траекторий мехатронных устройств-манипуляторов на основе создания и развития математических и программно-алгоритмических решений.

Глава 2. Анализ систем управления специализированными мехатронными устройствами УЭХД ТРО и УРОБВ ОЯТ

2.1 Анализ системы управления специализированного мехатронного устройства-манипулятора: координатный мостовой кран УЭХД

В состав участков электрохимической дезактивации в соответствии с назначением входит ряд основного оборудования, включающий локальную систему управления участком. Основной составной частью системы контроля и управления является ПТК, изготавливаемый с использованием комплекса программно-технических средств производства фирм Siemens [42], Sew Eurodrive [43] и Pepperl+Fuchs [44].

Структурная схема СКУ УЭХД приведена на рисунке 2.1. СКУ УЭХД в первую очередь обеспечивает связь и взаимодействие между всеми элементами, входящими в ее состав: выпрямителями для проведения технологического процесса электрохимической дезактивации; шкафами управления ультразвуковыми блоками участков ЭХД методом погружения и ЭХД методом очистки в сетчатой корзине; комплектом газоаналитического оборудования; комплексом радиационного контроля; компактным выпарным аппаратом; КИП; технологическими объектами управления (краны, насосы, подъемник и т.п.); дистанционно управляемый механизм ДУМ.

Согласно требованиям, предъявляемым к транспортно-технологическому оборудованию системы электрохимической дезактивации с точки зрения охраны окружающей среды и здоровья сотрудников от вредных факторов излучения ТРО и токсичных химических веществ, все технологические операции в помещениях УЭХД должны выполняться с помощью дистанционно управляемого оборудования и манипуляторов, входящего в состав комплекса транспортно-технологического оборудования.

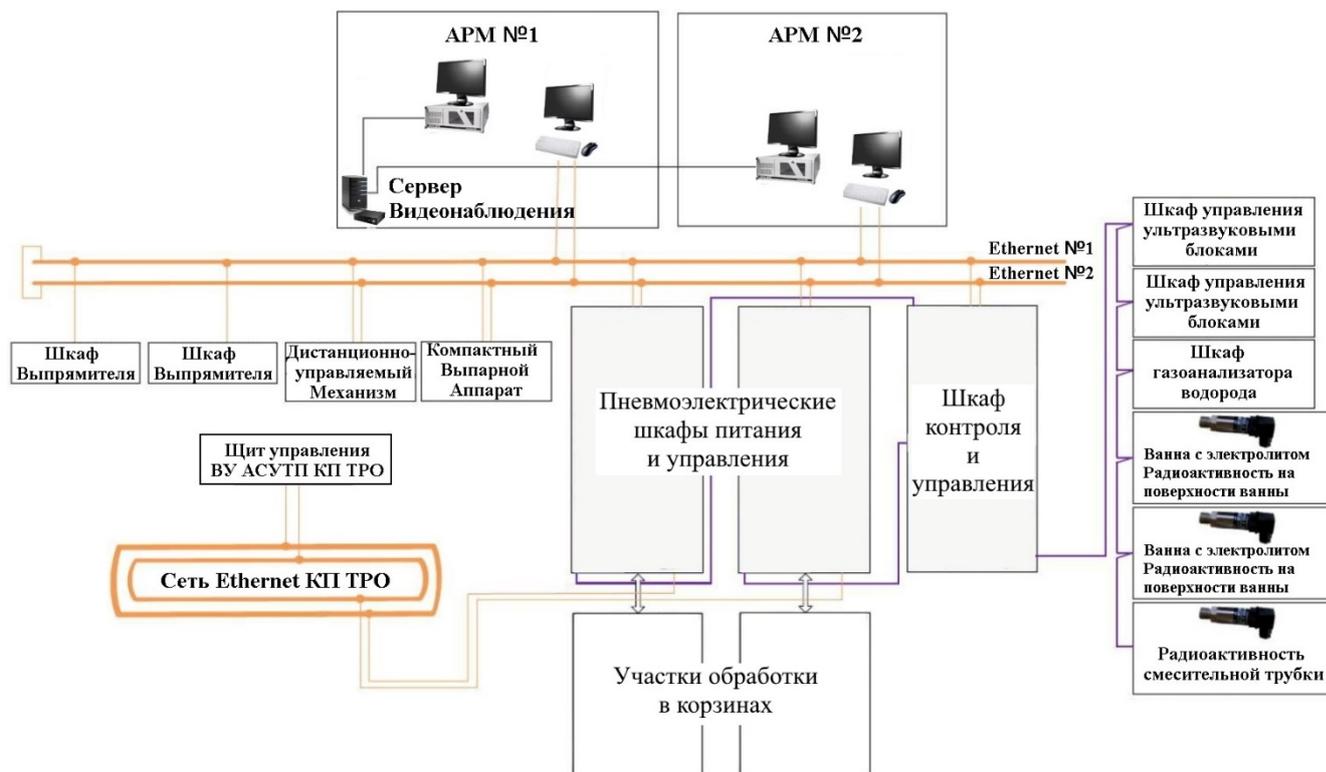


Рисунок 2.1 – Структурная схема комплекса СКУ УЭХД

Обмен данными в СКУ УЭХД поддерживается с помощью следующих видов цифровых каналов: Ethernet – для обмена с системой верхнего уровня (СКУ КП ТРО); Ethernet – для внутрисистемного обмена, Modbus RTU – для внутрисистемного обмена.

Состав транспортно-технологического оборудования включает ДУМ для перемещения и опорожнения бочек и крупногабаритных отходов; координатный кран-манипулятор для перемещения корзин или крупных фрагментов; корзины или подвесная рама для размещения отходов; сетчатые корзины с устройством выгрузки для насыпного материала (устанавливаются в 200-л бочку), поддоны для транспортирования крупногабаритных отходов на автоматических транспортерах; захваты и траверсы для перемещения МРАО, поддонов, рам и корзин. Дистанционно управляемым механизмом, координатным мостовым краном или автооператором производятся транспортные и технологические операции с поступившими МРАО: размещение их в ваннах с электролитом, перемещение и промывки МРАО после дезактивации, загрузка в 200-литровые бочки с установленной корзиной для передачи на предварительный радиационный контроль.

Работа УЭХД подразумевает выполнение ряда технологических этапов, реализуемых при участии СКУ. Блок-схема УЭХД приведена на рисунке 2.2.

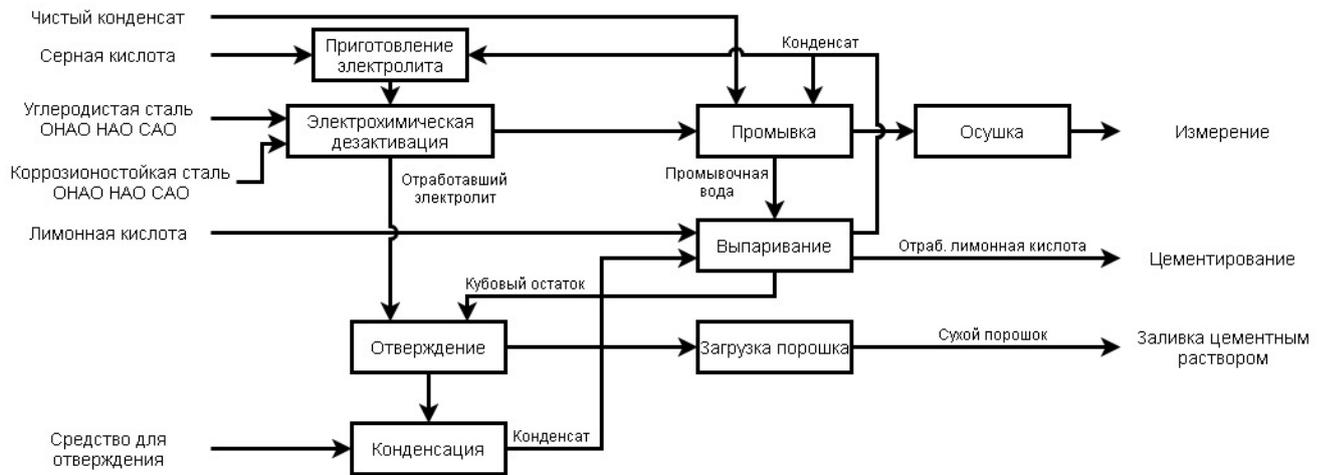


Рисунок 2.2– Блок-схема работы установок УЭХД

Рабочий цикл участков ЭХД сопровождается работой ДУМ, перегружающего бочки с металлическими отходами на поддоны в соответствующих позициях. В ходе технологического цикла, корзина с ТРО последовательно перемещается между ваннами для проведения операций электрохимической дезактивации, стекания электролита, промывки ультразвуком, поливки и просушки. В ходе процедуры ожидания стекания электролита, допускается загрузка ванны с электролитом новыми корзинами с ТРО и так далее, что позволяет производить конвейерную обработку нескольких партий корзин одновременно. Завершает работу участка УЭХД размещение очищенной корзины с МРАО в чистой бочке.

Транспортно-технологический участок содержит следующие механизмы:

- 1) ДУМ (рисунок 2.3);

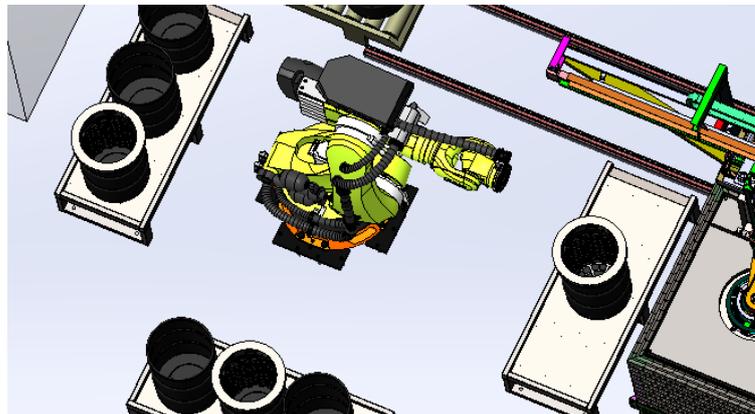


Рисунок 2.3 – Дистанционно управляемый механизм перестановки бочек

- 2) кран мостовой координатный 1т. (рисунок 2.4);
- 3) кран координатный для извлечения сетчатой корзины (рисунок 2.5).

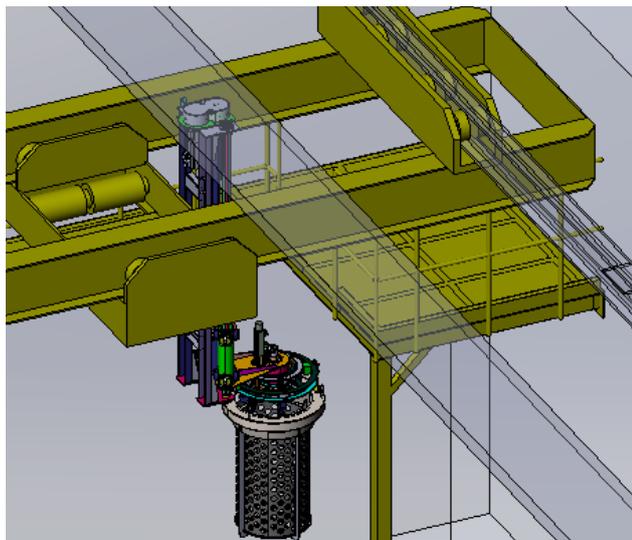


Рисунок 2.4 – Кран мостовой координатный 1т

ДУМ представляет собой готовое устройство для перестановки бочек между положениями для погрузки/выгрузки кранами. ДУМ снабжен АРМом и собственным шкафом управления. Управление осуществляется по сети Ethernet/IP.

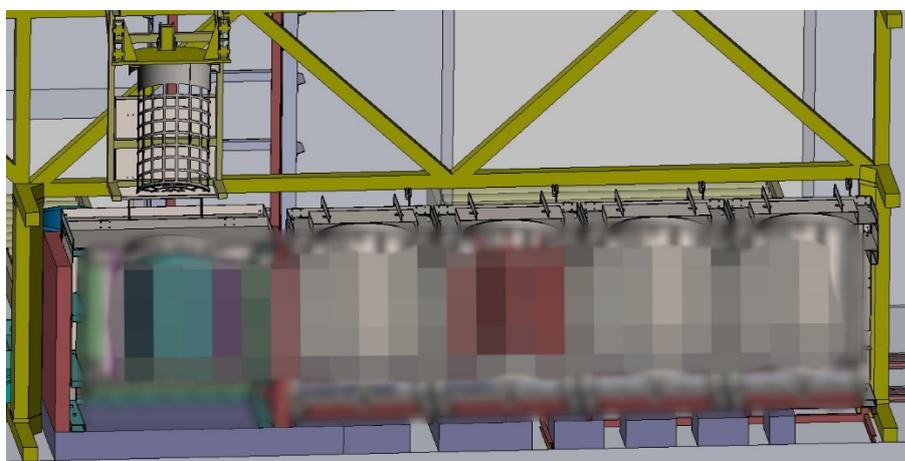


Рисунок 2.5 – Кран для извлечения сетчатой корзины (автооператор) УЭХД

Автооператор, он же кран для извлечения сетчатой корзины, состоит из подвижной части (каретки) и захвата (рисунок 2.6). Захват закреплён на жесткой штанге. Контроль верхних и нижних положений осуществляется по данным с командоаппаратов и энкодера привода. Сигналы достижения конечного положения продублированы, чтобы предупредить повреждение корзины и высыпание МРАО. Захват приводится в движение приводом с планетарным редуктором. Его открытие и закрытие, контролируются отдельными продублированными датчиками.

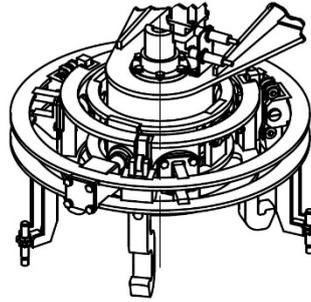


Рисунок 2.6 – Захват и механизм перемещения

Координатный кран, применяемый для перегрузки корзин с МРАО на УЭХД методом погружения, содержит подвижную опорную раму по которой перемещается тележка с захватом, а также лебёдку с тросом для поднятия и опускания механизма захвата. Система управления краном УЭХД методом погружения, согласно требованиям, осуществляет перегрузку сетчатых корзин, начиненных ТРО. ДУМ поставляет корзины на поддон для начала операций очистки и забирает корзины с очищенными и высушенными ТРО с другого поддона. Для выполнения своих функций, кран оснащён четырьмя мотор-редукторами, выполняющими следующие функции в составе рассматриваемого крана:

- 1) подъем механизма захвата сетчатых корзин;
- 2) открытие/закрытие удерживающих элементов схвата механизма захвата;
- 3) перемещение тележки крана по мостовой балке;
- 4) перемещение мостовой балки крана по закрепленным на несущих конструкциях промышленного участка направляющих рельсах.

Характеристики мотор-редукторов [43] приведены в таблице 2.1. Описанный кран является мехатронным устройством в составе УЭХД, сочетающим результат применения специализированного машиностроения, электроники, вычислительной техники, телекоммуникаций и систем управления. В зону ответственности системы управления крана, как мехатронного устройства, входит множество рядовых функций, выполнение которых требуется для поддержания эффективности с точки зрения ремонта и обслуживания, а также с точки зрения безопасности эксплуатации оборудования в условиях повышенной опасности, связанной с радиоактивным излучением ТРО, тесным соседством токопроводящих жидкостей с силовыми

элементами оборудования, питаемыми от мощных источников напряжения высокого уровня, а также применением токсичных химических веществ.

Таблица 2.1 – Характеристики мотор-редукторов крана УЭХД методом погружения

Назначение	Мотор-редуктор подъема	Мотор-редуктор захватов	Мотор-редуктор передвижения тележки	Мотор-редукторы передвижения моста
Марка	KA57/T DRS80M4 BE2HR/F M/TH/2W «SEW Eurodrive»	PSKF121 CMP40M/BK/K Y/AK0H/SB1 «SEW Eurodrive»	W10 DT56M4/BMG/H R/TF «SEW Eurodrive»	FA27/G DR63S4/BR/H R/TH «SEW Eurodrive»
Мощность, кВт	0,75	0,5	0,09	0,12
Частота вращения 50 Гц (об/мин)	1400	3000	1300	1380
Энкодер	Внешний	AK0H датчик Hiperface многооб.	Внешний	Внешний
Количество шт.	1	1	1	2
IP по ГОСТ 14254-96 (МЭК 529-89)	55	65	54	54

Особенности среды эксплуатации, включая работу с радиоактивными объектами и химически агрессивными составами, отражены в технических требованиях к системе управления мехатронным устройством, ограничивающих возможности управления перемещением, например, требованиями к перемещению в пределах ортогональных маршрутных линий заданного вида.

Одной из задач СУ УЭХД является исключение или снижение опасного воздействия на персонал комплекса переработки ТРО не только за счет минимизации роли человеческого труда в операциях очистки, но и за счет минимизации участия человека в процедурах обслуживания установок и машин

комплекса путём максимального продления сроков безотказной работы оборудования, а также выявления и снижения факторов аварийности. Выполнение вышеописанной задачи сводится в первую очередь к минимизации времени нахождения технического персонала в опасных зонах участков комплекса переработки ТРО.

Опасная зона – зона внутри машины и (или) оборудования или вокруг них, в которой персонал подвергается риску получения травм или нанесения другого вреда здоровью, связанного с эксплуатацией машины и (или) оборудования [45].

Допустимый риск – значение риска от применения машины и (или) оборудования, исходя из технических и экономических возможностей производителя, соответствующего уровню безопасности, который должен обеспечиваться на всех стадиях жизненного цикла продукции [45].

Среди функций, повышающих надёжность работы установки, есть такие, как контроль нагрузки на трос механизма захвата, контроль достижения крайних положений командоаппарата, контроль достижения концевых выключателей тележки, опорной рамы, подвижных элементов схвата. Функцию контроля нагрузки на трос выполняет подконтур системы управления, в составе которого применен прибор безопасности для кранов мостового типа – ПБМ-2.4.1 [46]. Для контроля нагрузки силовых цепей грузоподъемных механизмов в приборах ПБМ-2.4...2.6 используется широкий ряд различных тензометрических датчиков. В кране УЭХД методом погружения применен S-образный тензометрический датчик С2Н [47], рассчитанный на НПИ 500кг. Разрушающая нагрузка составляет 300% от НПИ. Внешний вид датчика С2Н приведен на рисунке 2.7а. Благодаря настраиваемой электронике, работа датчика нагрузки сводится к отслеживанию уровня сигналов опасности: превышения нагрузки и прогиба троса. При наличии соответствующего сигнала срабатывает исключение, обработку которого обеспечивает СУ более высокого уровня.

Аналогичным образом производится контроль достижения крайних положений и концевых выключателей (рисунок 2.24б). Основным и дублирующим устройством ограничения положения механизма подъема является командоаппарат

модели XRBA 45200 разработанный Schneider Electric [48] (рисунок 2.7б). Предназначен для ограничения верхнего/нижнего положения груза, а также перехода на доводочную скорость при приближении к отметке 50 мм от крайнего положения.

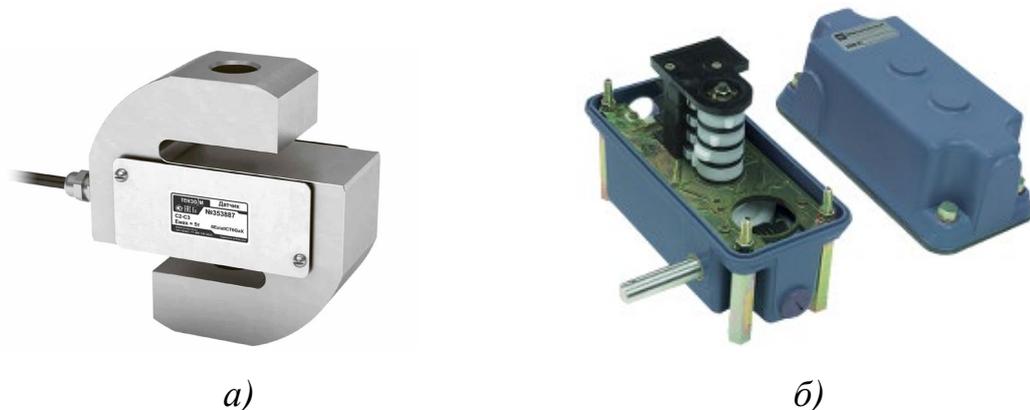


Рисунок 2.7 – Тензометрический датчик C2H (а) и Командоаппарат XRBA45200 (б)

Для отслеживания положения тележки и механизма захвата в рамках разрешенных маршрутных линий, используется штатный способ определения координат звеньев крана-манипулятора: абсолютные энкодеры рамы и тележки и инкрементный энкодер подвеса.

Абсолютный энкодер позиционирования, модель WCS2B разработки Pepperl-Fuchs [44], поддерживает обмен данными по интерфейсу RS485 (рисунок 2.8). WCS2B предназначен для позиционирования опорной рамы и тележки крана по всей длине передвижения: 7,5 м для опорной рамы, 10 м для тележки. Абсолютные энкодеры отслеживают положение, опираясь на кодовую нержавеющую ленту и выполняют роль дублирующих концевых выключателей для остановки опорной рамы и тележки в крайних положениях.

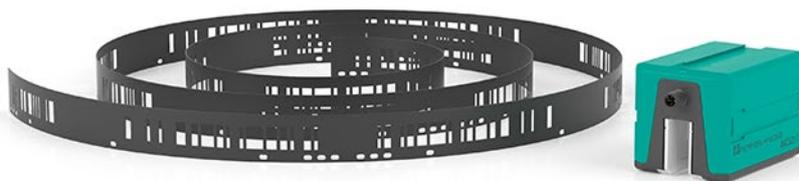


Рисунок 2.8 – Система кодирования положения WCS Pepperl+Fuchs [44]

Датчики обладают достаточными характеристиками точности позиционирования в 0,42 мм и максимальной скорости передвижения в 12,5 м/с.

Для получения координат использована система кодирования: головка WCS2B-LS221 [44] и лента модели 184045 WCS2-CS70-M1 [44] длиной 10 000 мм.

Разработчик системы кодирования, не смотря на использование распространённого промышленного интерфейса RS-485, применил протоколы передачи данных собственной разработки, именуемые data protocol 1, 2 и 3. Пример формата посылки приведен в таблице 2.2 [44]. Такое решение позволило повысить скорость и снизить задержку обмена данными, упростить сетевую электронику считывающих головок. Для декодирования фирменных протоколов с 485-го интерфейса и передачи по интерфейсам PROFINET, CAN, Ethernet и RS-485 в соответствующих протоколах, включая CANopen, DeviceNet, EtherCAT, EtherNet/IP, INTERBUS-S, PROFIBUS DP / DP-V1, PROFINET и MODBUS RTU предусмотрены интерфейсные модули.

Таблица 2.2 – Data protocol 1 с данными положения и скорости [44]

Байт запроса для считывающей головки									
Байт	Бит 8	Бит 7	Бит 6	Бит 5	Бит 4	Бит 3	Бит 2	Бит 1	Бит 0
	1	1	0	0	0	0	0	A1	A0
Ответная посылка от считывающей головки									
Байт	Бит 8	Бит 7	Бит 6	Бит 5	Бит 4	Бит 3	Бит 2	Бит 1	Бит 0
Байт 1	0	OUT	ERR	A1	A0	DB	P18	P17	P16
Байт 2	0	P15	P14	P13	P12	P11	P10	P09	P08
Байт 3	0	P07	P06	P05	P04	P03	P02	P01	P00
Байт 4	0	SST	SP6	SP5	SP4	SP3	SP2	SP1	SP0
Байт 5	0	OUT	ERR	A1	A0	DB	P18	P17	P16
Байт 6	0	P15	P14	P13	P12	P11	P10	P09	P08
Байт 7	0	P07	P06	P05	P04	P03	P02	P01	P00

Точных координат звеньев недостаточно для однозначного вывода о нахождении тележки с механизмом захвата в пределах допустимых границ. В ходе эксплуатации участка происходит распространение мелких радиоактивно опасных частиц с поверхности ТРО, проникающих через отверстия в корзине в процессе перегрузки из транспортировочных бочек в соответствующие ванны участка.

Также при перегрузке корзин между ваннами возможно стекание химически токсичных жидкостей, содержащих радиоактивно опасные частицы. Зоны, допустимые для перемещения механизма захвата, помимо угрозы повышенного

радиоактивного загрязнения, несут опасность физического столкновения объектов с переносимыми грузами и механизмом захвата, находящимся на гибком подвесе. Габариты сетчатых корзин, переносимых механизмом захвата крана, приведены на рисунке 2.9.

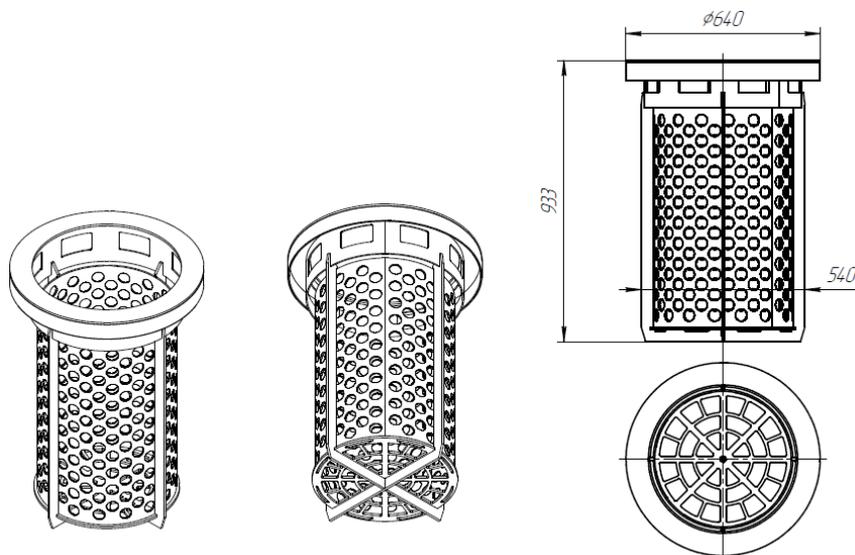


Рисунок 2.9 – Сетчатая корзина для насыпного материала

Сочетание факторов опасности, распространяющихся на площадь УЭХД, находящуюся под допустимыми для перемещения механизма захвата зонами, формирует предпосылки для технических требований, ограничивающих перемещения мехатронного крана ограниченным набором маршрутных линий. Разработанная специалистом схема маршрутных линий для выполнения вспомогательных технологических перемещений механизма захвата при перегрузке корзин с ТРО приведён на рисунке 2.10.

Этот вариант схемы составил специалист при формировании задачи управления в качестве примера общего вида маршрутных линий. В качестве ключевого формообразующего и определяющего расположение автоматически формируемых маршрутных линий фактора предложена схема магистральных линий. Магистральными линиями являются линии, многократно участвующие в перемещениях в ходе технологического цикла. Форма, расположение и количество линий позволяют составить обобщенное представление, а конкретное расположение линий на плане участка – частный вид схемы магистральных линий. Согласно требованиям технического задания, АСУ должна обеспечивать

возможность автоматической работы при условии изменения технологического процесса, включая изменение числа перемещений механизма захвата, их очередности, а также внесение изменений в расположение (координаты) основных технологических позиций. Кроме прочего, может изменяться компоновка участка.

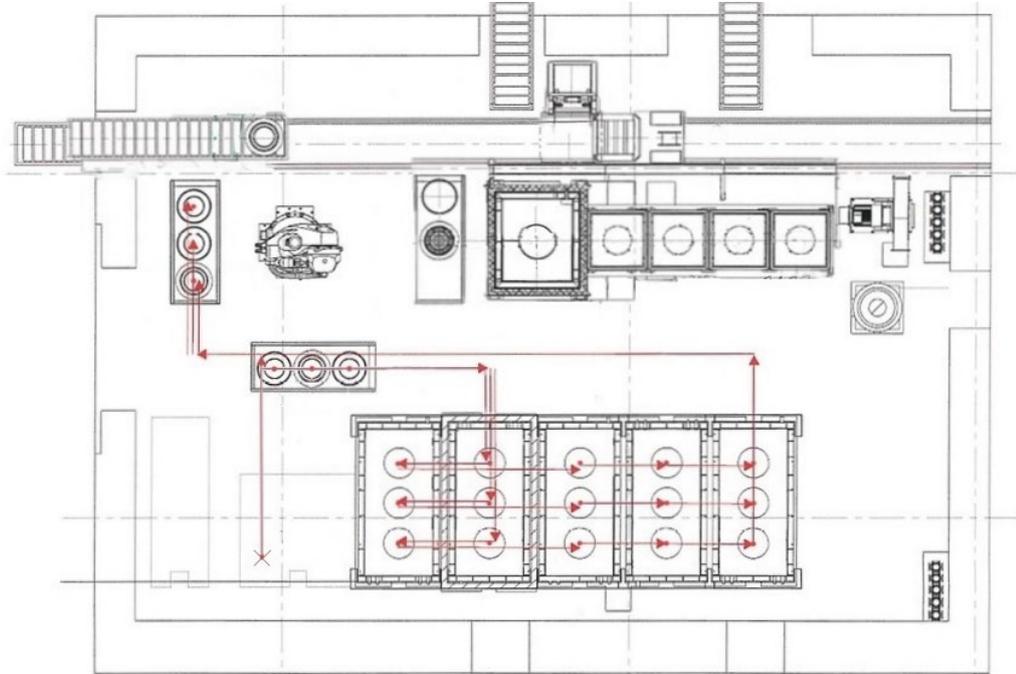


Рисунок 2.10 – Схема маршрутных линий для перемещения механизма захвата

Необходимо исключить радиационное и химическое загрязнение элементов, чувствительных к радиационному излучению, агрессивному химическому воздействию, а также элементов, требующих периодический контакт с персоналом в ходе обслуживания оборудования.

В связи с вышеперечисленным востребована автоматизация формирования схемы магистралей перегрузки корзин с ТРО. Постановка задачи не требует высокой точности и полноты решения с учётом всех факторов, как при формировании схемы магистральных линий вручную, так и при автоматизированном формировании. Субоптимального решения задачи достаточно для замены действий человека при выборе безопасного положения магистралей в соответствии со схемой текущего технологического маршрута участка. При этом функции локальной СУ мехатронного устройства (крана) сводятся к решению задач перемещения грузов в рамках выбранной обобщённой схемы маршрутных линий.

При выборе управляющей части СУ крана соблюдены требования к надежности, доступности компонентов, а также совместимости с подсистемами СУ крана и входными требованиями СКУ УЭХД верхнего уровня. Согласно требованиям к необходимой мощности двигателей и тормозов, а также точности актуаторов и датчиков, произведен выбор двигателей и приводов для координатного мостового крана. Исходя из анализа доступных ПЛК, с учетом возможностей и компонентов подсистем (подсистемы электроприводов, подсистемы кодирования положения и т.д.), составлено несколько компоновок СУ крана. Из предложенных компоновок в ходе совещания специалистов выбрана компоновка, представленная на рисунке 2.11.

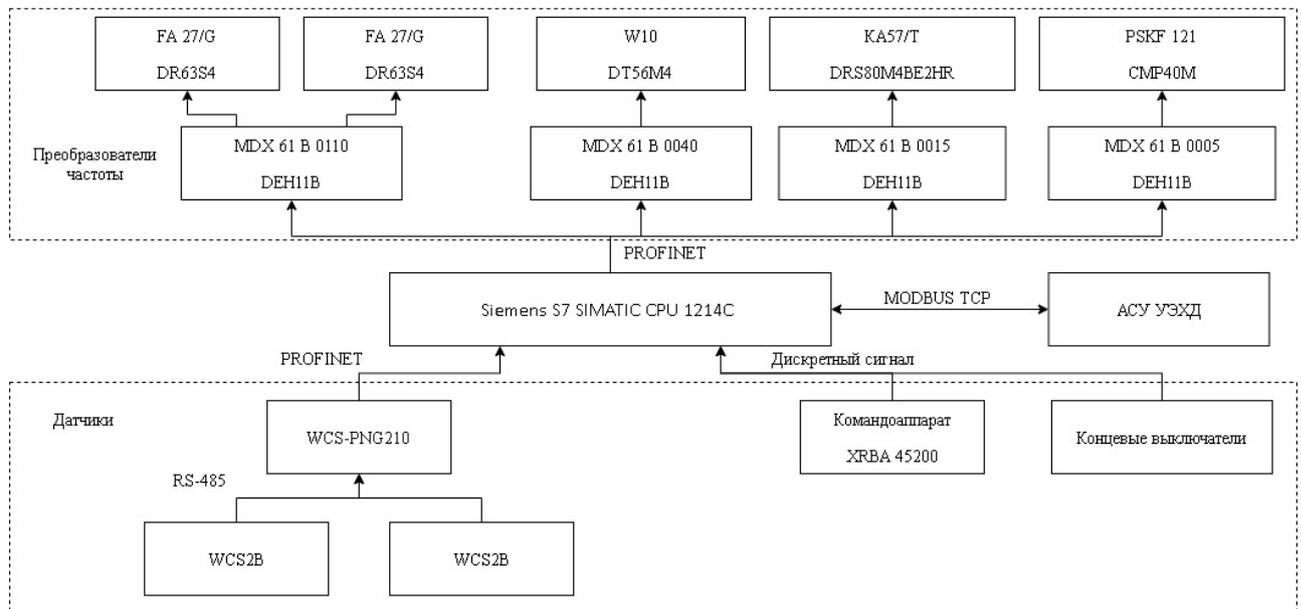


Рисунок 2.11 – Схема интерфейсов СУ мостового крана УЭХД

Выбранная схема отличается унификацией интерфейсов и протоколов обмена данными при незначительной доработке управляющих и следящих компонентов системы расширения, разработанными непосредственно производителями. Это позволило производить настройку основной приводной части производителя Sew EURODRIVE [43] при помощи специализированного программного комплекса MotionStudio с интерфейсом настройки MOVITOOLS.

Верхний уровень управления, оснащенный высокопроизводительными вычислительными устройствами, целесообразно использовать для решения задачи поиска способа организации схемы магистральных линий перемещения рабочего

органа мостового крана. Для отладки работы компонентов АСУ, а также проведения безопасного тестирования, целесообразно применять предварительно разработанные средства симуляции объекта управления.

Существуют различные подходы к проведению тестирования в промышленной автоматике. Прибегают как к написанию программных модулей-симуляторов, исполняемых в ходе тестирования на тех же вычислительных устройствах, что и основные программы, так и к разработке специализированных стендов, включающих электронные и другие компоненты, что позволяет симулировать внешние входные сигналы различного рода и проверить работу систему в условиях максимально приближенных к эксплуатационным. Необходимость разработки тестового стенда и его сложность определяются в соответствии с особенностями управляемой системы, условиями её эксплуатации и требованиями к надёжности.

Для проверки работы системы управления мостового крана УЭХД разработан специализированный программный стенд на языках стандарта МЭК 61131-3 (IEC 61131-3). Интерфейс пользователя стенда-симулятора, разработанный в среде CODESYS V3.5 [49], приведён на рисунке 2.12.

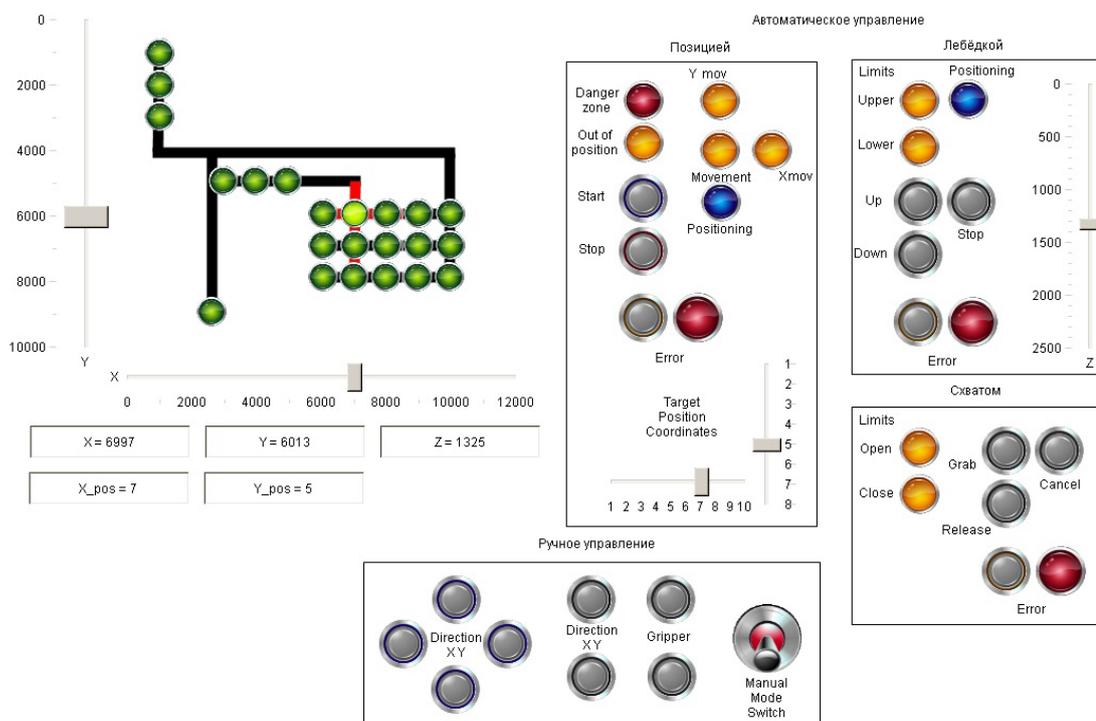


Рисунок 2.12 – Панель управления стендом симуляции СУ мостового крана УЭХД

Стенд включает набор модулей для динамической симуляции работы приводов и двигателей, сигналов аналоговых и цифровых датчиков, позволяет в визуальной форме выполнять переключение режимов работы, отдавать команды, фиксировать ошибки и тревоги, следить за работой установки в процессе автоматизированной маршрутизации, ручного управления и обработки исключений.

Блок управления позицией позволяет задавать номер позиции по осям ОХ и ОУ. Световые индикаторы сигнализируют о возникновении ошибки маршрутизации, нахождении тележки манипулятора за пределами технологических позиций, выходе за пределы магистралей, указывает на текущий режим движения и активную группу приводов. Кнопки управления позволяют запустить автоматизированное перемещение вдоль магистралей до выбранной технологической точки из любого положения, включая находящиеся за пределами магистралей, остановить процесс перемещения, а также отменить тревогу, вызванную несанкционированным попаданием тележки за допустимые границы магистралей. Блок управления лебёдкой рабочего органа помимо цветовой индикации содержит шкалу-индикатор вертикальной координаты.

Возможности автоматического режима доступны вышестоящему контуру управления участком за счёт передачи команд по промышленному интерфейсу. Задачей управления уровня промышленных контроллеров является реализация функций автоматического режима. Автоматический режим позволяет запускать циклы поднятия/опускания схвата, осуществлять захват и отпускание корзин, производить полностью автоматическое перемещение опорной рамы и тележки для доставки рабочего органа в требуемую технологическую позицию по её номеру.

СУ мостового мехатронного устройства-манипулятора производит обмен данными с вышестоящей СУ УЭХД по ModBus TCP (рисунок 2.11). Управляющая информация и ответные данные о ходе/завершении выполнения команды передаются в назначенных битах регистров протокола ModBus.

Таким образом, можно заключить, что система управления мехатронным устройством-манипулятором кран координатный УЭХД является распределённой

и поддерживает обмен данными в сетях PROFINET, ModBus TCP и с помощью дискретных сигналов. Рассмотренная СУ содержит устройства, представляющие три уровня управления: ввода-вывода, контроллеров и диспетчеризации.

2.2 Анализ системы управления специализированного мехатронного устройства-манипулятора: мехатронный манипулятор УРОБВ

Рассматриваемое устройство обладает сложной структурой, требующей особенного внимания при разработке СУ в силу целого ряда факторов, среди которых: подвижность установки (перемещение вдоль рельсового пути), изменяемые в широких пределах большие габариты установки, ограниченность обзора оператора, большая масса подвижных элементов, существенно различающиеся условия работы различных частей и систем, сочетание приводных систем разной физической природы, повышенные требования к надёжности систем и механизмов, наличие сменных элементов, сборность/разборность конструкции.

Подвижность установки подразумевает её смещение на расстояние, превышающее 12 метров. В сочетании с изменяемыми габаритами мульти-секционной штанги, способной выдвигаться на более чем 20 метров, общий путь линий связи от рабочего инструмента до АРМ, с учетом монтажа в коробах и незначительной удалённости АРМ от объекта контроля, достигает не менее 45 метров. Такая протяженность кабелей силовых линий и линий обмена накладывает ограничения на выбор доступных интерфейсов. Подвижность элементов конструкции относительно друг друга и поверхности зала, где монтируется основное управляющее оборудование, также требует использования гибких соединений коробов при прокладывании линий (рисунок 2.13).

Обзорность дополнительно снижается за счёт работы в толще жидкости, а также диапазона фокусных расстояний и углов обзора камер, рассчитанных на поиск течей непосредственно на поверхности облицовки БВ и регистрации пузырьков в вакуумной камере поискового модуля (рисунок 2.14).



Рисунок 2.13 – Линии управления и питания агрегатов в гибком защитном корпусе

Оснащение рабочих модулей лазерными или ультразвуковыми дальномерами не представляется возможным в связи с агрессивностью среды при условии соблюдения разумного масштаба изделия и уровня затрат. Для контроля контакта модуля с облицовкой использованы магнитные датчики касания на основе герконов. Число таких датчиков ограничено толщиной кабеля, складываемого и вытягиваемого при опускании штанги. Толщина влияет на минимальный радиус изгиба кабеля, что, в свою очередь, существенно сказывается на долговечности.



Рисунок 2.14 – Изображение с радиационно-устойчивой камеры при поиске течи

Большая масса подвижных элементов установки диктует требования к мощности электроприводов, а также к выходной мощности мотор-редукторов, в связи с чем возникает необходимость использования прочных и износостойких внешних редукторов, и внешних тормозов. Надёжность устройства подкрепляется

возможностью ручного передвижения рамы и тележки, а также подъёма штанги с помощью внешнего привода. Соединение валов электродвигателей тележки и рамы может быть замкнуто или разомкнуто при помощи электромагнитных муфт. Для снижения динамических нагрузок на передаточные механизмы двигателей, настройки разгона и торможения опорной рамы, тележки и штанги выполнены независимо. Предусмотрены как штатное, так и экстренное торможение.

Необходимость работы в условиях погружения в жидкость на глубину до 20 метров (давление до 2 атм.) и высокий радиационный фон с мощностью поглощенной дозы до 30 000 Грей в час существенно ограничивает возможности управление движением и проведения автоматизированных операций с применением датчиков [50]. В частности, необходимость дополнительной защиты силовых линий, линий обмена данными и герметизации блоков управления в сочетании с повышенными требованиями к надёжности при работе в пределах БВ в реакторном зале АЭС создала предпосылки к применению пневматических приводов в качестве альтернативы электрическим.

Пневматическая линия установки включает периферийные устройства: компрессор, фильтры, осушитель, ресивер и т.д. Погружаемые модули оснащены пневматическими поршнями для работы механизмов поднятия/опускания платформы и рычага, а также пневматическими двигателями вращения щёток и перемещения камеры. Управление пневматической частью системы осуществляется при помощи ПЛК опосредованно через компактную сборку большого количества пневматических клапанов: пневматический остров (рисунок 2.15). Пневмоостров размещен в герметичном отсеке, закреплённом на конце мульти-секционной штанги.

Управление дискретными сигналами пневматической линии выполняется в соответствии с таблицей состояний клапанов (Таблица Г.1 в приложении Г) отдельным контроллером фирмы ОВЕН модели ПЛК110. Этот модельный ряд отличается большим числом встроенных дискретных входных/выходных каналов, что позволяет обойтись без применения внешних устройств. Помимо управления пневматической системой, ПЛК110 обрабатывает дискретные сигналы датчиков

касания, протечки, нажатия клавиши аварийной остановки, осуществляет управление электрическими муфтами и тормозами.



Рисунок 2.15 – Пневматический остров с герметичной крышкой

Надводная часть УРОБВ оснащена сервоприводами. В целях повышения надёжности, приводы движения основных осей продублированы и сгруппированы по назначению. Настройка технических параметров для управления сервоприводами, режимов управления ими и способа их группировки произведена при помощи специализированного программного средства Festo Configuration Tool (рисунок 2.16).

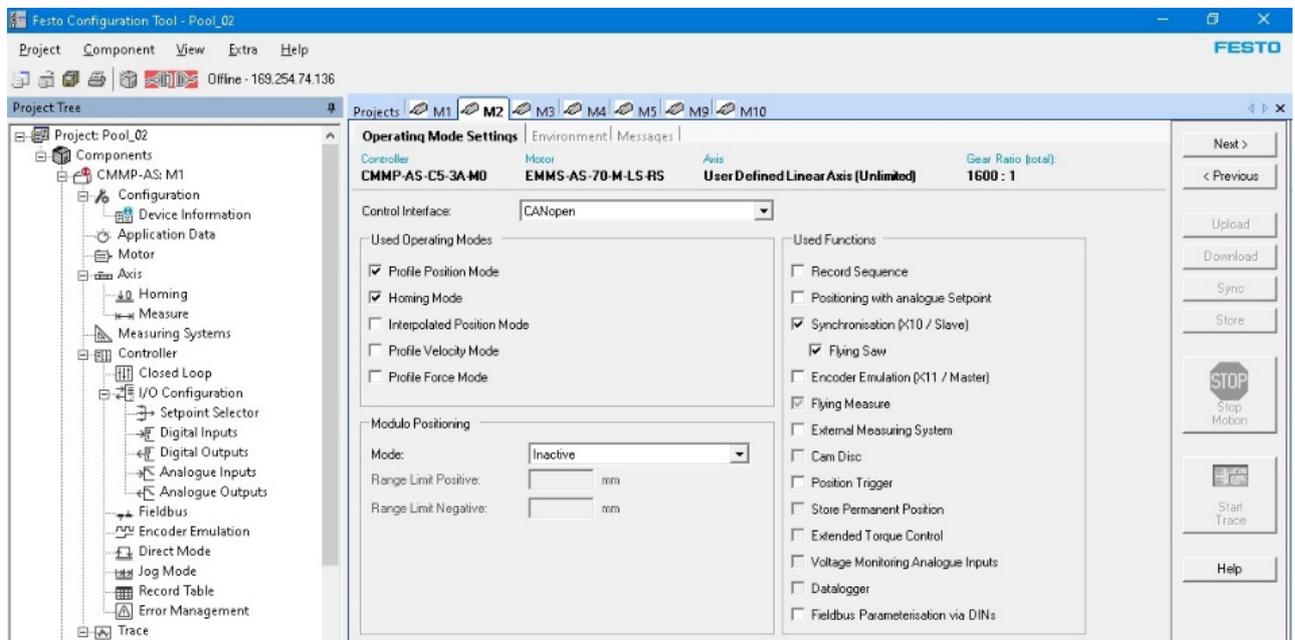


Рисунок 2.16 – Настройка синхронизации сервоприводов пары M1 M2 в Festo Configuration Tool

Синхронизация работы двигателей в каждой группе производится за счёт трансляции и приёма сигналов энкодеров через точки X10/X11 по соединительному кабелю. Использован режим синхронизации «летающая пила» (flying saw), позволяющий при помощи настраиваемой таблицы устанавливать ускорение, скорость и координату ведомого привода относительно ведущего. Мощность каждого привода позволяет продолжить работу устройства в соло режиме в случае необходимости. Управление электродвигателями по току/ускорению, скорости и координате производится за счёт встроенных средств сервоприводов. Инициализация, разрешение/запрет движения, команды старт/стоп и настройки скорости сервоприводов осуществляются ПЛК SECC-D фирмы FESTO. Программирование ПЛК выполнено в среде CODESYS V3.5 [49] средствами автоматизации стандарта IEC 61131-3 на языке CFC (рисунок 2.17) – разновидности языка Functional Block Diagram. Используются среды разработки, предоставляемые производителями ПЛК.

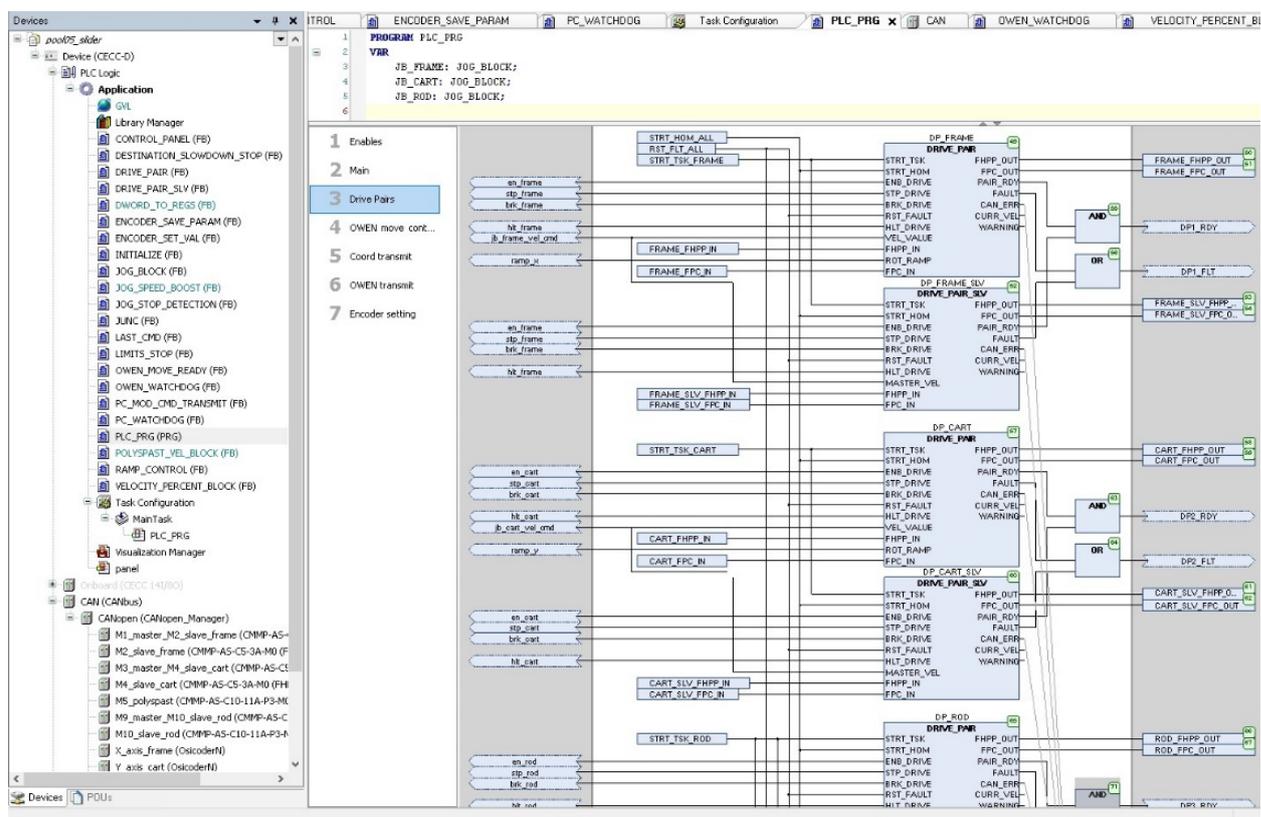


Рисунок 2.17 – Подключение пользовательских функциональных блоков для управления сервоприводами в среде CODESYS V3.5

Для получения точной информации о положении звеньев (конфигурации мехатронного устройства), устройство оснащено абсолютными энкодерами. Положение опорной рамы и тележки считывается многооборотными энкодерами Sendix 5868.1122.2122 (рисунок 2.18а), а выдвижение штанги фиксируется высокоточным тросовым датчиком RX135-30-CAN-SR12-CP (рисунок 2.18б).

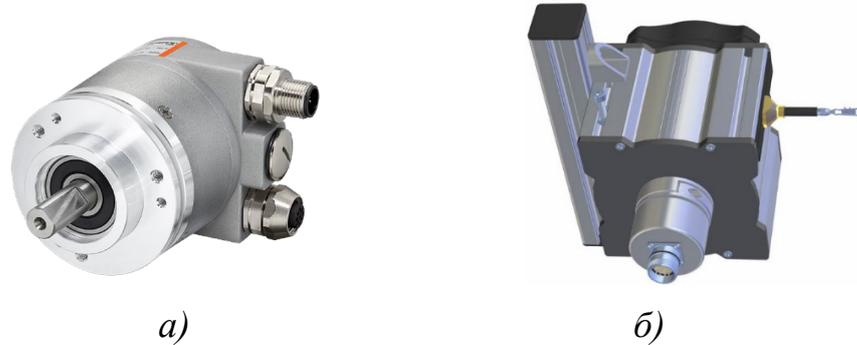


Рисунок 2.18 – Абсолютный многооборотный энкодер Sendix 5868 [51, 52] (а)
Абсолютный многооборотный тросовый энкодер RX135 [53] (б)

Абсолютные энкодеры поддерживают протокол общения CANOpen. Протокол связи CANOpen основан на стандарте обмена информацией промышленной автоматике CAN, затрагивающем и физический и канальный уровни модели OSI (Open System Interconnection).

Сети CANOpen обеспечивают двухточечное соединение для обмена сервисными посылками (SDO) при настройке параметров и диагностике устройств сети, а также данными процессов (PDO). CANOpen является надстройкой над CAN, и требует от устройств в сети наличия дополнительной программно-аппаратной части, а также наследует от CAN основные особенности, в числе которых высокий уровень помехозащищенности сигнала, ноль в роли доминантного уровня сигнала (рисунок 2.19), и арбитраж шины, позволяющий производить адресацию на аппаратном уровне [54].

Ключевым компонентом сообщений является идентификатор (ID). Он позволяет решать задачу приоритизации доступа устройств к сети при передаче сообщений и избегать возникновения коллизий. Обмен данными в сети происходит кадрами, которые могут содержать от 11 до 29 битов. В случае, когда одновременно два или более узлов начинают передавать сообщения, сообщение с более высоким

приоритетом, который определяется наиболее значащим ID (имеет большее количество доминантных битов, т.е. нулей), перезапишет сообщения других узлов с менее значащими ID [56].

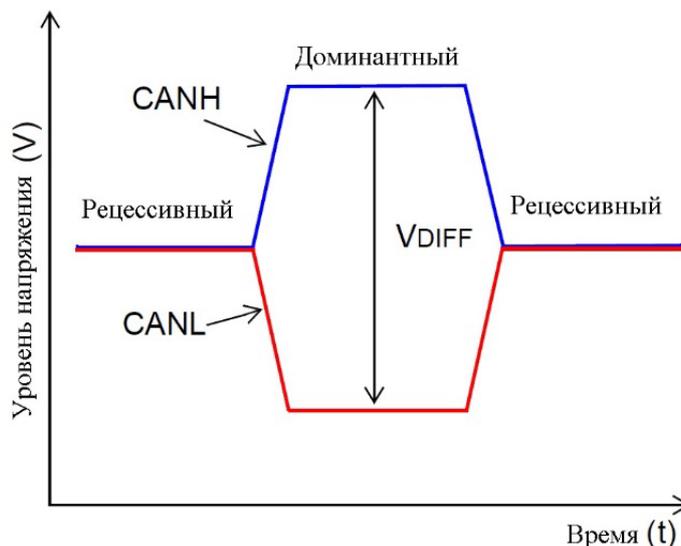


Рисунок 2.19 – Доминантный (ноль) и рецессивный (единица) уровни сигналов линий CANH и CANL сети CAN [55]

Корректная работа арбитража сети CAN требует соблюдения схемы подключения устройств (рисунок 2.20). Важным условием корректной работы сети является наличие терминальных резисторов и соблюдение их номинала.

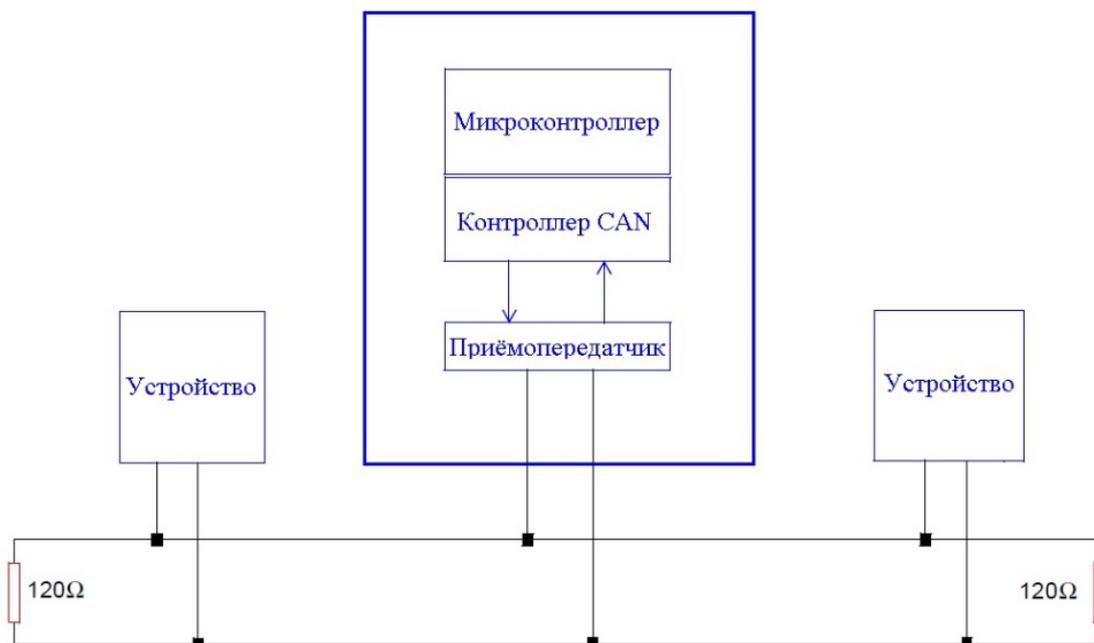


Рисунок 2.20 – Схема подключения устройств в сети CAN [55]

К сети CANOpen установки контроля облицовки БВ подключены следующие устройства: 5 контроллеров электродвигателей, 3 абсолютных энкодера, а также

промышленный контроллер SECC-D, оснащённый интерфейсами CAN и Ethernet с поддержкой требуемых протоколов: CANOpen и Modbus TCP. Контроллер интерфейса CAN у ПЛК SECC-D способен выполнять роль ведущего устройства (master) в сети CANOpen, что избавляет от необходимости искать специализированные библиотеки для других устройств (MicroCANopen, CanFestival, AN945 и др. [57]), реализующих функции ведущего устройства от которого требуется управление режимами работы ведомых (slave) устройств (рисунок 2.21).

На этапе пред-рабочего (Pre-operational) состояния ведущее устройство производит настройку ведомого, определяя его поведение в сети, включая набор доступных для чтения (receive) и передачи (transmit) посылок данных процесса (RPDO и TPDO), регулируя общий объём и содержимое данных.

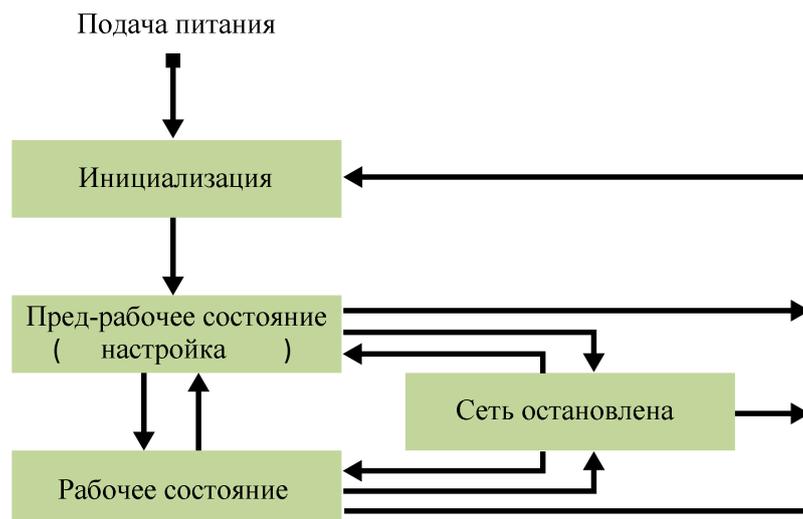


Рисунок 2.21 – Диаграмма переходов между режимами работы ведомого устройства в сети CANOpen [58]

Для того, чтобы ведущее устройство «знало» потенциальные возможности ведомого устройства и могло его настроить, CAN модуль ведущего устройства предварительно настраивается с помощью EDS-файла. EDS (electronic data sheet) содержит описание электронного оборудования, его функциональность. Этот файл должен быть предоставлен разработчиком/производителем ведомого CANopen устройства. EDS-файл содержит общие и специфичные данные устройства,

некоторую статистическую информацию о самом файле и полное детальное описание словаря ведомого устройства (object dictionary).

Примеры RPDO и TPDO части словарей устройств, загруженных в среду разработки CODESYS V3.5, приведены на рисунках 2.22 и 2.23.

Transmit PDOs (Slave => Master)		
Name	Object	Bit length
<input type="checkbox"/> 16#1800: TxPDO1 Communication Parameter	16#18D (\$NODEID+16#180)	32
Position Value	16#6004:16#00	32
<input checked="" type="checkbox"/> 16#1801: TxPDO2 Communication Parameter	16#28D (\$NODEID+16#280)	32
Position Value	16#6004:16#00	32
<input type="checkbox"/> 16#1802: TxPDO3 Communication Parameter	16#38D (\$NODEID+16#380)	16
Speed Value 1	16#6030:16#01	16

Рисунок 2.22 – Вкладка настройки PDO посылок словаря абсолютного тросового энкодера в CODESYS V3.5

Receive PDOs (Master => Slave)			Transmit PDOs (Slave => Master)		
Name	Object	Bit length	Name	Object	Bit length
<input checked="" type="checkbox"/> 16#1400: receive_pdo_parameter_rpdo1	16#201 (\$NODEID+16#200)	64	<input checked="" type="checkbox"/> 16#1800: transmit_pdo_parameter_tpdo1	16#181 (\$NODEID+16#180)	64
CCON	16#3000:16#00	8	SCON	16#3020:16#00	8
CPOS	16#3001:16#00	8	SPOS	16#3021:16#00	8
REC_NR/CDR	16#3002:16#00	8	REC_NR/SDR	16#3022:16#00	8
RES/DEM_VAL1/PARA1	16#3003:16#00	8	RSB/ACT_VAL1	16#3023:16#00	8
RES/DEM_VAL2/PARA2	16#3004:16#00	32	ACT_POS/ACT_VAL2	16#3024:16#00	32
<input checked="" type="checkbox"/> 16#1401: receive_pdo_parameter_rpdo2	16#301 (\$NODEID+16#300)	64	<input checked="" type="checkbox"/> 16#1801: transmit_pdo_parameter_tpdo2	16#281 (\$NODEID+16#280)	64
RES	16#3010:16#00	8	RES	16#3030:16#00	8
SUBINDEX	16#3011:16#00	8	SUBINDEX	16#3031:16#00	8
RECCODE_PNJ	16#3012:16#00	16	RESPCODE_PNJ	16#3032:16#00	16
PARAVAL	16#3013:16#00	32	PARAVAL	16#3033:16#00	32

Рисунок 2.23 – Вкладка настройки PDO посылок словаря сервопривода в CODESYS V3.5

Показания энкодеров не только фиксируются СУ, но и корректируются согласованием с дискретными датчиками нуля координат (рисунок 2.24а). Датчики нуля работают аналогично концевым выключателям, ограничивающим перемещение опорной рамы и тележки (рисунок 2.24б).

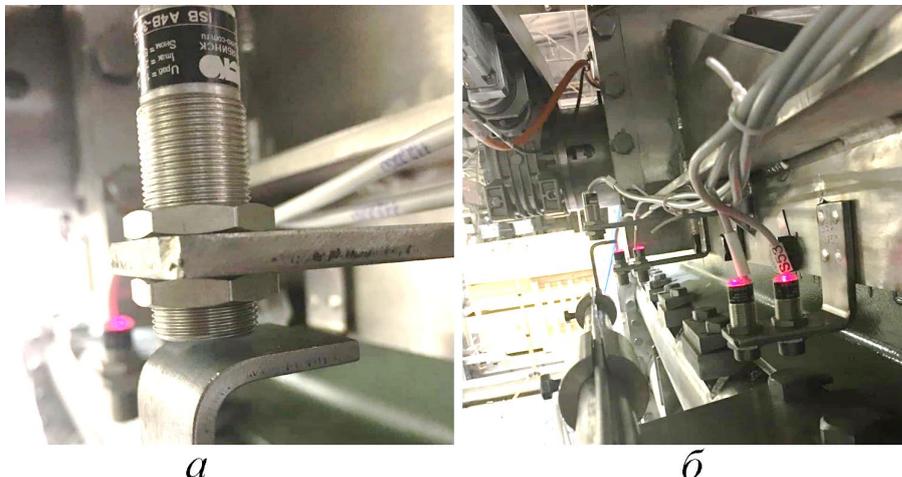


Рисунок 2.24 – Дискретные магнитные датчики

Часть CFC программы, использующая пользовательские функциональные блоки для настройки и коррекции показаний абсолютных энкодеров, приведена на рисунке 2.25. В общем и целом, система управления устройства контроля и ремонта облицовки БВ включает в себя несколько силовых сетей и сетей обмена информацией с различными интерфейсами и протоколами. Это связано с различием требований, предъявляемых к каждой из частей СУ, а также продиктовано соображениями о надёжности эксплуатации и удобстве проектирования с учётом ранее предоставленного и доступного для приобретения оборудования. Диаграмма промышленных интерфейсов и протоколов СУ УРОБВ приведена на рисунке 2.26.

Помимо сети CAN, система управления включает сеть Ethernet, осуществляющую обмен между контроллерами SECC-D и ПЛК110, а также ПЛК110 и РС при помощи протокола Modbus TCP.

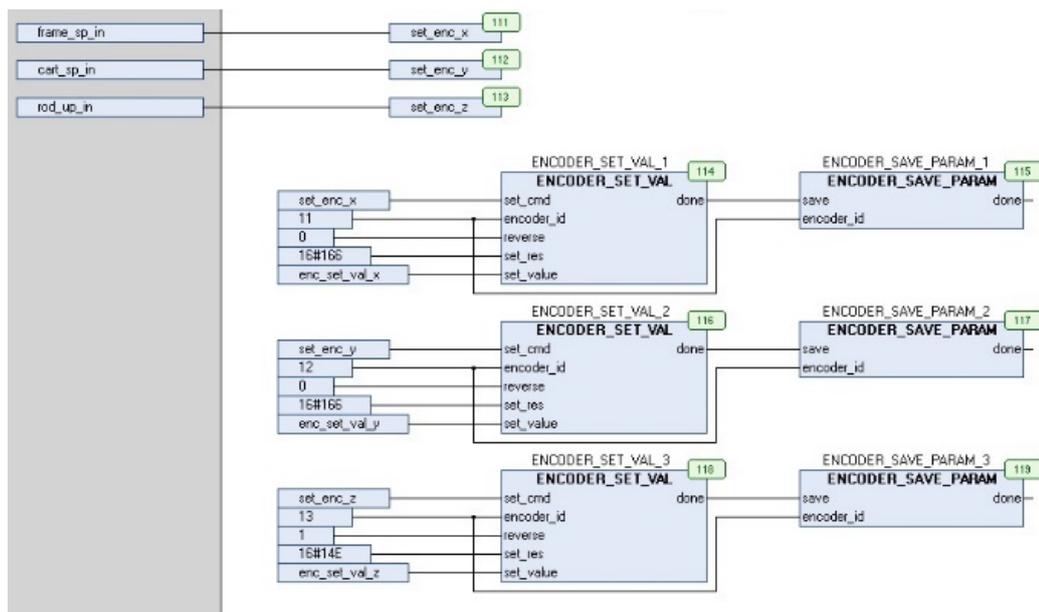


Рисунок 2.25 – Пользовательские функциональные блоки для настройки абсолютных энкодеров по CAN с помощью SDO в среде CODESYS V3.5

Контроллеры интерфейсов CAN и Ethernet в ПЛК проводят контроль разрыва соединения. Однако в результате испытаний выяснилось, что требуется дополнительная защита для снижения времени реакции на потерю соединения. Для регулярного отслеживания работоспособности устройств, в число регистров обмена данными были добавлены соответствующие «сторожевые» биты,

названные в честь так называемых «сторожевых» таймеров (watchdog timer). Ведомое устройство периодически изменяет значение сторожевого бита, а ведущее устройство отслеживает изменение бита и вырабатывает сигнал тревоги в случае превышения времени ожидания. Встроенные сторожевые таймеры также настроены на всех ПЛК для автоматического перезапуска исполняемой на ПЛК программы в случае возникновения циклических ошибок.

Аварийные сигналы и сигналы тревог могут поступить в систему и из иных источников: кнопка аварии на пульте оператора, концевые датчики, датчики протечки герметичных блоков, многочисленные сигналы неисправности от сервоприводов, энкодеров и др.

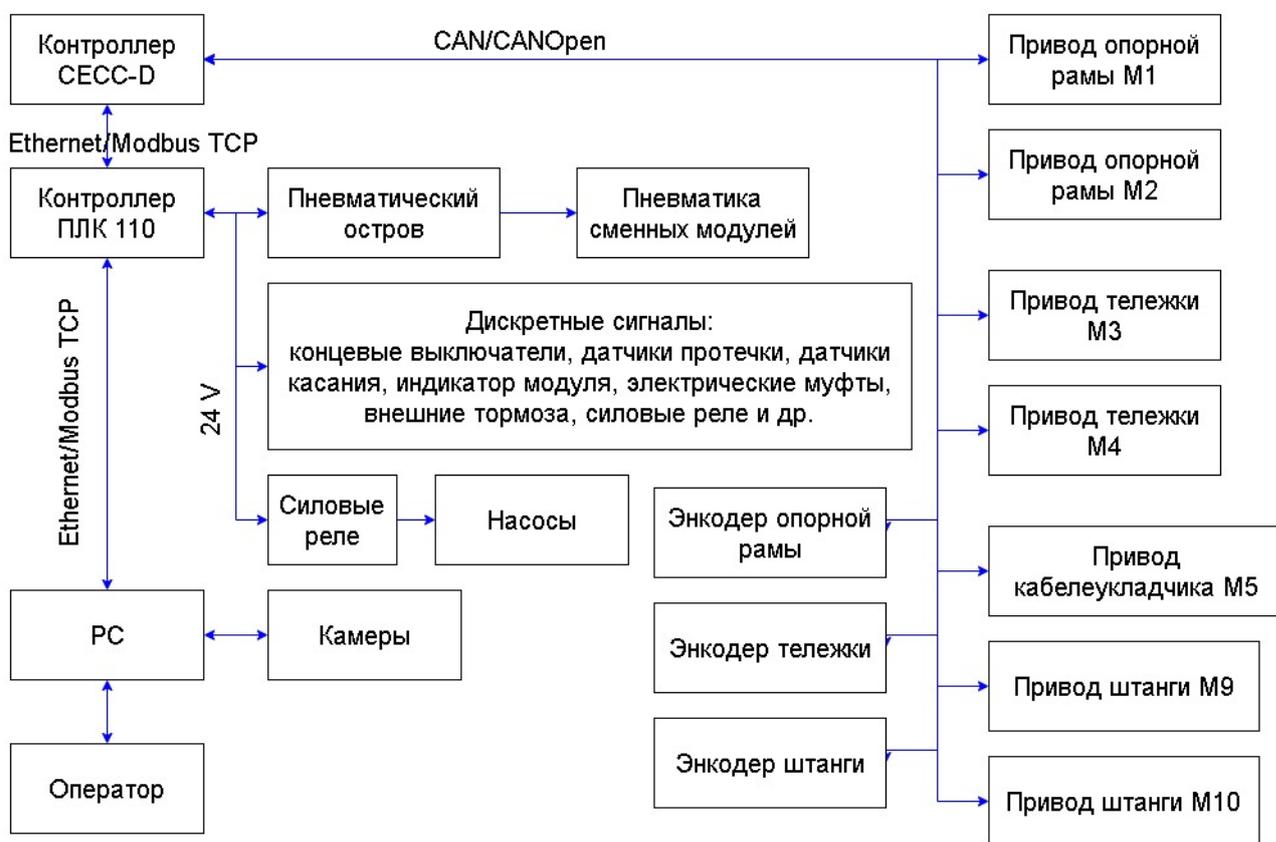


Рисунок 2.26 – Диаграмма интерфейсов и протоколов СУ УРОБВ

В соответствии с требованиями, сигналы тревог выводятся на экран оператора (рисунок 2.27), а также фиксируются в электронном журнале событий. Аварийные сигналы блокируют часть функций ручного и автоматического управления. Эти сигналы распространяются как вверх, так и вниз по уровням управления СУ, за счёт чего удаётся добиться согласованной реакции всех исполнительных устройств системы в случае отказа любой части.

Разработанная система поддерживает «горячее» изменение установленных на штангу модулей. Устройство ремонта облицовки автоматически переключает доступные функции управления в зависимости от номера (типа) установленного модуля, а также соответствующим образом адаптирует схему обработки исключений.

С учетом больших габаритов БВ, ограниченности средств обзора и других способов ориентации для оператора, а также низких скоростей перемещения элементов устройства контроля, целесообразно автоматизировать процесс достижения рабочим органом требуемой точки поверхности облицовки. При этом этап поиска течи автоматизирован частично и требует участия оператора. На этапах зачистки и наложения пластыря, подразумевающих многократное курсирование мехатронного устройства-манипулятора между точкой обслуживания и участком течи для осуществления смены модулей, доставка модуля может осуществляться по координатам автоматически. Ключом к автоматизации процесса курсирования установки является формирование безопасной траектории в виде последовательности ключевых точек рабочей зоны манипулятора.

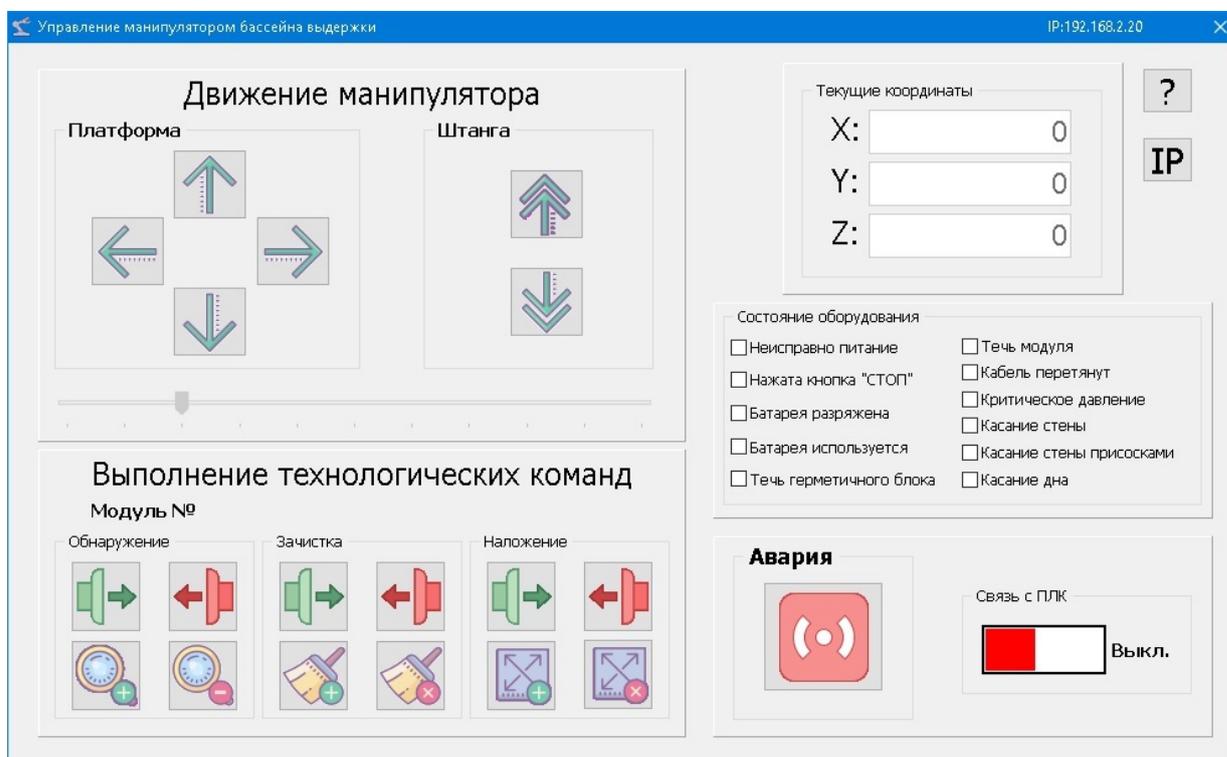


Рисунок 2.27 – Интерфейс оператора в режиме ручного управления

На основе перечисленного можно заключить, что система управления мехатронным устройством-манипулятором УРОБВ является распределённой и поддерживает обмен данными в сетях CANOpen, ModBus TCP и с помощью дискретных сигналов. Приведённая СУ содержит устройства, представляющие три уровня управления: ввода-вывода, контроллеров и диспетчеризации.

2.3 Модель распределённого управления специализированными мехатронными устройствами в составе автоматизированного технологического оборудования

Анализ систем управления рассмотренных мехатронных устройств показал, что решение поставленных задач потребует учёта особенностей и возможностей основных составляющих частей распределённого управления. Для формализации разделения задач управления при выполнении вспомогательных технологических операций в рамках приведённых СУ специализированных мехатронных устройств-манипуляторов разработана модель распределённого управления.

Модель состоит из четырёх уровней: уровня ввода-вывода, уровня управления перемещением, уровня тактического планирования и уровня стратегического планирования. Обобщенная структура распределенного управления приведена на рисунке 2.28.

Уровень ввода-вывода соответствует общепринятому пониманию в рамках многоуровневой модели системы управления цифровым производством (рисунок 1.4) и включает в себя концевые датчики, внешние абсолютные датчики положения, командоаппараты, датчики протечки, датчики касания, электроклапаны пневмомоста, насосы, электромуфты, электротормоза, серводвигатели и другие датчики и исполнительные устройства.

Уровень управления перемещением представлен соответствующими контроллерами движения и преобразователями частоты фирм Festo, Sew Eurodrive или, в общем случае, любого производителя. Задачей преобразователей частоты

является выполнение требуемых режимов движения при управлении серводвигателями с использованием обратной связи, что позволяет говорить о применении сервоприводов. Контроллеры движения обеспечивают согласование действий осевых групп сервоприводов в декартовых координатах. Многие фирмы производители сервоприводов предлагают собственные решения, обеспечивающие различные способы интерполяции и согласования действий нескольких серводвигателей в ходе решения задачи следования заданной траектории по опорным точкам [43; 59], живой интерес в исследовательской среде сохраняют задачи стабилизации [60], компенсации задержек [61], переоснащаемости оборудования [62], создания инновационных подходов [63] и другие задачи управления движением (path control). Перечисленные факты позволяют вынести решение данной задачи за рамки данного исследования.

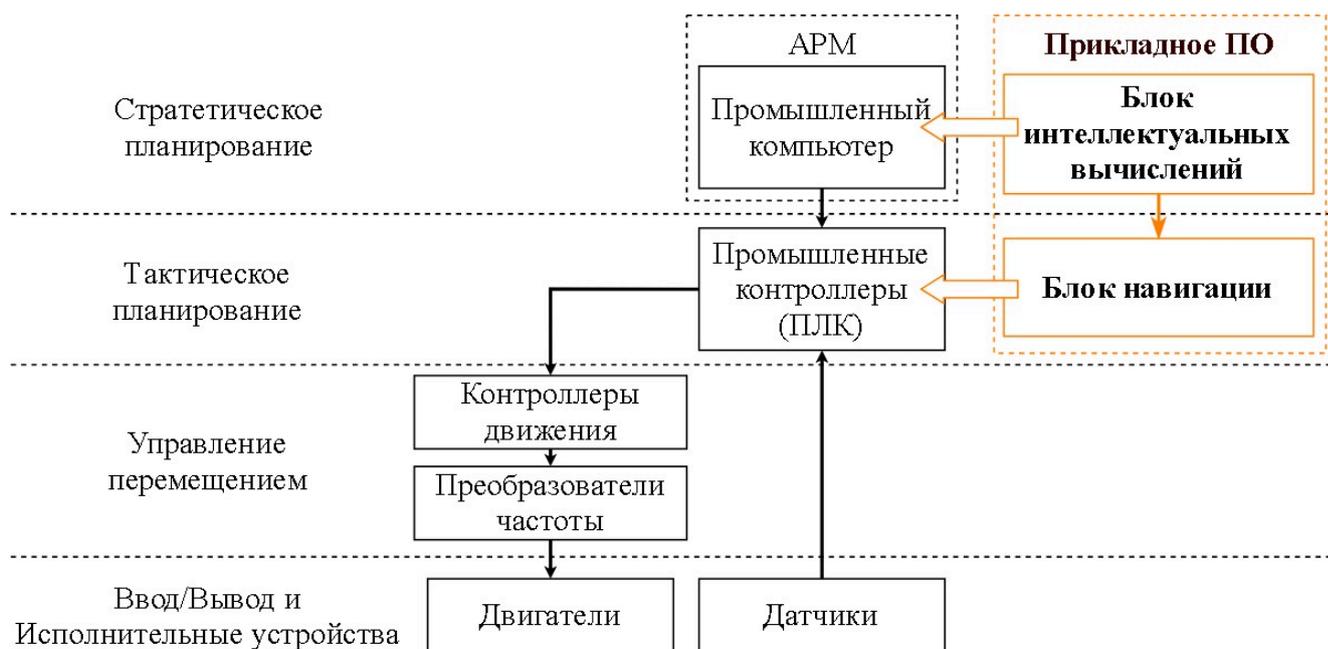


Рисунок 2.28 – Обобщенная структура распределенного управления с блоком вычислений

Уровень тактического планирования реализуется средствами промышленных программируемых логических контроллеров и его можно отнести к среднему уровню системы управления. На этом уровне производится постановка задач для контроллеров движения с уровня управления движением. На практике на уровне тактического планирования средствами языков стандарта МЭК реализуются соответствующие блоки, называемые блоками навигации. В

зависимости от формы решаемой задачи, реализация блоков навигации уровня тактического планирования может отличаться.

В ходе выполнения задания на перемещение при навигации в рамках схемы маршрутных линий перегрузки корзин с ТРО координатным краном УЭХД, управляющая программа использует таблицу координат участков основных (магистральных) линий схемы и навигационную матрицу. Определив номер участка магистрали, на котором находится рабочий орган, с помощью энкодеров, программа по номеру целевой позиции находит в матрице номер следующей позиции на пути к цели. Указанная в навигационной матрице позиция может быть достигнута из текущего положения прямолинейным перемещением в рамках допустимых магистралей. Точные координаты следующей позиции программа получает из таблицы координат. Алгоритм управления перемещением на среднем уровне СУ координатного крана приведён на рисунке 2.29.

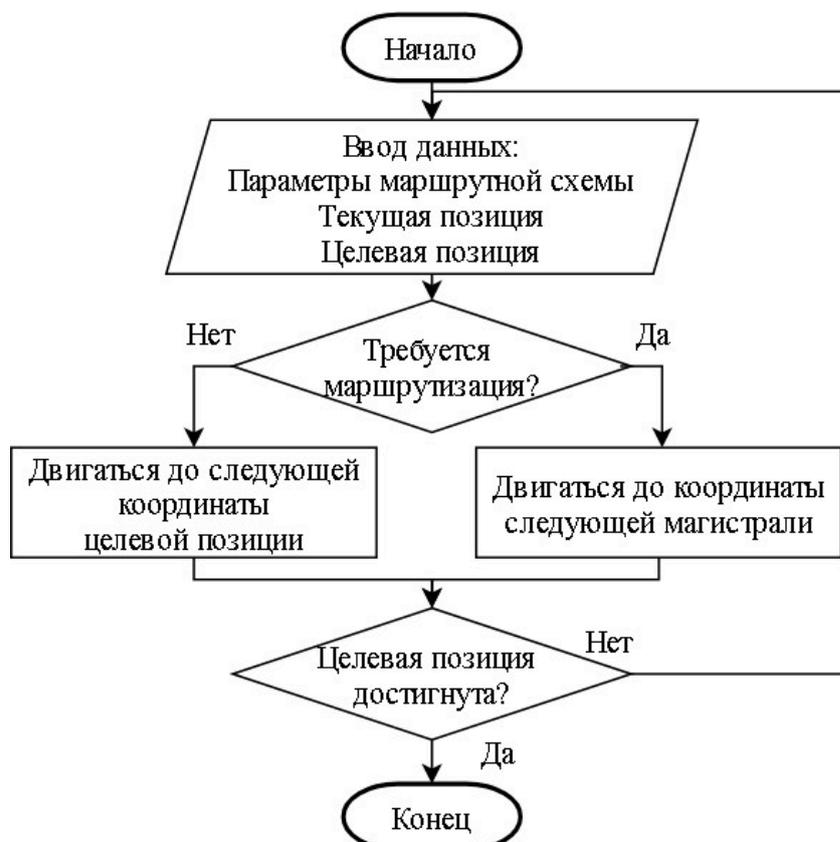


Рисунок 2.29 – Алгоритм управления вспомогательным перемещением на среднем уровне СУ координатного крана УЭХД

Управление двигателями опорной рамы, тележки и лебёдки производится плавно за счёт настройки ускорений управляющих приводов и использования

доводочной скорости. Функциональные блоки программы управления, отвечающие за режим работы приводов, достижение целевой точки и за формирование новой задачи в соответствии с номером целевой позиции, описаны на языке Structured Text (код приведён в приложении Д).

Задача управления среднего уровня мехатронного манипулятора УРОБВ формулируется следующим образом: обеспечить контекстное выполнение технологических операций, проводимых с помощью сменных модулей, фиксировать координаты обнаружения дефектов по команде оператора, реализовать плавное движение рабочего органа мехатронного устройства-манипулятора в соответствии с последовательностью опорных точек траектории, сформированной системой управления верхнего уровня. Алгоритм управления вспомогательными перемещениями на среднем уровне управления принимает вид, представленный на рисунке 2.30.

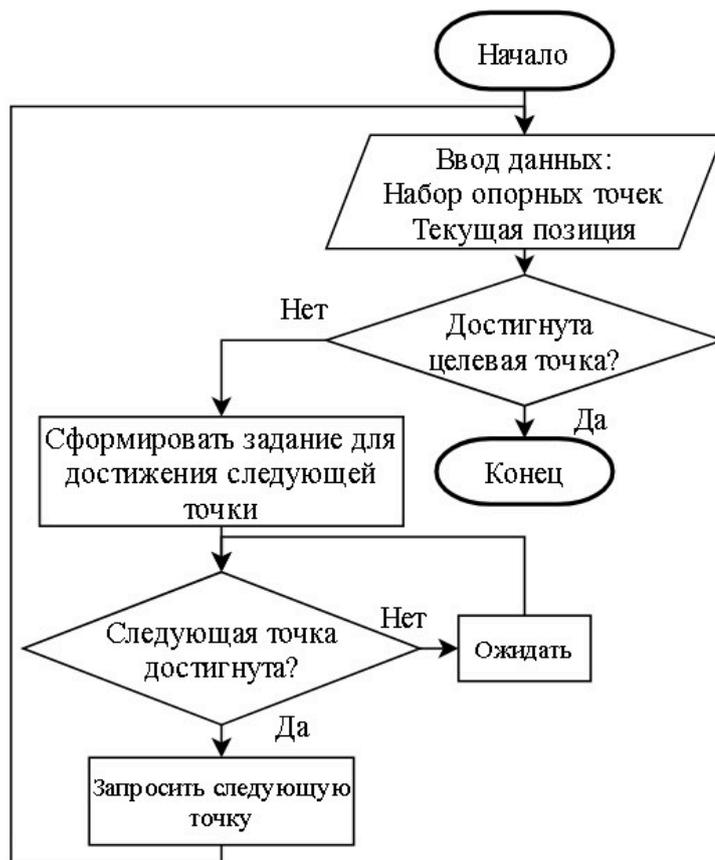


Рисунок 2.30 – Алгоритм управления вспомогательным перемещением на среднем уровне СУ УРОБВ

Уровень стратегического планирования можно отнести к верхнему уровню управления специализированными мехатронными устройствами-манипуляторами. Он предполагает реализацию на промышленных ЭВМ и подразумевает использование программного обеспечения, написанного на языках высокого уровня. Программное обеспечение, называемое блоком интеллектуального управления, с помощью выбранного интеллектуального метода решает соответствующую задачу верхнего уровня управления перемещением.

Основная задача управления перемещением мехатронного крана для верхнего уровня сводится к отправке команд в соответствии с циклограммой технологических операций, а также, в случае внесения изменений, коррекция схемы магистралей с учетом новых данных для сохранения безопасности и восстановления актуальности используемой схемы технологического маршрута.

Задачей управления перемещением для верхнего уровня СУ мехатронного манипулятора УРОБВ является формирование последовательности опорных точек траектории для доставки модуля-инструмента в выбранный участок рабочей зоны БВ с использованием трёх управляемых декартовых координат.

В зависимости от возможностей ввода/вывода данных основного программного обеспечения верхнего уровня систем, содержащих специализированные мехатронные устройства, доступ к результатам работы блока интеллектуальных вычислений возможен как через файл данных формата CSV, так и через защищённый интерфейс локального веб-сервиса.

2.4 Выводы по главе 2

1. В результате анализа систем управления специализированными мехатронными устройствами-манипуляторами в составе специализированных автоматизированных технологических комплексов в цифровом производстве определены ключевые особенности архитектуры сетевой инфраструктуры объекта автоматизации, протоколов обмена данными, функций управляющих

контроллеров, датчиков и других компонентов из перечня систем управления мехатронными устройствами и оборудованием.

2. Разработаны и имплементированы программные модули для исполнительных устройств и элементов распределённой цифровой системы управления рассматриваемых мехатронных устройств, выполняющие локальные функции системы поиска пути. Проведено моделирование работы локальной системы управления.
3. Выполнена формализация задачи управления для верхнего уровня системы управления специализированным технологическим оборудованием, в том числе, в масштабах технологического участка цифрового производства.

Глава 3. Обзор подходов к решению задач управления перемещением специализированных мехатронных устройств

3.1 Обзор методов автоматизированного формирования траекторий

Методы поиска пути или формирования траектории могут быть классифицируемы на основании разных признаков. Одна из возможных классификаций [64, 65, 66], согласно работам, посвященным методам планирования пути в среде с препятствиями, приведена на рисунке 3.1. Автор публикации [65] рассматривает целый ряд возможных классификаций: с точки зрения применения интеллектуальных технологий, различают традиционные методы планирования траектории и эвристические методы; характер окружающей среды, в условиях которой происходит планирование, играет решающую роль и разделяет методы планирования на методы для статической окружающей среды и для динамически изменяющейся окружающей среды. Статичность окружающей среды на практике, как правило, является упрощающим допущением, принимаемым за истину только в определённых рамках. Кроме этого, полнота информации об окружающей среде также является определяющим фактором при выборе математических, программных и технических средств. По полноте доступной информации можно выделить методы с полной и с неполной информацией. При наличии полной информации может быть выполнено заблаговременное глобальное планирование пути, при этом нет необходимости в локальной адаптации маршрута в связи с появлением более точных данных или с изменением ситуации. Если же полная информация в силу ряда факторов не доступна, то производится своевременное локальное планирование наиболее актуальных элементов пути в соответствии с актуализируемой на текущий момент информацией. Неполная информация об окружающей среде может возникать как в системах с неполными данными о ландшафте карты, по которой производится поиск, так и в системах с участием элементов, поведение которых не может быть

известно заранее. Динамически изменяющаяся среда подразумевает, как правило, использование локального планирования пути.



Рисунок 3.1 – Пример классификации методов формирования траектории [65]

В соответствии с классификацией, представленной на рисунке 3.1, рассмотрим ряд методов. Все методы объединяет подход, основанный на описании карты окружающей среды, но отличает друг от друга форма представления карты. Различают методы на основе графа, дерева значений, потенциальных полей, клеточной декомпозиции, оптимизационные методы, методы с применением интеллектуальных технологий и поведенческие методы. Во многих случаях результатом оказывается последовательность путевых опорных точек, расположенных последовательно от начальной точки пути до конечной. В этом случае решение задачи формирования траектории сопровождается задачей интерполяционного моделирования и сглаживания полученной траектории.

Большое распространение имеют методы на основе графов. Эти методы, как правило, соотносят узлы графа с различными состояниями/конфигурациями управляемого объекта. В случае с мобильным роботом это может быть его координата в двумерном или трёхмерном пространстве, для мехатронного устройства или антропоморфного робота узлы графа могут соответствовать набору значений обобщенных координат звеньев устройства. Если динамические параметры состояния важны для системы и коренным образом влияют на принятие решения при выборе траектории, то одной конфигурации устройства может соответствовать несколько узлов графа в зависимости, например, от того в каком «нечетком» диапазоне находится текущее значение скорости.

Принцип, по которому формируется представление окружающего пространства или пространство поиска траектории бывает различным. Сами по себе параметры конфигурации системы бывают непрерывными или могут предоставлять возможность высокой дискретизации. Осуществление поиска на всём множестве конфигураций системы, конечно, позволит найти лучшее математическое решение в соответствии с выбранными критериями качества траектории, но потребует колоссальное количество вычислений и при сильной дискретизации займёт немислимо большое время. Выбор рассматриваемых при поиске пути конфигураций производится по-разному в зависимости от метода и выбирается под возможности системы с учетом особенностей задачи. Примерами подходов к выбору подмножества конфигураций для методов, в основе которых лежит поиск по графам, являются методы на основе построения маршрутных сетей, метод на основе диаграммы Воронова, графов видимости и другие. К этой же группе методов можно отнести построение вероятностных маршрутов, например, методы вероятностных маршрутных сетей и случайных деревьев.

Маршрутные сети строятся по принципу связывания конфигураций между которыми управляемая мехатронная система может осуществить бесконфликтный переход. Нарращивание сетей производится по мере фактического (с помощью датчиков) или теоретического (путем математических операций над цифровой картой пространства) проведения попыток связать конфигурации и проверить наличие конфликтов. Накопление может происходить с учетом как успешных переходов, так и ошибочных, тупиковых или менее эффективных, что позволяет в ряде случаев извлечь пользу при проведении новых попыток маршрутизации в случае неудачи прокладывания первоначально перспективного пути, для решения задач навигации других устройств, в случае изменения параметров планирования движения либо при изменившейся конфигурации препятствий на карте.

В работе Казакова А.А., посвященной методам планирования пути, предлагается такая формулировка маршрутной сети: «Маршрутная сеть представляет собой топологический граф $G(V, E)$, вершины V которого соответствуют бесконфликтным конфигурациям перемещаемого объекта $S \subset C_{free}$,

а ребра E – бесконфликтным переходам между ними $P(\tau):[0,1] \rightarrow C_{free}$, $P(0) \subset S$, $P(1) \subset S$. Обычно маршрутная сеть строится в предположении выполнения условий достижимости и связности.» [66].

Маршрутная сеть достижима для конфигурационного пространства объекта, если для любой его точки $c \in C_{free}$ существует вершина маршрутной сети $s \in S$ и бесконфликтный путь к ней $p(\tau):[0,1] \rightarrow C_{free}$, $p(0) = c$ и $p(1) = s$ [66]. Маршрутная сеть объекта связна для конфигурационного пространства объекта, если для любой его пары точек $c_{init}, c_{goal} \in C_{free}$, между которыми существует бесконфликтный путь и найдены сопряженные вершины маршрутной сети $s_{init}, s_{goal} \in S$, также существует маршрут $p'(\tau):[0,1] \rightarrow S$, где $p'(0) = c_{init}$ и $p'(1) = c_{goal}$ [66].

Перечисленные определения условий преследуют задачу сопоставления маршрутной сети и конфигурационного пространства мехатронного объекта управления с целью обеспечения возможности прокладывания безопасного маршрута между выбранными конфигурациями в случаях, когда это гипотетически возможно. Условия достижимости позволяют сопоставить маршрутную сеть с достижимыми конфигурациями объекта, а условие связности позволяет обеспечить возможность нахождения пути в рамках маршрутной сети, если такой путь возможен в рамках конфигурационного пространства объекта. В работе Казакова К. А., однако, отмечается, что: «К сожалению, данные условия носят декларативный характер и не могут быть конструктивно применены при разработке и реализации методов планирования движения.» [66].

Что касается методов, основанных на использовании графов видимости, то они нашли своё применение как, например, в мобильной робототехнике, так и в решении задач далёких от перемещения мехатронных устройств [67, 68, 69, 70, 71]. Базовый вид графа видимости включает множество вершин многогранников, которые представляют собой модель препятствий карты, построенную по тем или иным принципам, включая отдельно добавленные начальную и конечную позиции, между которым требуется проложить путь. Вершины из полученного множества вершин многогранников соединяются по принципу «видимости» – получают линейные отрезки-рёбра графа. На рисунке 3.2а представлен пример

прокладывания маршрута мобильного робота в графе видимости [72]. Рисунок 3.2б демонстрирует применение графа взаимной видимости при анализе глиобластомы, представленной набором координат в евклидовом пространстве [73]. При построении графа видимости на рассматриваемом множестве из n вершин полигонов важно учитывать сложность, составляющую $O(n^2 \log n)$ [74]. Такая сложность весьма высока для применения в промышленных приложениях и на мобильных платформах. Затратным также является и преобразование полученного графа в маршрутную сеть с соблюдением вышеописанных правил. Требуется решение задачи надежного определения бесконфликтных безопасных путей, а также механизмы гибкой адаптации представления препятствий с учетом габаритов управляемого объекта, чтобы перемещение вдоль границ не приводило к столкновениям. Также в зависимости от параметров управляемого объекта возникает целесообразность объединения отдельных препятствий в общие группы, представленные меньшим числом многогранных фигур, чем число препятствий [72], но также и необходимость разделять сгруппированные препятствия, если между ними может быть найден маршрут.

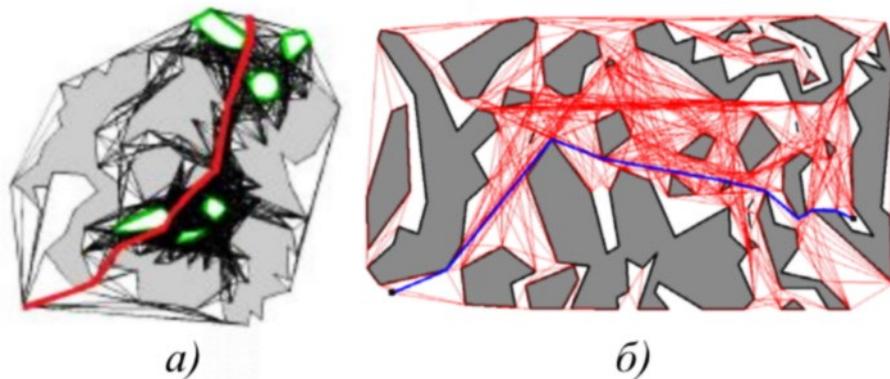


Рисунок 3.2 – Пример поиска пути в маршрутной сети [72]

Вероятностные методы предлагают использовать случайно выбранные конфигурации, отобранные из безопасных областей по различным принципам, чтобы проводить поиск подходящей траектории. Применение метода вероятностных маршрутных сетей основано на постепенном добавлении на известную карту случайных точек (конфигураций) по определённому вероятностному закону. Добавленные точки проходят испытания, в ходе которых: выясняется не попала ли точка в область, занятую препятствием; по различным

принципам отбираются некоторые из уже добавленных точек и проверяется возможность достижения новой точки из отобранных точек прямолинейным перемещением; проводятся другие испытания. Метод случайных деревьев отличается в первую очередь тем, что новые точки добавляются по принципу иерархии и таким образом, чтобы их можно было достичь из точек, находящихся на «кончиках ветвей» дерева конфигураций. Новые случайные точки добавляются путём случайно определяемого перемещения в некотором направлении. Перемещение может производиться на постоянную, заданную функцией, случайную дистанцию или до пересечения с препятствием. Одним из существенных недостатков вероятностных методов является порождение большого количества пробных маршрутов при поиске в условиях большого количества препятствий сложных форм, особенно при поиске в трёх измерениях. Учёным сообществом предлагаются различные способы усовершенствования алгоритма с целью устранения этого недостатка (рисунки 3.3а-в), влияние которого ощутимо сказывается на трудоёмкости поиска даже для двумерного случая [75].

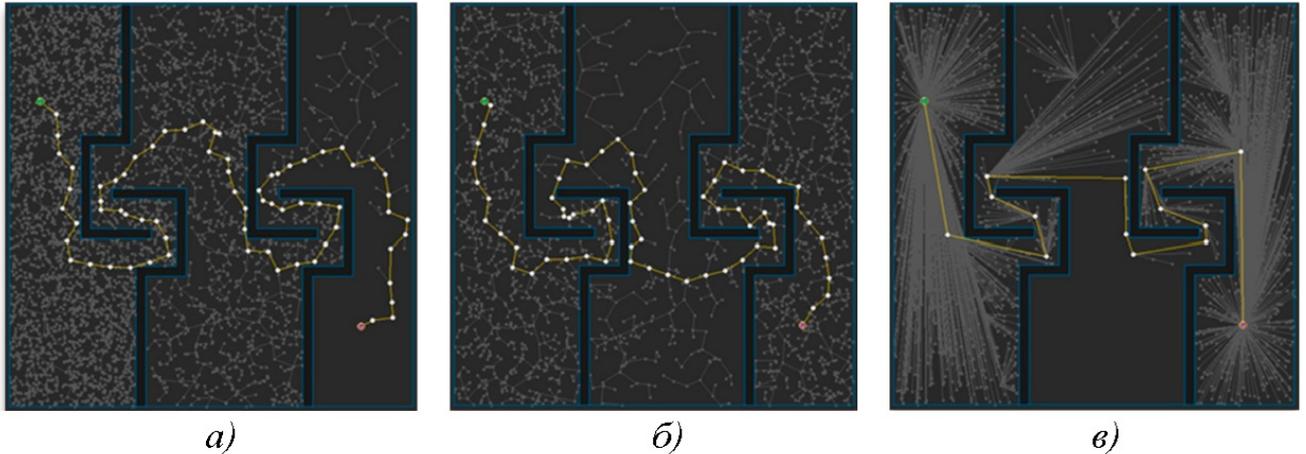


Рисунок 3.3 – Формирование траектории при помощи разновидностей алгоритма быстрых случайных деревьев (RRT) [75]

Возвращаясь к методам поиска траектории, следует упомянуть семейство эвристических методов. Алгоритмы этого класса призваны ускорить поиск траектории в графе за счёт введения эвристики, позволяющей безусловно оценить перспективность поиска в каждом из направлений, опираясь уже не только на особенности карты, но и на заданную эвристику. Эвристика позволяет

формировать очередь из вершин для поиска траектории в порядке наиболее вероятного успеха в тех случаях, когда это возможно. Разумеется, не для всех случаев использование эвристики возможно на практике. Подбор эвристики особенно затруднён для случаев перемещения в зонах с неоднородными свойствами.

Однако, методы на основе эвристики широко применяются для решения задач поиска пути в компьютерных симуляциях и играх, при управлении мобильными мехатронными устройствами в условиях упрощенного представления карты, а также в составе более сложных комплексных методов. Наиболее распространённым из таких алгоритмов является A^* (A стар). Этот алгоритм популярен по причине достаточной эффективности, но и достаточной простоты, что оказывается очень востребовано при комбинировании с другими подходами для улучшения требуемых качеств работы алгоритма в каждом рассматриваемом частном случае [76; 77; 78]. Казаков К.А. приводит лаконичное описание основ алгоритма: «Приоритет вершины в базовой форме данного алгоритма определяется суммой: $f(v) = g(v) + h(v)$, где $g(v)$ – стоимость пути из начальной вершины в данную, а $h(v)$ – эвристическая оценка стоимости пути до целевой вершины. При этом значение $h(v)$ должно быть метрикой: быть неотрицательным и удовлетворять неравенству треугольника. Таким образом, A^* является обобщением алгоритма Дейкстры при $f(v) = g(v)$ и алгоритма жадного поиска при $f(v) = h(v)$.

Использование эвристики, во многих случаях, позволяет значительно уменьшить количество вершин, участвующих в расчетах при поиске траектории и, как следствие, повысить вычислительную эффективность поиска. Алгоритм A^* также повышает оптимальность найденного решения, если эвристическая оценка является оптимистической и значение функции $h(v)$ не больше действительной стоимости перемещения до целевой вершины.» [66].

Доработку алгоритма широко практикуют за счёт различных усовершенствований: развития подходов к определению эвристик; оптимизации выбора области поиска, например, с использованием иерархического подхода к дискретизации сцены на плоскости (рисунок 3.3 [66]) и, при помощи октодеревьев,

определяемой взаимодействием потенциальных полей с управляемым объектом. За счет этих особенностей метод широко применялся и применяется для управления подвижными объектами в изменяемой среде (мобильными роботами, беспилотными автомобилями и летательными аппаратами и т.д.) [85], а также для расчетов поведения множественных объектов, например, роя/толпы [86].

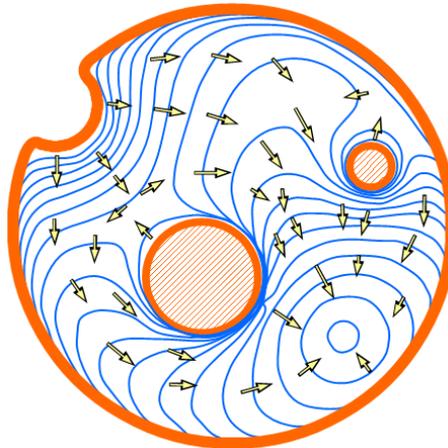


Рисунок 3.4 – Пример формы изопотенциальных линий и направлений градиентов результирующего потенциального поля сцены [66]

В работе [85] предлагается следующий способ формирования результирующего потенциального поля:

$$U = \sum_i U_{NC_i} + \sum_j U_{C_j} + \sum_q U_{R_q}, \quad (1)$$

где i, j, q – количество препятствий каждого из классов, U_{NC} – потенциальное поле не пересекаемого препятствия (стена или транспортное средство), U_C – потенциальное поле пересекаемого препятствия (неровность), U_R – потенциальное поле дорожного покрытия. При этом потенциальное поле дорожного покрытия имеет противоположный знак по сравнению с потенциальными полями препятствий. Потенциальные поля могут быть определены различными формулами или общей формулой с различными коэффициентами. Потенциальное поле не пересекаемых препятствий может иметь следующий вид:

$$U_{NC_i}(X, Y) = \frac{a_i}{s_i \left(\frac{X}{X_{s_i}}, \frac{Y}{Y_{s_i}} \right)^{b_i}}, \quad (2)$$

где a_i , b_i – параметры, определяющие соответственно интенсивность и форму потенциального поля; s_i – функция дистанции до препятствия со знаком; X , Y – координаты точки двумерной карты; X_{si} , Y_{si} – продольная и поперечная дистанции до препятствия [85]. Потенциальное поле пересекаемых препятствий численно значительно уступает потенциальному полю препятствий, которые управляемый мобильный аппарат пересекать не должен, что позволяет достичь целевую точку допустимым способом.

Одним из ключевых недостатков метода потенциальных полей является склонность к возникновению локальных минимумов в которые попадает алгоритм при поиске решения. Обойти эту проблему призваны требования к обязательной выпуклости потенциальных полей препятствий, отслеживание сближения подвижных препятствий и объединение их в группы, формирующие препятствия выпуклой формы. Помочь преодолеть локальные минимумы в случае их неизбежности позволяет, например, применение метода поиска с отжигом. Поиск с отжигом предполагает продление траектории за счёт проведения испытаний точек, удалённых от последней добавленной точки на заданное расстояние. С каждым шагом расстояние снижается, что позволяет «перешагнуть» участок действия локального экстремума за счёт снижения дискретности траектории, а затем пошагово наращивать дискретность для более точного соответствия карте потенциальных полей. Однако, эти методы всё же чаще применяют в комплексе с другими методами, использующими графы, построенные на основе случайного поиска или строгой декомпозиции.

Отдельным классом стоят оптимизационные методы поиска траектории. Формирование траектории для пространственной среды со сложной картой препятствий может рассматриваться как задача оптимизации. Для этого необходимо создать параметризованную модель траектории движения. Препятствия представляют из себя накладываемые на параметры ограничения, а качество получаемой траектории оценивается некоторым дополнительным функционалом, выступающим критерием приемлемости решения. Обычно такую функцию называют целевой. Параметризованная модель траектории может

включать параметры, учитывающие как протяженность пути, так и форму траектории и даже динамические параметры объекта управления, что позволяет добиться не только обхода препятствий, но и стремиться к более оптимальному прохождению по скорости преодоления пути, по энергетической эффективности, по безопасности для транспортируемого груза и т.д.

Задача планирования траектории является значительно менее трудоёмкой, чем задача её оптимизации и выбора одной из множества допустимых траекторий. Выбор производится на основании одного или нескольких критериев, выбираемых глобально либо локально для конкретного объекта, участка среды, момента времени. «Классические методы оптимального управления основаны на нетривиальных аналитических вычислениях. По этой причине оптимизация управления эффективна в случае простых, в частности, линейных систем.» [87]. Но для более сложных в силу нелинейности систем задача аналитического решения существенно усложняется. В связи с нелинейной природой явлений, лежащих в основе управляемых объектов, получили широкое распространение альтернативные способы решения оптимизационных задач. Многие исследователи обратили своё внимание на численные методы. Конкретные решения зависят от особенностей задачи и достаточно широко классифицируются (рисунок 3.5). По типу аргументов, задачи относятся к дискретным (компоненты вектора параметров принимают дискретные или целочисленные значения) и к непрерывным (компоненты вектора параметров непрерывны). Задачи также классифицируются по виду целевой функции и функций ограничений, по размерности вектора параметров. Задачи без ограничений, в которых вектор параметров одномерный, называются задачами с одной переменной. Это простейший, но распространённый подкласс оптимизационных задач. Задачи условной оптимизации с линейными функциями ограничений называются соответственно задачами с линейными ограничениями. Целевые функции в таких задачах, однако, могут быть как линейными, так и нелинейными. Задачи с линейными функциями вектора параметров при непрерывных параметрах называются задачами линейного программирования; задачи целочисленного программирования подразумевают

целочисленные компоненты вектора параметров. В случае нелинейности целевой формулы при линейности ограничений говорят о задачах нелинейного программирования с линейными ограничениями. Такие задачи отдельно классифицируются по виду функции. В зависимости от вида нелинейной целевой функции различают задачи квадратичного, дробно-линейного и другие.

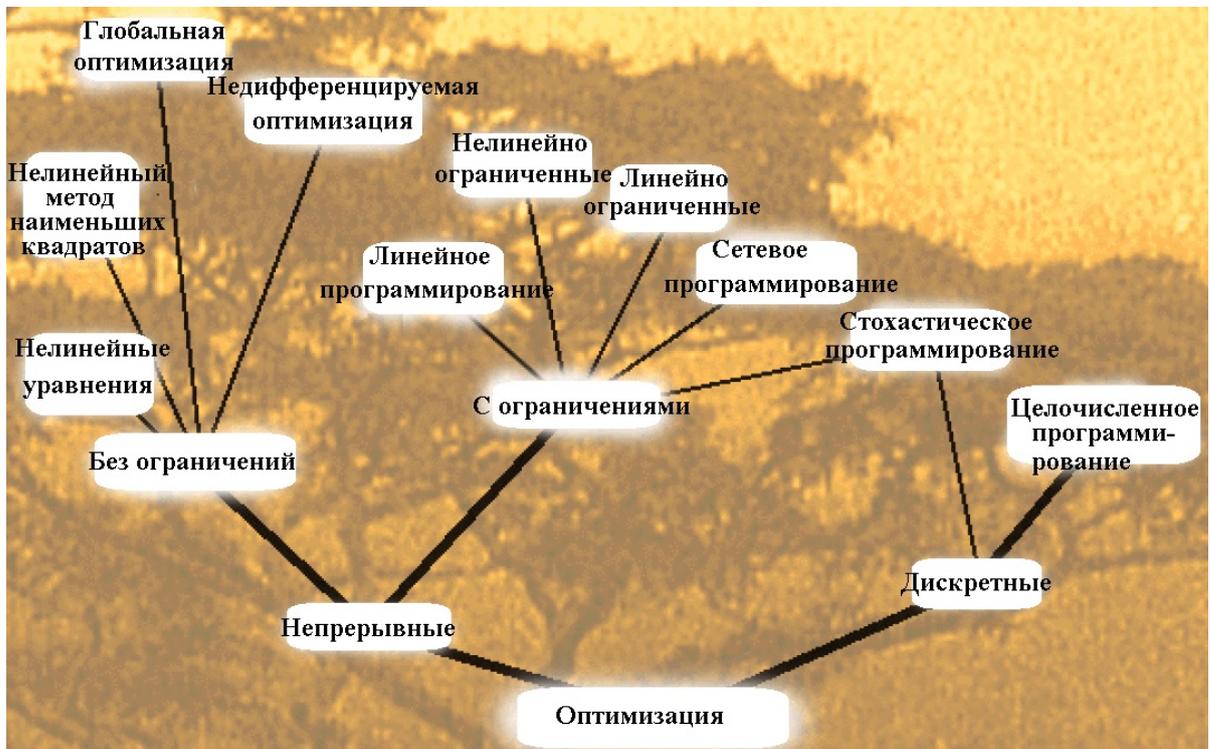


Рисунок 3.5 – Классификация методов оптимизации [88]

В заключение рассмотрим методы формирования траектории, основанные на применении интеллектуальных алгоритмов. Интеллектуальные алгоритмы поведения содержат в своей основе принципы, встречающиеся в живой природе. Эти алгоритмы нередко называют биоинспирированными или бионическими. Решение задачи происходит за счёт имитации поведения биологических организмов, сообществ или мышления человека. В число биоинспирированных алгоритмов входят: «муравьиный» алгоритм, метод роя частиц, «роевой интеллект», «пчелиный» алгоритм, а также генетические и эволюционные алгоритмы. Они чаще всего используют как механизм поиска или, иными словами, минимизации. Так как эти алгоритмы в основном не имеют строгого математического обоснования полноты решения задачи, их относят к

эвристическим алгоритмам. Среди интеллектуальных методов выделяются генетические алгоритмы и искусственные нейронные сети.

Генетические алгоритмы позволяют решать оптимизационные задачи, получая субоптимальные решения в условиях ограниченности вычислительных и временных ресурсов. При этом, вне зависимости от вида задачи, представление условий задачи и форма искомого решения играют одну из ключевых ролей при применении методов генетических алгоритмов.

Искусственные нейронные сети с развитием производительности компьютеров, а также выпуском специализированных программных и аппаратных средств, стали популярным и эффективным решением для широкого круга задач. Однако, умение грамотно найти подход к формированию структуры сети в каждом конкретном случае всё ещё неотъемлемый элемент процесса разработки. В задачах управления нейронные сети решают ряд подзадач: распознавание образов объектов, управление подсистемами мобильного устройства, коррекция траектории в реальном времени, прокладывание маршрута и другие. Применительно к задачам прокладывания маршрута, выделяется класс методов на основе составления нейронных карт. Методы на основе нейронных карт при сохранении своей самобытности, включают некоторые черты, присущие другим методам поиска пути: декомпозицию пространства, взвешивание ячеек карты, присваивание препятствиям и целевым точкам выдающихся значений весов-потенциалов и т.д.

3.2 Выбор методов автоматизированного формирования траекторий

В результате обзора известных математических, структурных и алгоритмических подходов к формированию траекторий, выполненного в разделе 3.1, сформирована таблица, отражающая ключевые особенности каждого из методов в контексте поставленных задач (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Сводная таблица особенностей методов формирования траекторий

Группа	Метод	Формирование трёхмерной траектории	Расположение магистральных линий
На основе графов	Граф видимости	Преимущественно нацелен на решение задач обхода препятствий, сложности с неоднородными картами	Не соответствует поставленной задаче
	Диаграмма Вороного	Ресурсоёмкая процедура разбиения на трёхмерные локусы; в контексте задачи не предоставляет преимущества по сравнению с более простой декомпозицией	Не соответствует поставленной задаче
Декомпозиция	Дейкстры, Алгоритм Ли	Применимы	Не соответствует поставленной задаче
	Эвристические A* и др.	Плохо применимы для неоднородной среды из-за использования эвристики	
Потенциального поля	–	Применим с ограничениями на форму препятствий и вид неоднородности карты	Позволяет сформировать представление карты, но не решает задачу размещения линий
Интеллектуальные	Искусственные нейронные сети	Применимы	Применимы с ограничениями (неопределённость размера вектора входных параметров)
	Генетические алгоритмы	Сложности при формализации задачи	Применимы
Вероятностные	Маршрутные сети	Сложности представления неоднородности среды, нестабильность решения	Не соответствует поставленной задаче
	Случайные деревья	Сложности представления неоднородности среды, нестабильность решения	

В результате анализа рассмотренных методов можно заключить, что для решения задачи расположения основных магистральных линий перемещения груза УЭХД подходят методы, способные решать соответствующие задачи мультипараметрического поиска при выборе параметров обобщённой схемы магистральных линий. В роли таких методов выступают интеллектуальные методы. Многие методы нацелены на поиск последовательности конфигураций, что не соответствует решаемой задаче размещения схемы линий.

Интеллектуальные методы являются более универсальными. В связи с переменным числом входных параметров (координаты технологических позиций, участки технологических перемещений маршрута), метод генетических алгоритмов более предпочтителен.

Задача формирования траектории в виде последовательности опорных точек при управлении мехатронным устройством-манипулятором УРОБВ заслуживает отдельного внимания. Несколько методов ограниченно или полностью применимы для решения рассматриваемой задачи. Использование метода экспертных оценок позволяет провести обоснованный выбор из нескольких вариантов. Методы экспертных оценок - это методы организации работы со специалистами-экспертами и обработки мнений экспертов [89]. Они нашли широкое применение и глубоко изучены. В данной работе метод экспертных оценок применён для комплексной оценки характеристик моделей и методов интеллектуального анализа с целью выбора наиболее эффективных в контексте решаемых задач с учётом особенностей рассматриваемых систем.

Выбор количественного и качественного состава группы экспертов произведён на основе анализа проблемы, а также характеристик экспертов. Главной рассматриваемой в работе характеристикой экспертов является степень компетентности. Под компетентностью понимается квалификация эксперта в определенной области знаний. Перечень экспертов подобран в соответствии со следующим перечнем профессиональных стандартов и квалификаций: 06.001 Программист, 06.015 Специалист по информационным системам, 06.028 Системный программист, 40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами. Для количественной оценки степени компетентности используется коэффициент компетентности, с учетом которого взвешивается мнение эксперта. Коэффициент компетентности определяется исходя из одинаковой базовой компетентности подобранных специалистов, а также с учётом результатов перекрёстного опроса экспертов. Перекрёстный опрос предлагал экспертам высказаться по поводу

включения в список экспертов приведённых специалистов в выбранных направлениях.

На этапе оценки компетентности экспертов проведено анкетирование. Получена матрица, где результаты анкетирования каждого эксперта располагаются в отдельной строке, а номер столбца соответствует номеру эксперта, о котором высказывается мнение. Единица соответствует утвердительному ответу на вопрос о соответствии компетенции эксперта в контексте рассматриваемой задачи управления для включения в группу, а ноль – отрицательному.

Итоговая оценка компетентности экспертов получена с помощью коэффициента, вычисляемого по формуле:

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m x_{ij}}, \quad (3)$$

где c_i – коэффициент компетентности i -го эксперта, m – число экспертов, x_{ij} – оценка, поставленная i -тым экспертом j -тому эксперту.

Итоговые оценки компетентности экспертов, рассчитанные на основании данных перекрёстного опроса, приведены в таблице 3.2:

Таблица 3.2 – Результаты расчётов компетентности экспертов

Номер эксперта	1	2	3	4	5	6	7
Коэффициент компетентности	0,143	0,143	0,167	0,119	0,167	0,143	0,119

Проведён опрос экспертов по основной проблеме путём анкетирования. Перед экспертами была поставлена задача провести ранжирование предложенных методов формирования траектории в порядке убывания их эффективности с точки зрения известных эксперту факторов. Размещение нескольких методов на одном ранге допускалось. Результаты анкетирования приведены в таблице 3.3, где число означает номер ранга. В случаях, когда эксперты относили к одному рангу несколько методов, методам присвоено значение среднего арифметического пропущенных рангов.

Проведено обобщение результатов ранжирования с использованием методов усреднения и медианы. При этом к приведённым в таблице 3.3 результатам были применены поправочные коэффициенты с учётом данных из таблицы 3.2.

Таблица 3.3 – Результаты анкетирования экспертов

№ эксперта	На основе графов	На основе декомпозиции	Потенциального поля	Интеллектуальные	Вероятностные
1	5	2	3	1	4
2	4,5	2	3	1	4,5
3	5	3	1,5	1,5	4
4	3	4,5	1	2	4,5
5	5	1	2,5	2,5	4
6	5	2	3	1	4
7	4	3	1	2	5

Результат обобщённых ранжировок методом среднего арифметического и методом медианы, приведённые в таблице 3.4 совпадают, ядер противоречий кластеризованных ранжировок не обнаружено, согласования не требуется [89].

Таблица 3.4 – Ранжировка результатов с учетом компетенции экспертов

	На основе графов	На основе декомпозиции	Потенциального поля	Интеллектуальные	Вероятностные
Ср. знач.	4,58	2,42	2,19	1,57	4,25
Ранг	5	3	2	1	4
Медиана	5	2	2,92	1,67	4,17
Ранг	5	2	3	1	4

Согласованность мнений экспертов оценена при помощи коэффициента конкордации Кендалла [89]:

$$W = \frac{12 \cdot S_w}{m^2(n^3 - n)}, \quad (4)$$

где S_w – сумма квадратов отклонений сумм рангов от среднего арифметического:

$$S_w = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m r_{ij} - \frac{m(n+1)}{2} \right]^2, \quad (5)$$

где n – число методов, m – число экспертов, r_{ij} – ранг i -го метода по мнению j -го эксперта.

В связи с наличием связанных рангов, необходимо применять скорректированную версию коэффициента [90]:

$$W = \frac{12 \cdot S_w}{m^2(n^3 - n) - m \cdot \sum_{s=1}^n T_s}, \quad (6)$$

где T_s – поправка на наличие связанных рангов.

$$T_s = \sum_{g=1}^{C_s} (c_g^3 - c_g), \quad (7)$$

где C_s – число групп связанных рангов в s -ой ранжировке, c_g – число связанных рангов в g -ой группе.

На основе матрицы рангов (Таблица 3.3) сформирована матрица необходимых параметров (Таблица 3.5). Вычислено значение суммы квадратов отклонений сумм рангов от среднего арифметического: $S_w = 339,5$. В оценках четырёх экспертов есть по паре связанных оценок. Определены величины поправок на наличие связанных рангов: $T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = 0,5$. Число экспертов $m = 7$, число методов $n = 5$. Величина коэффициента конкордации Кендалла $W = 0,71$, что говорит о наличии высокой степени согласованности мнений экспертов.

Таблица 3.5 – Матрица параметров для оценки согласованности

Параметр	На основе графов	На основе декомпозиции	Потенциального поля	Интеллектуальные	Вероятностные
Сумма рангов	31,5	17,5	15	11	30
Откл. от среднего	10,5	-3,5	-6	-10	9
Квадрат отклонения	110,25	12,25	36	100	81

Проведём оценку значимости полученной оценки согласованности. Для этого сформулируем две гипотезы: Нулевую H_0 и альтернативную H_a . Нулевая гипотеза сформулирована в следующей форме: оценки экспертов не согласуются. Альтернативная гипотеза сформулирована обратным образом: Оценки экспертов согласуются. Количество оцениваемых объектов n ниже границы применимости критерия Пирсона χ^2 , а в таких случаях рекомендуется пользоваться справочниками [91, 92, 93] с таблицами, например, таблица 6.10 в [92] или таблицы П.11^а и П.11^б в [93]. Подходящие значения параметров m и n удалось обнаружить только в таблице П.11^б [93]. Таблица составлена по принципу сравнения сумма квадратов отклонений сумм рангов от среднего арифметического S_w с

критическими значениями, рассчитанными для уровня значимости $\alpha = 0,05$. Табличный уровень значимости является достаточным. Сравниваем полученное значение с табличным: $339,5 > 276,2$. Гипотеза о несогласованности оценок экспертов отвергается при выбранном уровне значимости.

Проведённый анализ позволяет заключить, что при помощи метода экспертных оценок удалось определить наиболее эффективный метод формирования траектории для мехатронного устройства-манипулятора со статистически значимой согласованностью решения, вынесенного группой экспертов.

3.3 Метод генетического поиска

В основе ряда методов поиска, как и многих других технологий, используемых человеком, лежит попытка адаптации механизмов, используемых природой, для решения задач в интересах человека для удовлетворения его нужд. Как упоминалось ранее, многие алгоритмы решения задач попадают в класс эвристических или опытных алгоритмов. Это особенно свойственно для биоинспирированных алгоритмов, ведь естественный ход вещей в природе приводит к получению более приспособленных и более адаптивных систем за счёт проведения естественного отбора. Можно с определённой долей уверенности заявить, что и живой и неживой мир занимаются непрерывным экспериментированием. Нет ничего удивительного в том, что и первые попытки человечества освоить технологии имели схожий характер и заключались в повторении успешных действий и закреплении успешного опыта. Попытки разобраться в том, что является определяющим фактором успеха той или иной операции, привели от подражания и повторения к описанию и рецептурной технологии, что можно также отнести к проявлению первобытной интеллектуальной деятельности. Современное человечество шагнуло далеко вперёд благодаря освоению практики формирования общей теории для описания

процессов окружающего мира. Несмотря на то, что возможности теоретической науки велики и современный уровень технического прогресса без теории немислим, методы, основанные на опыте (эвристические) всё еще сохраняют свою эффективность, изучены и описаны при помощи соответствующей теории.

Одним из эвристических методов поиска решения является генетический поиск, который осуществляется при помощи ГА. В ГА используется смешенная терминология, включающая понятия из генетики и ряд дополнительно введенных понятий. Панченко Т.В. приводит такие аналогии между терминами в генетике и в ГА: «Так, для понятия, заимствованного из генетики, можно предъявить его искусственный (символический) аналог. Например, хромосома и строка. В биологических системах полный генетический пакет называется генотипом. В искусственных системах полный генетический пакет строк называется структурой. В биологических системах в процессе индивидуального развития организма взаимодействие генотипа с окружающей средой формирует совокупность внешних признаков и свойств, называемую фенотипом.» [14].

Пространство решений для генетического алгоритма формируется путём предварительного выбора и применения механизма кодирования с помощью набора параметров. Параметры должны быть подобраны так, чтобы их значения с требуемой точностью покрывали всё множество решений, согласно выбранному механизму кодирования и декодирования. Панченко Т.В. указывает на то, что: «В генетике с любым локусом связана определенная генетическая функция. <...> В биологической терминологии говорят, что хромосома образована генами. В генетике с любым локусом связана определенная генетическая функция. Поэтому можно говорить о специализированных генах.» [14]. Таким образом, те или иные гены в определённых участках отвечают за определённые внешние признаки генетической системы. Иными словами, не только изменение генов, но и изменение их последовательности в хромосоме, изменяет признаки особи. На этом принципе основаны некоторые операторы мутации, применяемые в ГА. В литературе иногда приводится прямая связь между естественной (биологической) и искусственной терминологией. Примером может послужить таблица 3.1 [14].

Отличия ГА от других алгоритмов оптимизации и поиска заключаются в: необходимости решения задачи предварительного кодирования множества параметров; проведении поиска с применением нескольких альтернатив на множестве решений; использовании не градиента, а целевой функции для оценки качества решения; использовании нестрогих вероятностных правил.

Таблица 3.1 – Связь между естественной (биологической) и искусственной терминологией [14]

Хромосома	Строка
Ген	Значение функции, характеристика, детектор
Аллель	Возможные значения генов
Локус	Позиция в строке
Генотип	Фактическая структура. Кодированная хромосома
Фенотип	Множество параметров, альтернативное решение, декодированная структура
Эпистаз	Нелинейность. Взаимодействие генов

Для применения ГА требуется сформировать множество параметров в соответствии с решаемой оптимизационной задачей и провести кодирование параметров в конечную последовательность с помощью подходящего алфавита. Так формируются начальные данные, составляющие исходную популяцию альтернативных решений. Каждый элемент популяции может представлять из себя одну или набор хромосом, а также набор особей. Хромосомы в свою очередь составлены из генов. В ходе работы алгоритма, над популяцией производится последовательность операций, обусловленных выбранным набором и типом генетических операторов. Различают целый ряд операторов с различной ролью и функциями: селекция, скрещивание, мутация, инверсия, транслокация, транспозиция, сегрегация, удаление, редукция, рекомбинация. Процесс эволюции в популяции производится по аналогии с процессами живой природы и представляет собой чередование поколений популяции, в которых изменяются хромосомы так, чтобы каждое следующее поколение было более

приспособленным. Уровень приспособленности определяется значением целевой функции для каждого элемента в популяции. Подбор функции приспособленности во многом определяет ход эволюции и получаемое решение. Работа алгоритма продолжается до предела, определяемого различными условиями, в качестве которых могут выступать: выполнено заданное число итераций алгоритма, достигнуты определённые качества решения, алгоритм предварительно сошелся и не может покинуть область локального оптимума.

Генетические операторы можно разделить на основные группы: скрещивание, мутация, отбор пар родителей, селекция. Каждый вид операторов может иметь различную реализацию, к примеру, опираясь на вероятностные значения, на строго детерминированные законы, либо совмещая оба подхода. На основе совокупности используемых реализаций операторов, различают отдельные классы алгоритмов, такие, как: канонический, генитор, гибридный, с прерывистым равновесием, СНС (Cross-population selection, Heterogeneous recombination and Cataclysmic mutation), с нефиксированным размером популяции и др.

В общем случае последовательность работы генетического алгоритма сводится к следующим действиям, согласно книгам Панченко Т.В., Гладкова Л.А. и Курейчика В.М. [14; 17]:

- 1) Генерация начальной популяции.
- 2) Определение приспособленности с помощью функции.
- 3) Проведение отбора хромосом-родителей.
- 4) Проведение скрещивания (crossingover) родителей, создание пар потомков.
- 5) Проведение мутации.
- 6) Определение «вымирающих» хромосом.
- 7) Определение приспособленности всех членов популяции и средней приспособленности всей обновлённой популяции.
- 8) Проверка условий завершения работы алгоритма и возврат к пункту 3 либо завершение.

В книге Панченко Т.В. приводятся следующие преимущества и недостатки генетических алгоритмов:

«Среди преимуществ можно выделить:

- 1) ГА не требуют никакой информации о поведении функции (например, дифференцируемости и непрерывности);
- 2) разрывы, существующие на поверхности ответа, имеют незначительный эффект на полную эффективность оптимизации;
- 3) ГА относительно стойки к попаданию в локальные оптимумы;
- 4) ГА пригодны для решения крупномасштабных проблем оптимизации;
- 5) ГА могут быть использованы для широкого класса задач;
- 6) ГА просты в реализации;
- 7) ГА могут быть использованы в задачах с изменяющейся средой.

В то же время существует ряд трудностей в практическом использовании ГА, а именно:

- 1) с помощью ГА проблематично найти точный глобальный оптимум;
- 2) ГА неэффективно применять в случае оптимизации функции, требующей большого времени на вычисление;
- 3) ГА непросто смоделировать для нахождения всех решений задачи;
- 4) не для всех задач удастся найти оптимально кодирование параметров;
- 5) в многоэкстремальных задачах ГА сталкивается с множеством аттракторов;
- 6) ГА трудно применить для изолированных функций. Изолированность решений — проблема для любого метода оптимизации. Она возникает если поведение функции на большей части области значений никак не отражает расположение максимума и лишь случайное попадание особи в глобальный экстремум поможет решить задачу.» [14]

Обобщённая схема типового ГА приведена на рисунке 3.6.

Таким образом из анализа специализированной литературы становится понятно, что ГА являются относительно простым и эффективным средством для решения задач в условиях недостаточной детерминированности с точки зрения прикладной математики при постановке задачи, когда полное решение затруднено, а требования допускают применение квазиоптимального решения.

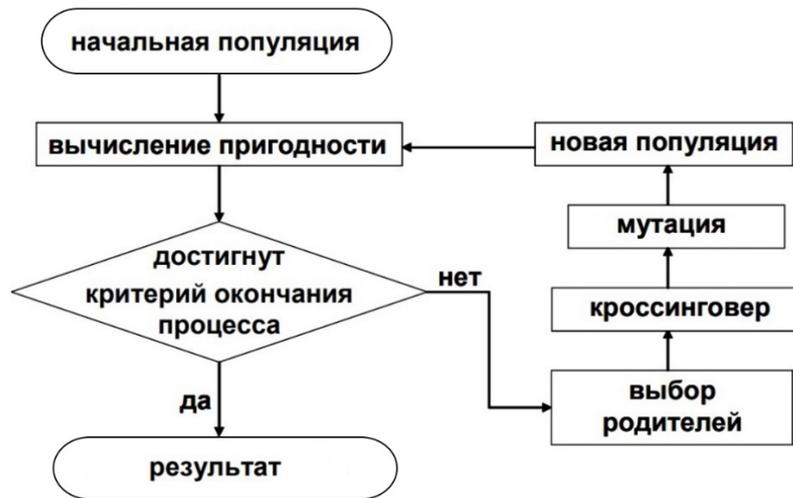


Рисунок 3.6 – Обобщённая схема генетического алгоритма

Возможности рассмотренного метода соответствуют задаче верхнего уровня управления УЭХД: определение параметров безопасной схемы маршрутных линий с учётом соответствия линиям технологического маршрута.

3.4 Метод нейронной карты

Существует несколько подходов к применению искусственных нейронных сетей применительно к задачам поиска траектории. В приведённом исследовании под поиском и формированием траектории подразумевается формирование последовательности опорных точек пути. Для распространённых систем управления мобильными роботами, как Robot Operating System, созданы удобные средства сравнения, наладки и имплементации алгоритмов навигации [94]. В настоящее время чаще всего нейросети используют в качестве вспомогательного инструмента для быстрого принятия решений при формировании локальной траектории. Решение локальной задачи в заведомо не определённых условиях нередко выделяется в отдельный класс задач, так как этот класс очень свойственен для мобильной робототехники. Чаще всего задачи подобного класса сводят к решению на плоскости [95]. Для решения задач быстрого локального управления подходят небольшие рекуррентные нейронные сети [96; 97; 98; 99], а также

относительно простые глубокие нейронные сети с небольшим числом входов [100]. Для поиска глобального пути в том числе в условиях запутанных препятствий чаще прибегают к другим алгоритмам, как правило, основанным на методах представления карты в форме деревьев, графов и в других формах, используемых для регулярной или нерегулярной декомпозиции занимаемого картой пространства с применением элементов случайного поиска или без. Очень распространены алгоритм поиска Дейкстры (Dijkstra), его развитие A стар (A^*), дальнейшее развитие Тета стар (Theta*) и прочие модификации. Исследователи со всего мира комбинируют и видоизменяют алгоритмы поиска пути под различные задачи, опираясь на свойственные их задаче ограничения при выборе решения.

Одним из возможных вариантов решения задачи поиска пути является метод «нейронной карты». В отличие от таких фундаментальных методов, как ГА, метод нейронной карты сравнительно мало изучен. Отдельного упоминания достойны многие исследователи данного направления. В числе первых упоминаний метода можно отметить публикацию «Динамика нейронной сети для планирования маршрута и обхода препятствий» в восьмом томе журнала Нейронные Сети (Neural Networks) от 1995 года [7]. Авторы предлагают рассмотреть множество возможных состояний гипотетического робота с d степенями подвижности, как d -мерное пространство всех доступных конфигураций. Все препятствия предложено рассматривать, как некоторое подмножество всех конфигураций, элементы которого не могут быть достигнуты манипулятором по причине касания препятствий одним из звеньев. Авторы также предложили использовать d -мерную кубическую решётку в узлах которой располагаются искусственные нейроны, связанные с некоторым числом соседей синаптическими связями. Идея получила развитие в статье «Биоинспирированная нейронная сеть для формирования траектории и обхода препятствий» годом позже, где были разобраны подробности формирования связей между нейронами, а также предложена оригинальная двухслойная структура нейронной карты с непрерывно взвешиваемыми нейронами [8]. Характерной чертой работ является немалое внимание, посвященное вопросу сходимости весовых значений нейронов карты при условии непрерывного

взвешивания. Рассмотрены условия сходимости для дискретного и непрерывного случаев, для случаев последовательного, параллельного и случайного порядка активации. Весовая поверхность карты представлена на рисунках 3.7а для одной целевой точки и 3.7б для двух целевых точек.

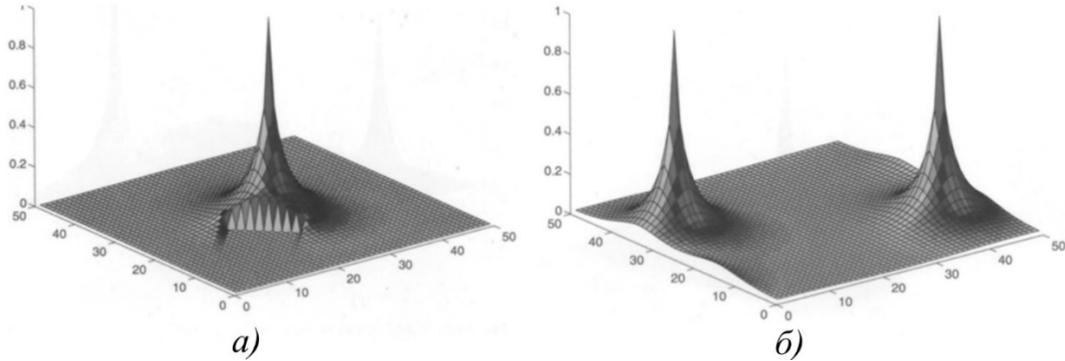


Рисунок 3.7 – Весовые поверхности двумерной двухслойной нейронной карты

Позднее идея нашла отражение в работах, посвященных формированию траекторий мобильного робота, где получила практическую реализацию [9; 10]. Алгоритм получил адаптацию под соответствующие возможности вычислительной системы робота, а также под бортовую систему получения информации. Алгоритм, как и ранее, применялся исключительно для задач на плоскости (рисунок 3.8а), где предлагался метод последовательной активации карты при помощи диагональных растров, по аналогии с алгоритмами обработки изображений (рисунок 3.8б).

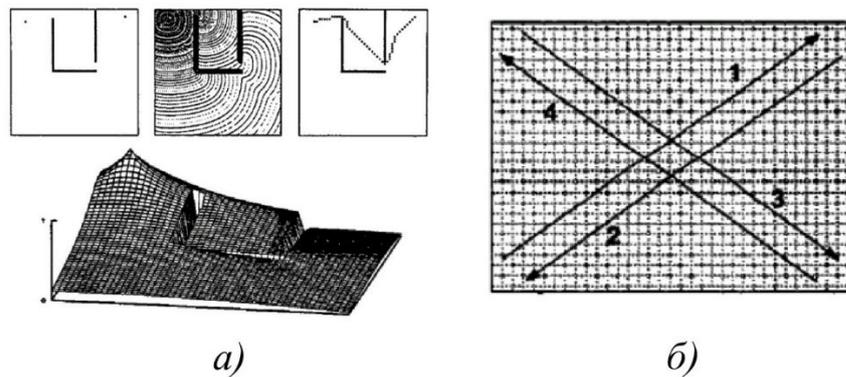


Рисунок 3.8 – Формирование двумерной нейронной карты мобильного робота

Алгоритм активации нейронной карты получил развитие в работе 2003 года «Планирование траектории в реальном времени в динамических средах: сравнение трех моделей нейронных сетей» [12]. Авторы предложили новый подход на основе «нейронной сети с динамически распространяемой волной» (DWENN). Характерной чертой нового подхода является, как проводят аналогию сами авторы,

распространение «волн» активации по карте от начальной точки, подобно волнам, распространяющимся по поверхности жидкости из точки падения камня. Иллюстрация распространения «волн» активации приведена на рисунке 3.9а. Для карты с препятствиями приведены иллюстрации с формой траектории и картой поверхности весов нейронов (рисунок 3.9б).

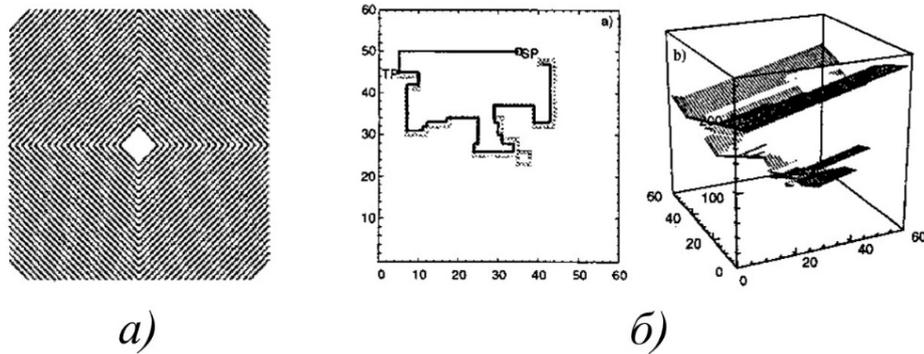


Рисунок 3.9 – Формирование двумерной нейронной карты мобильного робота по алгоритму DWENN

Заметно, как фронт «волн» принимает ромбовидные очертания, что частично роднит метод с активацией диагональными растрами, однако сильно сказывается на форме траектории. Траектория всегда принимает вид ломаной кривой с протяженностью участков значительно превышающей размер ячейки дискретизации пространства. Недостаток метода более заметен на участках, требующих перемещения под углом к основным осям нейронной карты.

В работе 2009 года «Использование нейронной карты для планирования траектории мобильного робота» основные принципы унаследованы из работ ранних авторов [101]. Рассмотрена архитектура системы планирования движения на уровне мобильного робота. Для поиска траектории движения на плоскости предложена общая схема нейрона с 8-ю синапсами, ведущими к соседним нейронам. Разбирается механизм формирования взвешенного входного вектора для нейрона путём нормирования скалярного произведения входной матрицы весов. Используется механизм смещения весов нейронов для обработки участков препятствий и формирования начального состояния. Иллюстрация примера задания в форме лабиринта и его решения приведена на рисунке 3.10а, а поверхность активации на рисунке 3.10б.

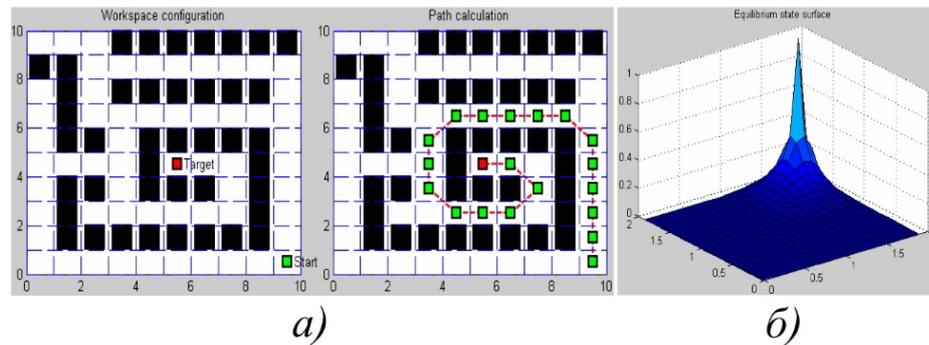


Рисунок 3.10 – Формирование нейронной карты для навигации в лабиринте

Полученное решение развивается авторами в работе 2011 года «Нейросетевой алгоритм планирования траекторий для группы мобильных роботов» для применения в групповом управлении несколькими мобильными роботами [102]. Более развёрнуто модель управления группой роботов представлена авторами в работе 2014 года «Интеллектуальная система планирования траекторий мобильных роботов, построенная на сети Хопфилда» [103], работе 2019 года «Синтез нейросетевой системы планирования траекторий для группы мобильных роботов» [104]. Самое подробное исследование вопроса с результатами практического применения приведены в автореферате и диссертационной работе Юдинцева Б.С. «Нейросетевая система планирования траекторий для группы мобильных роботов» от 2020 года [105]. Автор усовершенствует модель в том числе за счёт модификации функции активации искусственного нейрона Хопфилда.

Метод навигации при помощи нейронной карты хоть и является нишевым, постепенно развивается на протяжении десятков лет. К числу плюсов метода можно отнести возможность многократного использования результатов активации в условиях неизменяемой обстановки и возможность параметризации модели для учёта неравномерностей свойств среды рабочей зоны по величине в зависимости от участка зоны и направления перемещения. Рассмотренный метод подходит для решения задачи поиска ключевых точек траектории рабочего органа мехатронного устройства-манипулятора УРОБВ, которая возлагается на верхний уровень системы управления. Он позволяет прокладывать безопасный маршрут в обход препятствий, учитывать разницу в нагрузке на двигатели при складывании и

раскладывании штанги, зависимость величины вязкого трения жидкости от глубины погружения штанги и отличия в парусности штанги с рабочим модулем от направления перемещения.

3.5 Выводы по главе 3

1. В результате анализа особенностей рассмотренных в обзоре методов автоматизированного формирования траекторий и опроса группы специалистов с применением метода экспертной оценки, выделены предпочтительные методы, удовлетворяющие техническим требованиям к управлению мехатронными устройствами в составе рассматриваемого специализированного технологического оборудования.
2. Проведён анализ особенностей выбранных интеллектуальных методов и моделей на основе эволюционных вычислений и нейронных карт применительно к рассматриваемым задачам поиска пути и формирования траекторий и маршрутов, рассмотрены известные реализации, выявлены их недостатки и достоинства.

Глава 4. Реализация моделей и методов для решения задач интеллектуализации формирования траекторий и маршрутов специализированных мехатронных устройств

4.1 Модель цифрового представления исходных данных для формирования схемы перемещений рабочего органа портального манипулятора УЭХД

В главе 2 рассмотрены основные черты системы управления рассматриваемого участка и мехатронного устройства-манипулятора, а также особенности стоящей задачи управления. Как отмечалось в ранее опубликованных материалах: «Основной функциональной задачей, решаемой устройствами рассматриваемого класса порталных транспортных механизмов, является перемещение объекта между участками при проведении ряда последовательных операций. В рассматриваемом производственном комплексе не только участки проведения технологических операций, но и участки, над которыми производится перемещение объекта, являются зонами повышенной производственной опасности.» [106]. При решении задачи гибкой адаптации работы мехатронного устройства-манипулятора под изменяемые условия необходимо в соответствии с требованиями, рассмотренными в главе 2, свести набор перемещений грузов с ТРО, осуществляемых в ходе одного полного цикла работы участка, к предопределённому числу линий-магистралей в соответствии с выбранной обобщённой схемой. Это позволит уменьшить площадь конструкций и число объектов, подвергаемых сильному лучевому воздействию со стороны перемещаемого радиоактивного груза, а также воздействию агрессивных химических компонентов, используемых при очистке ТРО [106]. Одним из важных факторов, влияющих на вид обобщённой схемы магистральных линий участка является ограничение количества одновременно задействованных осевых групп приводов механизма мехатронного устройства-манипулятора. Допускается работа приводов только одной степени подвижности механизма в каждый момент

времени, что сопровождается изменением одной координаты положения рабочего органа крана. Технологическая линия, включающая в себя рассматриваемую установку (рисунок 4.1), использует однотипные краны на рабочих участках с различной компоновкой автоматизированных рабочих мест. Алгоритм перемещения обрабатываемых объектов для каждого отдельного участка различается. Кроме этого, исходя из требований, предъявляемых к комплексу (глава 1.4), функции комплекса могут быть расширены как за счёт добавления нескольких отличающихся технологических циклов с различными последовательностями операций, так и за счёт модификации имеющихся циклов, а также путём комбинирования нескольких циклов во времени.

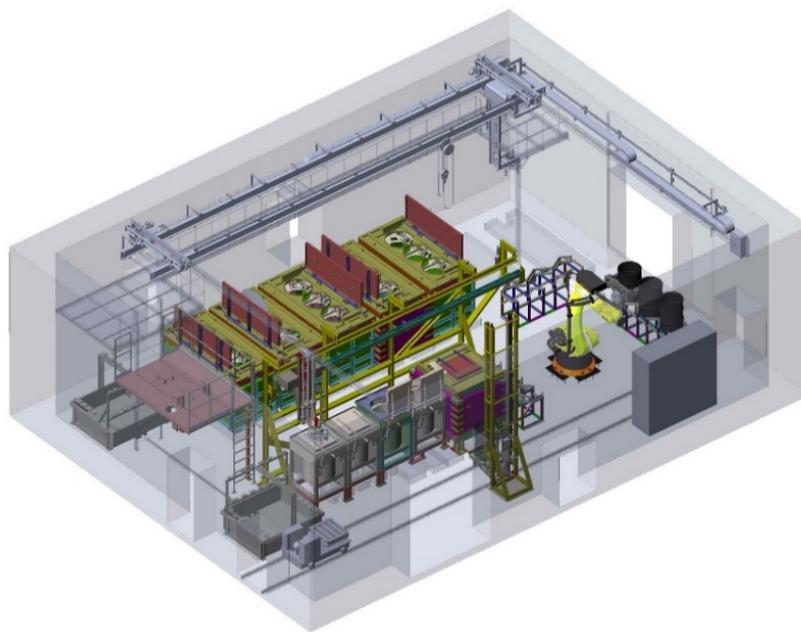


Рисунок 4.1 – Вариант компоновки технологической установки

Таким образом, исследования проводятся для создания программно-реализуемой математической модели в целях автоматизации формирования маршрутной схемы при управлении специализированным порталным краном в соответствии с требуемой последовательностью технологических операций. [107].

Для достижения поставленной практической цели необходимо выполнить ряд подзадач. Во-первых, сформировать модель обобщённой схемы магистральных линий, удовлетворяющих техническим требованиям и ограничениям. Во-вторых, выбрать функцию оценки соответствия расположения магистралей технологическому маршруту с учётом технологических позиций и опасных зон в

рабочей зоне манипулятора. В-третьих, выбрать и реализовать алгоритм поиска решения для выбора расположения схемы магистралей в соответствии с выбранной функцией соответствия.

Функция соответствия выбирается таким образом, чтобы результат выбора схемы магистралей и расположения линий на карте участка отвечал особенностям последовательности, геометрической формы, пространственной ориентации и расположения линий перемещений грузов в технологическом маршруте. Готовая схема магистралей представляет из себя редуцированную (упрощённую) схему перемещений и предполагает использование общих магистральных линий для осуществления перегрузки корзин с ТРО в ходе выполнения последовательных вспомогательных операций технологического маршрута.

При формировании обобщённой схемы магистральных линий необходимо определиться с такими важными параметрами, как числом линий, топологией их соединения и уровнем маршрутной избыточности схемы. Избыточность выражается в возможности достижения некоторых точек схемы несколькими способами. Каждая отдельная обобщённая модель магистральных линий определяет всё множество схем, отвечающих требованиям и отличающихся одинаковыми значениями параметров. При выборе обобщённой модели редуцированной схемы магистральных линий учитываются требования к уменьшению площади рабочей зоны, используемой для перегрузки ТРО, и упрощения задачи поиска доступного пути за счёт снижения маршрутной избыточности и уменьшения числа магистральных линий.

Введём обобщённую модель M , содержащую пересекающиеся под прямым углом магистральные линии, каждая из которых параллельна координатной оси установки Ox или Oy . Назовём эти линии соответственно x -магистралями и y -магистралями. Для сокращения занимаемой площади транспортно-логистической сети в рамках автоматизированного участка, а также для снижения сложности маршрутизации на среднем уровне системы управления с использованием предлагаемой модели – перемещению вдоль каждой оси ставится в соответствие один участок x -магистрали или y -магистрали соответственно. Исключением будут

точки пересечения x -магистралей с y -магистралями, соответствующие координате x для участков, параллельных оси OY и координате y для участков, параллельных оси OX . «При движении вдоль оси OX , линейная функция, описывающая участок магистрали $y(x)$ – однозначна $\forall x \in X \setminus \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, где $y(x)$ определяет y координату x -магистрали, x_1, x_2, \dots, x_m – координаты n параллельных оси OY участков схемы. При движении вдоль оси OY , $x(y)$ – однозначна $\forall y \in Y \setminus \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, где $x(y)$ определяет x координату y -магистрали, y_1, y_2, \dots, y_n – координаты m параллельных оси OX участков схемы. Числа $n, m \in \mathbb{N}$ соответствуют числу x -магистралей и y -магистралей. Пусть L_{x_i} и L_{y_j} – длины соответствующих магистралей x_i и y_j . Тогда общие длины x -магистралей и y -магистралей соответственно равны

$$L_x = \sum_{i=0}^n x_i; L_y = \sum_{j=0}^m y_j. \quad (8)$$

Для модели выбранного вида, L_x и L_y совпадают с размерами зоны технологических операций: $L_x = [x_{\min}; x_{\max}]$, $L_y = [y_{\min}; y_{\max}]$. С увеличением n и m увеличивается размерность множества возможных схем-реализаций модели, что повышает «адаптивность» модели, однако, сопровождается увеличением сложности траектории перемещений и поиска самого приспособленного набора параметров модели. Значения n и m можно включить в число оптимизируемых параметров модели, но это существенно усложнит алгоритм оптимизации и процесс поиска его параметров. При необходимости, можно провести автоматизацию процедуры подбора количества x и y магистралей в рамках самостоятельной программно-алгоритмической задачи.» [106].

Выбор значений n и m производился с учетом числа координатно-обособленных групп технологических позиций участка (сгруппированных), где в качестве «обособленных» могут выступать группы позиций на технологических поддонах и другие группы технологических позиций в различных узлах химико-технологического комплекса. Если число таких групп в технологических маршрутах может сильно различаться, то возможно прибегнуть к средствам кластерного анализа данных [108; 109] для автоматического определения числа

групп локализованных позиций. В исследовании не рассматриваются подобные случаи в связи с тем, что автоматизированные участки КП ТРО крайне специализированы и подразумевают predetermined технологическим назначением число зон локализации технологических позиций. Опираясь на количество групп, предлагается выбирать n и m заранее в качестве постоянных параметров алгоритма, влияющих на сложность поиска и гибкость полученной модели. В рассматриваемом случае для модели M выбраны значения $n=2$ и $m=2$. Это означает, что, модель M предполагает наличие двух x -магистралей и двух y -магистралей.

В качестве переменных параметров выбранной модели рассмотрим соответствующие координаты каждой из магистралей схемы: x_1, y_1, x_2, y_2 . В соответствии с параметрами доступны два способа расположения магистралей. Для того, чтобы не вводить дополнительный параметр, определяющий конкретный вариант схемы, в сравнительных оценках при поиске решения рассматриваются оба варианта, а выбирается обладающий большей приспособленностью.

С помощью представленного способа параметризации необходимо провести поиск решения в пространстве состояний обобщённой модели по следующим правилам: «Пусть вектор d – решение задачи выбора параметров модели M . Определим пространство поиска D , как множество всех возможных решений d_k . Под решением d_k понимается вектор вида $(x_{1k}, y_{1k}, x_{2k}, y_{2k})$.» [106]. Для проведения сравнительной оценки решений d_k из пространства D между собой введём функцию, оценивающую удалённость точек маршрута от точек маршрутных линий с учётом направления маршрутного перемещения. Функция позволит оценивать степень «соответствия» схемы магистральных линий – выбранной модели с выбранными параметрами. Для описания технологического маршрута предлагается прибегнуть к методу, схожему по своему принципу с методом потенциальных полей, но с использованием векторного поля: «Определим векторное поле поиска F над множеством E радиус векторов горизонтальной плоскости XOY : $F : E \rightarrow E$; $F(\mathbf{r}) = (F_x(x,y), F_y(x,y))$, где \mathbf{r} – радиус вектор, лежащий в плоскости XOY . Технологический маршрут представим множеством векторов P

перемещений между ключевыми технологическими точками рабочего пространства.» [106]. Вектор-функция $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ отражает влияние выбранного технологического маршрута (множества векторов \mathbf{P}) в каждой точке рабочей зоны мехатронного устройства на «востребованность» перемещения, то есть позволяет каждому вектору \mathbf{r} из множества E поставить в соответствие вектор, характеризующий влияние множества векторов \mathbf{P} по направлению и по величине. Это позволит сформировать векторное поле «плотности» перемещений, что позволяет оценить степень соответствия предлагаемой магистрали выбранному технологическому маршруту.

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \sum_{i=0}^k \mathbf{U}(\mathbf{P}_i, \mathbf{r}), \quad (9)$$

где \mathbf{P}_i – вектор i -того перемещения; k – общее число перемещений в технологической программе; $\mathbf{U}(\mathbf{P}_i, \mathbf{r})$ – вектор-функция влияния i -того вектора перемещения на востребованность перемещения в точке, заданной радиус-вектором $\mathbf{r} = x \cdot \mathbf{i} + y \cdot \mathbf{j}$ из множества E (\mathbf{i}, \mathbf{j} – орты). Вектор-функция \mathbf{U} задаёт потенциальное поле влияния каждой точки выбранного технологического маршрута на все точки рабочей зоны манипулятора. Функция выбрана таким образом, чтобы значение функции убывало по нормальному закону по мере удаления от рассматриваемого вектора \mathbf{P}_i , что отражает снижение степени соответствия магистрали, проходящей через выбранную точку – маршруту, содержащему \mathbf{P}_i :

$$\mathbf{U}(\mathbf{P}_i, \mathbf{r}) = \text{Gauss}_2(\mathbf{r}_i(\mathbf{P}_i, \mathbf{r}), \mathbf{r}), \quad (10)$$

где $\text{Gauss}_2(\mathbf{r}_i, \mathbf{r})$ – 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} .

$$\text{Gauss}_2(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}) = \exp\left(-\left(\frac{(x_r - x_{ri})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y_r - y_{ri})^2}{2\sigma_x^2}\right)\right), \quad (11)$$

где x_r, y_r – координаты конца вектора \mathbf{r} ; x_{ri}, y_{ri} – координаты конца вектора \mathbf{r}_i ; σ_x – определяет размах функции.

В соответствии с числом групп приводов, управляющих перемещением, элементы векторного поля $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ проецируются на оси движения приводов, формируя скалярные поля $F_x(x,y)$, $F_y(x,y)$ – по одному полю для перемещений вдоль каждой из осей координат манипулятора [110]. В таком случае модель M будет не ориентированной: каждое скалярное поле будет показывать востребованность перемещения вдоль соответствующей оси в каждой из точек рабочей зоны. Однако, также возможно применение и ориентированной модели M_0 . Такая модель будет лучше учитывать специфику выбранного технологического маршрута за счёт большей свободы (большого числа параметров), но увеличит площадь участка, подверженную воздействию агрессивных факторов ТРО при транспортировке. Ориентированная модель рекомендуется для участков с мобильными транспортными устройствами и позволяет применять одновременно несколько мобильных устройств в рамках одной схемы магистралей, снижая предпосылки для столкновений и простоев на ожидание. В рассматриваемом случае модель ориентированных магистралей, как упоминалось ранее, позволит повысить степень соответствия схемы магистралей изначальной графику перемещений. Для использования ориентированной модели необходимо спроецировать векторное поле четыре раза: в каждом направлении для каждой из осей. Введём скалярные поля $F_{xf}(x,y)$, $F_{yf}(x,y)$ для перемещений в направлении роста координат и $F_{xb}(x,y)$, $F_{yb}(x,y)$ для перемещений в направлении убывания координат.

Ориентированная модель рассмотрена в опубликованной работе: «Функции скалярного поля $F_{xf}(x,y)$, $F_{xb}(x,y)$, характеризующие соответствие перемещения вдоль оси OX в каждой точке всему технологическому маршруту, для удобства программной реализации определены следующим образом:

$$F_{xf}(x,y) = \sum_{i=0}^I U_x(\mathbf{P}_i, x, y), F_{xb}(x,y) = \sum_{j=0}^J U_x(\mathbf{P}_j, x, y), \quad (12)$$

где \mathbf{P}_i , \mathbf{P}_j – вектора перемещений вдоль OX в направлении и против направления оси соответственно; U_x – функция «плотности» перемещений вдоль OX , заданная как:

$$\begin{cases} U_x(\mathbf{P}_k, x, y) = \sum_{k=0}^K Gauss_2(x_{k1}, y_{k1}, x, y), & x < x_{k1} \\ U_x(\mathbf{P}_k, x, y) = \sum_{k=0}^K Gauss_1(p_k(x), y), & x_{k1} < x < x_{k2} \\ U_x(\mathbf{P}_k, x, y) = \sum_{k=0}^K Gauss_2(x_{k2}, y_{k2}, x, y), & x > x_{k2} \end{cases}, \quad (13)$$

где $x_{k1}, y_{k1}, x_{k2}, y_{k2}$ – координаты k -го вектора перемещения \mathbf{P}_k в порядке возрастания x : $x_{k1} < x_{k2}$; $Gauss_1(a_0, a)$ – одномерная гауссова функция с центром рассеивания в a_0 ; $Gauss_2(a_0, a, b_0, b)$ – двумерная гауссова функция с центром рассеивания в $\{a_0, b_0\}$, $p_k(x)$ – уравнение y координаты отрезка k -го вектора перемещения \mathbf{P}_k .» [106].

Функции $F_{yf}(x, y)$, $F_{yb}(x, y)$ для перемещений вдоль OY определены аналогичным образом.

В результате получаем набор скалярных полей, отражающих текущий технологический маршрут с учётом направления и удалённости для каждой точки рабочей зоны мехатронного устройства-манипулятора. На основе этих полей можно составить функцию соответствия выбранной схемы магистралей текущему технологическому маршруту с учётом направления и удалённости линий редуцированного маршрута (магистралей) от линий полного маршрута.

Рассмотрим маршрут со схемой перемещений (далее – схема маршрута) приведённой на рисунке 4.2.

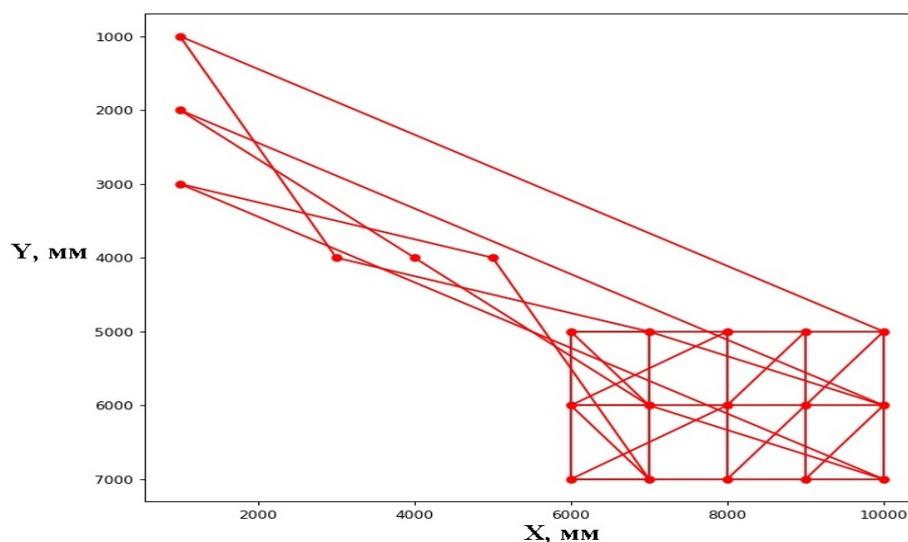


Рисунок 4.2 – Схема маршрута

Значения скалярных полей F_{xf} , F_{xb} и F_{yf} , F_{yb} представлены на рисунке 4.3. На приводимых псевдоцветных иллюстрациях в градациях серого (рисунки 4.3, 4.4)

черный цвет соответствует участкам с максимальным соответствием схемы маршрута (рисунок 4.2) и перемещения вдоль осей: F_{xf} для движения в направлении оси OX , F_{xb} для движения против направления оси OX , F_{yf} для движения в направлении оси OY , F_{yb} для движения против направления оси OY . Графическое представление скалярных полей в трехмерной форме представлено на рисунке 4.4.

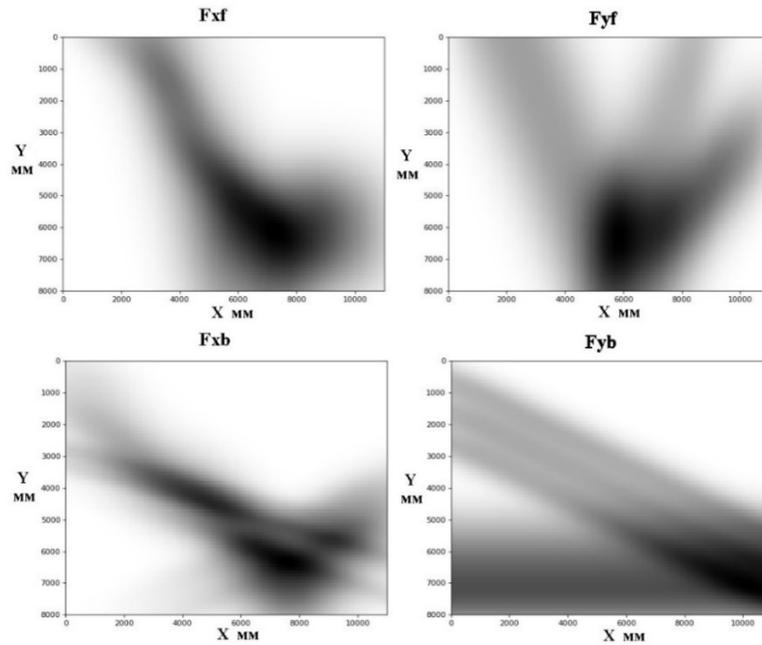


Рисунок 4.3 – Графики скалярных полей F_{xf} , F_{xb} и F_{yf} , F_{yb}

Пусть для рассматриваемой модели M_0 существует решение в виде вектора $d_0 \in D_0$ следующего вида: $(x_{1k}, y_{1k}, x_{2k}, y_{2k}, x_{3k}, y_{3k}, x_{4k}, y_{4k})$.

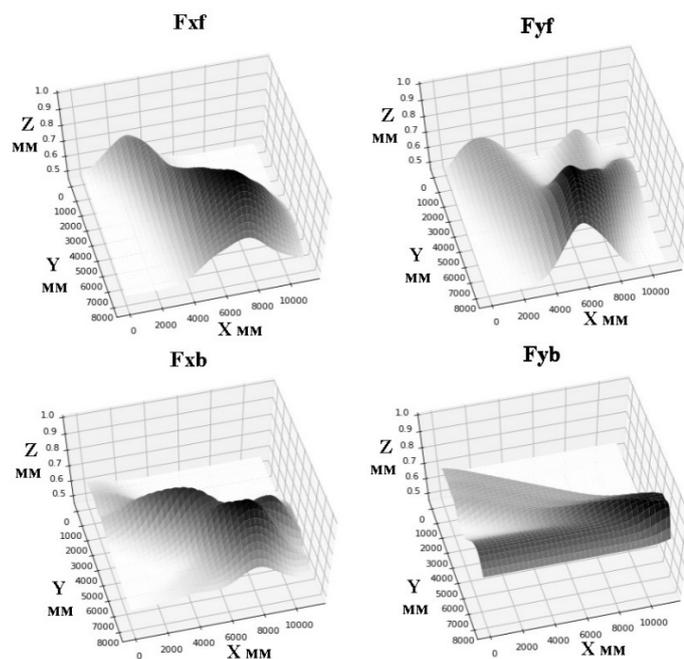


Рисунок 4.4 – Трехмерные графики скалярных полей F_{xf} , F_{xb} и F_{yf} , F_{yb} [106]

Введём функцию W_d , характеризующую соответствие выбранной схемы магистралей полям F_{xf} , F_{xb} и F_{yf} , F_{yb} :

$$W_d = \sum_{i=1}^{n-J} \sum_{l_i} F_{xf}(x, y_i) \Delta x + \sum_{j=1}^{n-I} \sum_{l_j} F_{xb}(x, y_j) \Delta x + \sum_{g=1}^{m-V} \sum_{l_g} F_{yf}(x_g, y) \Delta y + \sum_{v=1}^{m-G} \sum_{l_v} F_{yb}(x_v, y) \Delta y, \quad (14)$$

где W_d – оценочная эффективность решения 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 зависимости от степени дискретизации модели.

Предложенная функция, опираясь на параметризованную модель обобщённой схемы магистральных линий и значения рассматриваемых скалярных полей, позволяет сравнивать между собой схемы магистральных линий, описываемые конкретными наборами параметров, исходя из близости точек направленных линий магистралей к точкам соответственно направленных линий полного технологического маршрута. Таким образом требуется реализовать поиск решения из пространства поиска D_0 на основании величины функции соответствия маршруту (приспособленности) W_d .

4.2 Метод формирования схемы маршрутов движения мехатронных устройств с применением эволюционных вычислений

В соответствии с материалами ранее опубликованных исследований: «Решение задачи поиска для приведенного случая требует проведения анализа многомерной функции. Аналитическое решение в общем виде не представляется возможным. С учетом того, что основной задачей автоматизации является исключение участия человека в процессе управления без потери качества результата, что не требует нахождения самого лучшего решения, с учетом результатов анализа особенностей методов поиска решения траекторных задач,

выбран один из базовых алгоритмов эмпирического поиска – генетический. Этот подход позволяет производить поиск сразу для набора параметров и является одним из относительно простых способов нахождения субоптимального решения за отведенное время.» [106].

Типовая схема генетического алгоритма включает ряд следующих элементов: численное представление популяции хромосом, алгоритм отбора по приспособленности, алгоритм скрещивания для получения потомков, а также алгоритм случайных мутаций потомков [20, с. 7; 22]. На практике для применения ГА потребуется создать исходную популяцию, выбрать способ представления решения, подобрать или разработать операторы с элементами случайных изменений, сформулировать правила отбора особей-решений [17, с. 76], а также провести другие операции в соответствии с типом используемого алгоритма [20; 19]. Принимая во внимание ранее выбранную форму модели M_0 с решением d_0 , отметим, что особи-решения содержат гаплоидный набор из восьми координат-хромосом. В качестве генов выступают соответствующие двоичному представлению значений координат нули и единицы, а в роли локуса выступают двоичные разряды. Для сравнения решений производится расчет оценочной эффективности W_d каждого решения в соответствии с «ландшафтом приспособленности» [20]. Применён алгоритм стандартного вида с набором базовых операторов: отбора, скрещивания, репродукции и мутации. Названия операторов могут различаться в различных источниках. «Одноточечный» [20; 22] или по другой терминологии «простой» [17, с. 81]) оператор выступает в роли оператора скрещивания. Отбор особей-родителей производится на основе ранжирования [22; 19] или заданной шкалы [17, с. 79] с учетом вероятности репродукции P_k :

$$P_k = \int_{k-1}^k \left| Gauss_1(\sigma, a, k) \right|, \text{ где } Gauss_1(\sigma, a, k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(k-a)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (15)$$

где $Gauss_1$ – одномерная гауссова функция; σ – среднеквадратическое отклонение; a – центр рассеивания; k – номер особи в порядке убывания приспособленности

[106]. При выборе вероятности скрещивания чаще всего придерживаются рекомендованного [20, с. 129] [14, с. 37] диапазона 70-80%. Высокий процент скрещивания сопровождается частой заменой родителей более слабыми особями, что приводит к снижению приспособленности нового поколения по сравнению с предыдущим за счёт потери лучших особей, что существенно замедляет поиск. В работе применена стратегия элитизма [20, с. 126] [14, с. 27, 37], которая заключается в безусловной выживаемости самых лучших особей текущей популяции. Для настройки ранжирования отбора родителей выбираем значение $\alpha = 0$, значение σ примем равным размеру элитной группы. При таких настройках скрещивание происходит преимущественно с участием представителей элитной группы (в 68% случаев). В алгоритме применяется оператор гауссовой мутации [111], характеризующийся тем, что значительные изменения потомков происходят с меньшей вероятностью, чем незначительные, а вероятность отклонения подчиняется нормальному закону распределения. Этот вид мутации на практике позволяет более точно находить экстремумы за счёт возникновения случайных незначительных изменений. Создание начальной популяции производится случайно, согласно принципу «дробовика», согласно терминологии, приведённой Л.А. Гладковым, В.В. Курейчиком и В.М. Курейчиком [17, с. 78]. Однако в случаях, когда на карте присутствуют тесно расположенные препятствия, целесообразно использовать сетку значений с шагом около половины ширины минимального коридора, либо комбинировать метод сетки и случайные методы. Условие завершения алгоритма может учитывать разные признаки того, что продолжать расчеты не следует. В качестве критерия завершения поиска используется комплексный критерий: работа алгоритма ограничивается 50-ю поколениями; используется оценка схождения популяции, выраженная в одновременной неизменности лучшего решения (самой приспособленной особи) из популяции и сохранении размаха функции приспособленности менее 1% от приспособленности лучшей особи в течение 5 поколений. Постоянство приспособленности самой приспособленной особи и незначительный размах приспособленности свидетельствуют о том, что алгоритм нашёл лучшее решение из возможных за

отведённое число поколений, либо попал в область сложно преодолимого локального экстремума, либо по другим причинам не сможет улучшить результат и продолжать расчёты не целесообразно. В случаях выявления проблем с нахождением решения, прибегают к различным модификациям алгоритма. Например, существуют вариации операторов, позволяющие изменять масштаб поиска в ходе смены поколений по принципу, подобному методу имитации отжига. Это позволяет на ранних этапах поиска избегать попадания в локальные экстремумы, а на завершающих этапах производить поиск с большей точностью. Эксперименты показали, что в рассматриваемом случае необходимости для усовершенствования алгоритма нет.

Помимо выбора параметров алгоритма необходимо уточнить параметры формирования скалярных полей, которые требуют адаптации под конкретную схему маршрута. На практике низкое значение разброса функции при формировании полей усложнит поиск решения за счёт высокой изолированности пиков (экстремумов), что можно определить по высокому значению градиента. А высокое значение разброса приведёт к низкому значению градиента и малому разбросу значений итоговых полей, что, в свою очередь, затянет поиск. Формула Гауссовой зависимости принимает следующий вид:

$$g(x, y) = A * e^{\left(-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2B^2}\right)}, \quad (16)$$

где $A = 1$ – высота пика, $\{x_0, y_0\}$ – координаты точки маршрута, B – коэффициент размаха. Для снижения числа экстремумов поверхностей с сохранением достаточной для поиска различающей способности, коэффициент B подбирается из соображений снижения суммарной крутизны поверхности с сохранением достаточного разброса значений скалярных полей.

$$B = \text{argin}(\sum \text{grad}^2 - R * k), \quad (17)$$

где R – амплитуда значений поверхности, k – коэффициент контрастности, grad – значение градиента в точке поверхности [106]. Полученные скалярные поля с более гладкими поверхностями приведены на рисунке 4.5.

В ходе вычислительных экспериментов по формированию карты маршрута для УЭХД (рисунок 4.1), согласно выбранной модели магистральных линий и с учетом схемы маршрута (синие линии), приведённой на рисунке 4.2, получена схема магистралей (сплошные желтые и зелёные линии) и остальных маршрутных линий (пунктирные линии), приведённая на рисунке 4.6. Синим цветом обозначены линии технологического маршрута и технологические позиции. Редуцированное решение в виде направленных магистральных линий изображены зеленым цветом для движения вдоль осей и желтым для движения против осей.

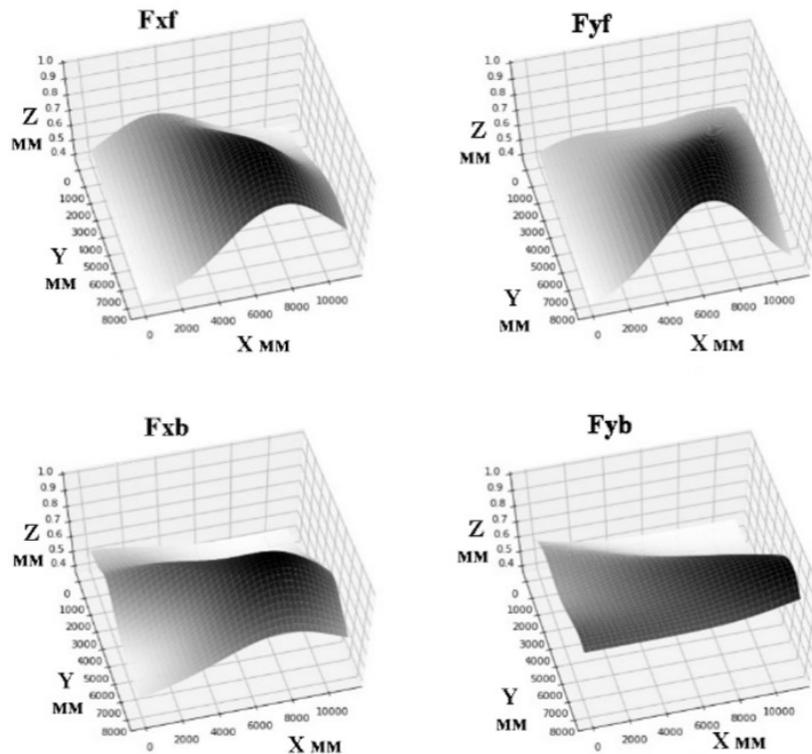


Рисунок 4.5 – Трёхмерные графики сглаженных скалярных полей F_{xf} , F_{xb} и F_{yf} , F_{yb} [106]

Рисунок 4.7 иллюстрирует достигаемые значения приспособленности особей и разброс значений приспособленности внутри популяции. Представлено шесть случайных последовательно проведённых эксперимента, в которых поведение величины и разброса функции приспособленности отражают типовую работу разработанного алгоритма в рамках описанной задачи. Алгоритм справляется с поиском решения убедительно за менее чем 20 поколений, но в его работе, как и ожидалось, присутствует заметное влияние случайности, привнесённое наличием вероятностного характера реализации операторов создания начальной популяции,

скрещивания и мутации. Исключительные ситуации возникают редко, и рекомендуется проводить около 10 попыток и выбирать лучшее решение.

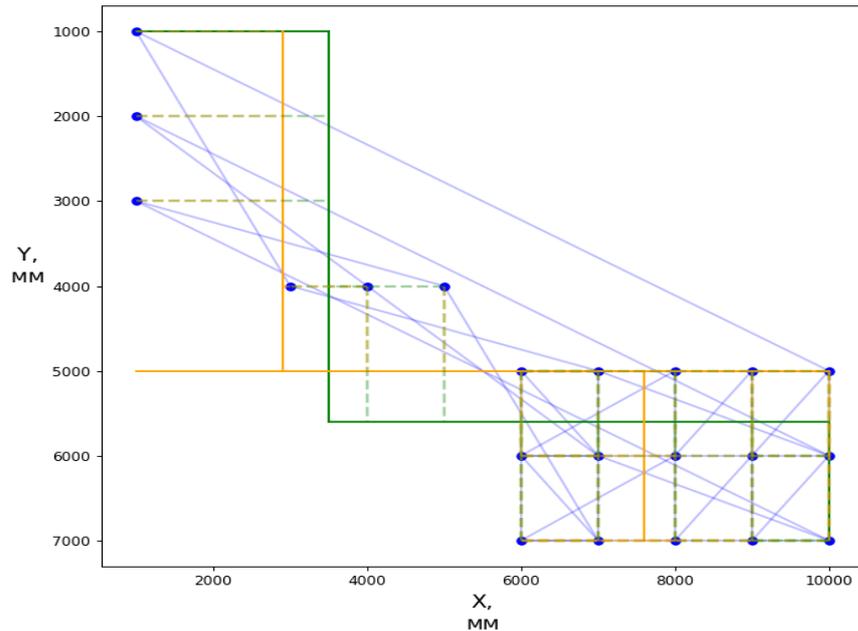


Рисунок 4.6 – Схема маршрута и ориентированных магистральных линий

Число популяций, необходимое для получения решения, а также темп роста приспособленности отличаются раз от раза в силу разной приспособленности и отличающейся степени хромосомного разнообразия среди начальной популяции. Конечно же, непосредственное влияние оказывают и параметры алгоритма: число элитных особей, шансы скрещивания и генетических мутаций и прочие.

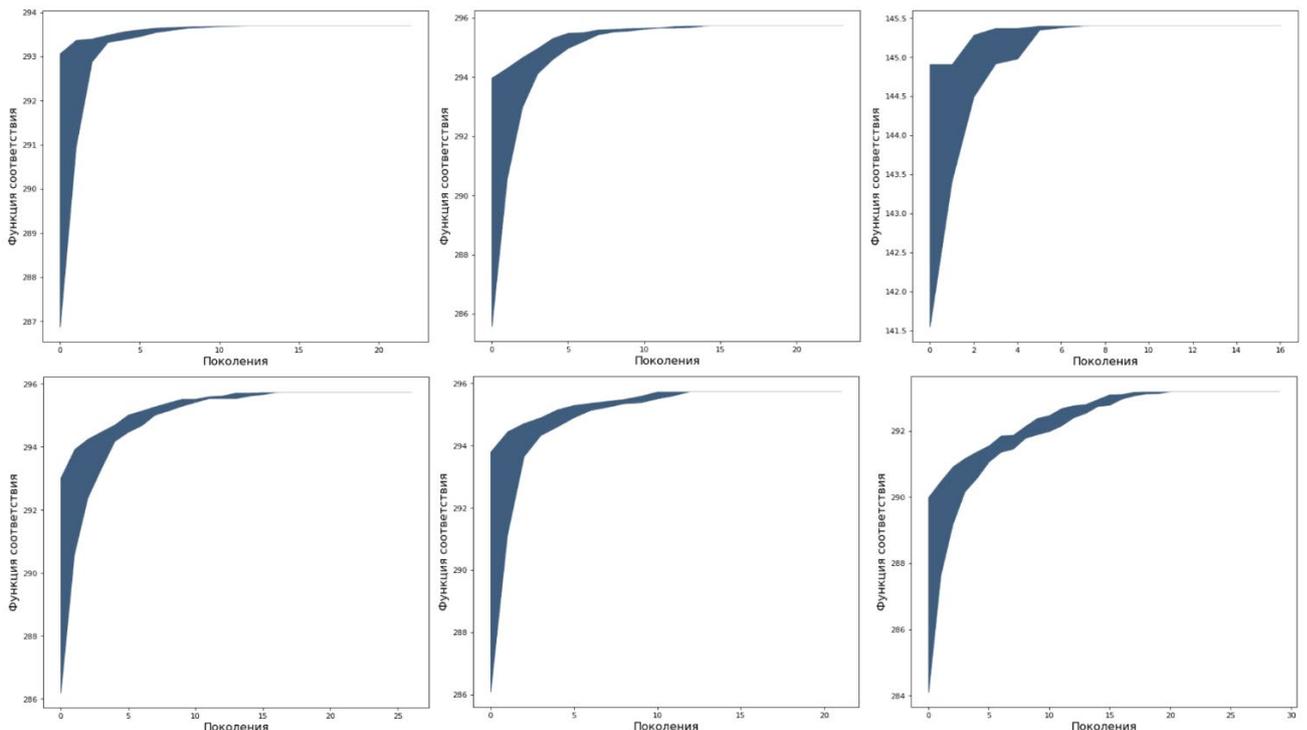


Рисунок 4.7 – Величина и разброс приспособленности особей популяции

Технологический участок предполагает наличие опасных зон, пересечение которых связано с риском возникновения нежелательных последствий: столкновение крана или груза с оснасткой или элементами других установок, избыточное радиоактивное облучение чувствительного электронного и электротехнического оборудования с ограниченным ресурсом, нежелательное загрязнение радиоактивными и химически агрессивными частицами сменных частей оборудования, расходных элементов и т.д. [106].

При моделировании опасных зон дополнительно аналогичным образом формируется скалярное поле значений «индекса безопасности» перемещения в диапазоне от нуля до единицы. В областях, соответствующих опасным зонам, индекс принимает значение 0, а при удалении от границ опасной зоны, индекс растет по нормальному закону. Размах функции подбирается в соответствии с допустимостью приближения маршрутных линий к границам опасных зон [106].

Перед поиском оценочной эффективности решения (16) дополнительно проводится операция умножения значений скалярных полей F_{xf} , F_{xb} и F_{yf} , F_{yb} на соответствующие значения поля «индекса безопасности», что приводит к обнулению значений, соответствующих опасным зонам (рисунок 4.8).

Введение опасных зон в ряде случаев приводит к смещению глобального максимума оценочной эффективности решения [106].

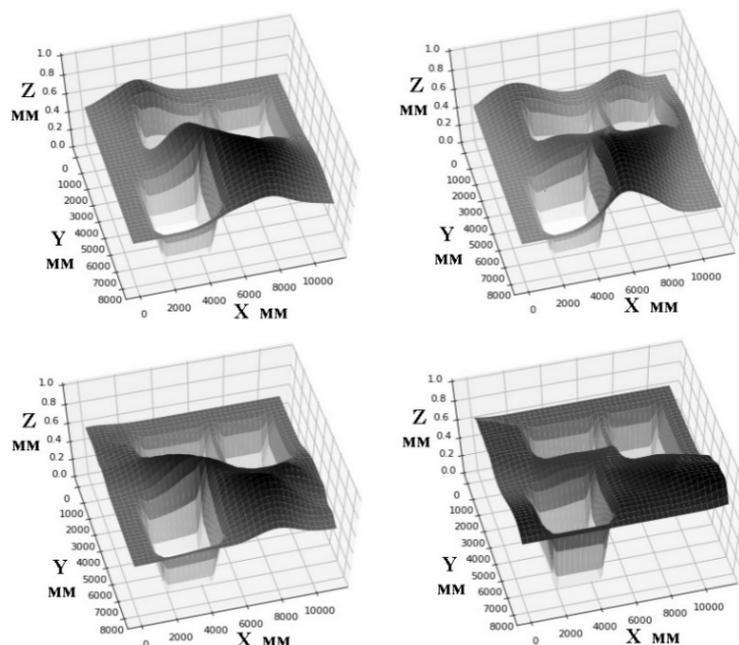


Рисунок 4.8 – Трехмерные графики F_{xf} , F_{xb} и F_{yf} , F_{yb} с учетом опасных зон

Блок-схема алгоритма формирования скалярных полей с опасными зонами приведена на рисунке Е.1 в приложении Е. В ходе поиска по поверхностям с измененными значениями, алгоритм находит новые решения (рисунок 4.9). Схема маршрута и технологические позиции обозначены синим цветом, предлагаемая схема ориентированных магистралей – сплошными зелеными и желтыми линиями в соответствии с направлением, остальные маршрутные линии обозначены пунктиром, опасные зоны выделены красным цветом.

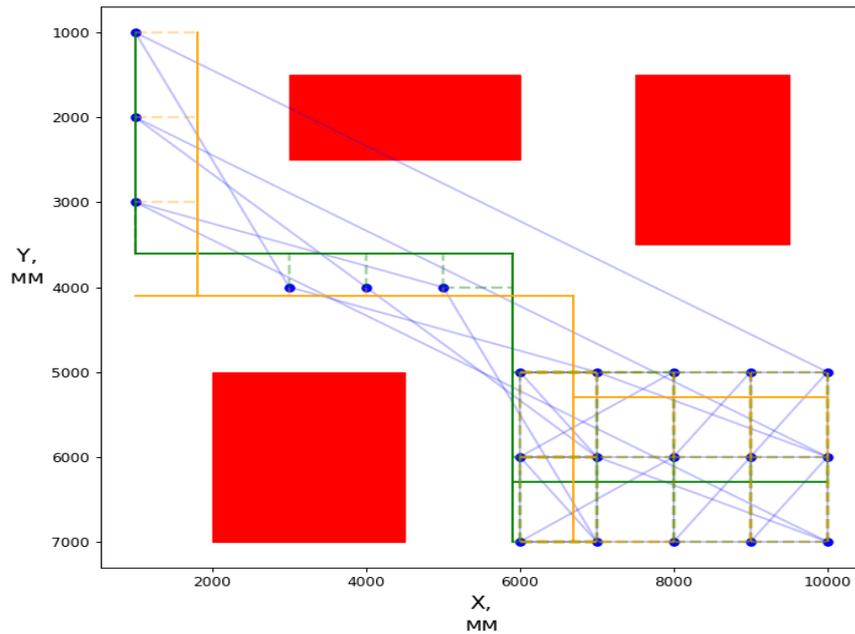


Рисунок 4.9 – Схема маршрута и ориентированных магистральных линий с учетом опасных зон

Экспериментально установлено, что, при наличии нескольких опасных зон не препятствующих перемещению грузов напрямую, форма и скорость роста функции приспособленности популяции изменяются незначительно и не требуют изменения параметров алгоритма. Ситуации, в которых конфигурация опасных зон УЭХД грубо препятствует перемещениям грузов мехатронным устройством-манипулятором, например, в значительной степени изолируя некоторые технологические позиции, не рассматриваются в связи с тем, что планировка должна быть произведена доброкачественно.

Блок-схема алгоритма генетического поиска приведена на рисунке Е.2 в приложении Е. Моделирование алгоритмов и математических моделей проводилось в программной среде Jupiter Lab [112] на языке Python 3 [113] с

использованием программных библиотек NumPy [114] и Matplotlib [115]. Исполняемые файлы компилируются из Python-кода с использованием вспомогательных библиотек, но могут быть получены путём компиляции кода C++/.Net [116, 117] с применением библиотек-аналогов, например, NumCpp или библиотеками-оболочками, такими как «Matplotlib for C++» [118].

Разработанный программный код для выполнения расчётов, связанных с формированием скалярных полей (Приложение Ж) и выполнением генетического поиска (Приложение И), в составе комплексного решения устанавливается на промышленный компьютер, являющийся составной частью распределенной системы управления. Общая схема распределённого программного обеспечения мехатронного устройства-манипулятора УЭХД приведена на рисунке 4.11.

Программная часть, выполняемая на промышленном ПК, инициирует ввод новых данных и выполнение алгоритма поиска, делится полученными векторами параметров с соответствующими ПЛК мехатронного устройства по протоколу промышленной сети, например, PROFINET, Modbus или CAN.» [119].

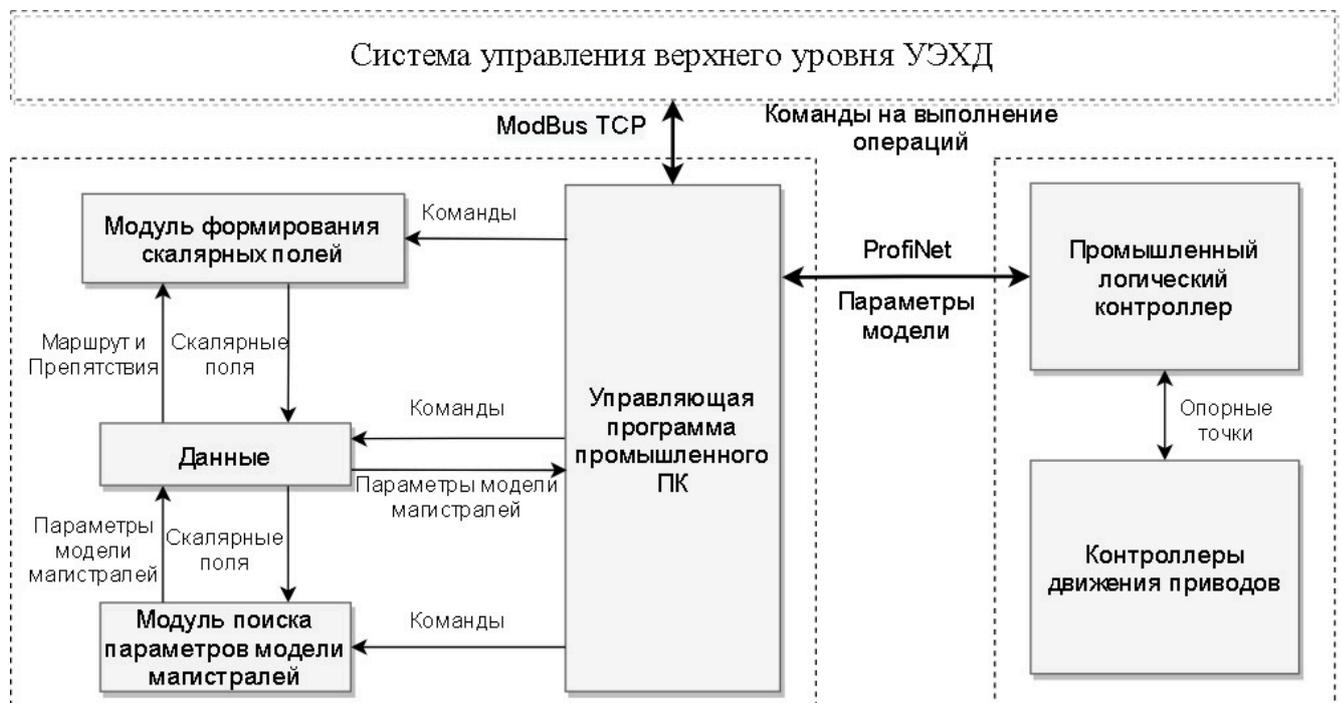


Рисунок 4.11 – Схема распределённой программной системы управления мехатронным устройством-манипулятором УЭХД

4.3 Модель нейронной карты для автоматизации формирования траектории рабочего органа портального манипулятора УРОБВ

Согласно реализованной схеме управления мехатронным устройством-манипулятором УРОБВ, представленной на рисунке 4.12, все функции стратегического и тактического планирования траектории, а также выбора режима движения рабочего органа берет на себя оператор. Перемещение манипулятора с учетом особенностей геометрии рабочей зоны, наполненности жидкостью и других особенностей системы является задачей, которую оператор не в силах решить эффективно в силу ряда причин, обусловленных человеческим фактором, особенностями интерактивного взаимодействия [120] и ограниченностью обзора.



Рисунок 4.12 – Схема информационного обмена устройства

Недостатки ручного управления были рассмотрены в главе 2. Особые условия эксплуатации ПМ, перечисленные в разделе. 2.3, не только прямо, но и косвенно, через вытекающие конструктивные ограничения, препятствуют решению задачи формирования безопасной и эффективной траектории с использованием достаточного количества датчиков касания, световых и ультразвуковых датчиков препятствий, применение которых является ключевым фактором для выбора в пользу ряда методов управления перемещением, включая управление оператором. Ручное управление существенно усложняется в условиях недостаточного обзора и подвергается намеренному ограничению для снижения влияния человеческого фактора, повышения надежности и безопасности процесса работы. Требования технического задания ограничивают возможности ручного управления одной группой приводов за раз, что соответствует перемещению

конечной точки манипулятора вдоль одной из осей, что приводит к дополнительному снижению эффективности ручного управления.

При выборе метода формирования траектории следует исходить из целесообразности представления рабочего пространства и препятствий с учетом доступных источников информации (данных). В силу перечисленных в главе 2.3 особенностей установки, в числе которых неудобное для комфортного обзора расположение места оператора относительно обследуемой механизмом поверхности (рисунок 4.13а), а также другие факторы, препятствующие оснащению манипулятора требуемым для полного удобства управления количеством камер и достаточным для полного и безопасного автоматического управления всеми этапами процесса количеством датчиков касания/дистанции и т.д., нет возможности получать актуальные данные о препятствиях по время перемещения установки. Кроме того, не существует подробной трёхмерной карты препятствий, находящихся у поверхности обшивки стенок бассейна выдержки с достаточной степенью достоверности и гарантированной точностью. Из перечисленных фактов следует, что при выборе метода формирования траектории следует руководствоваться преимущественно характером кинематической схемы ПМ (рисунок 4.13б).

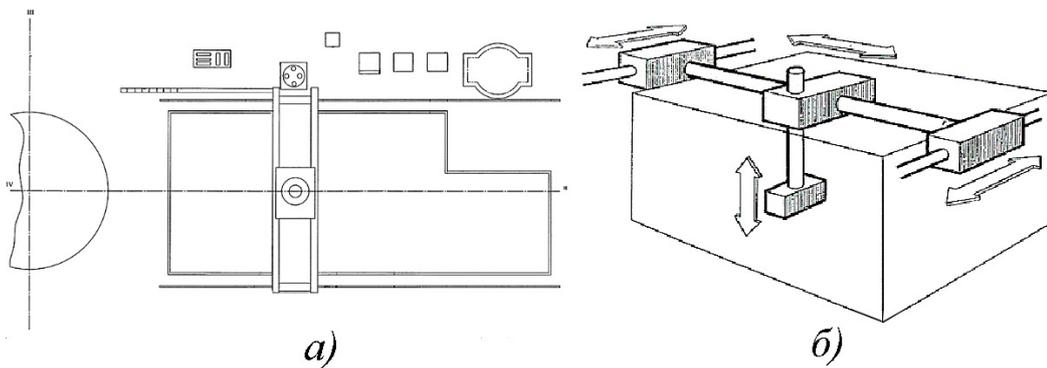


Рисунок 4.13 – Бассейн выдержки. Компонировка системы контроля и кинематическая схема промышленного манипулятора

Процесс получения траектории является многоэтапным процессом обработки данных о текущем положении РО, о форме и размерах рабочего пространства, о конечной точке. Для получения траектории и вспомогательного перемещения рабочего органа ПМ предлагается использовать структуру на базе

трех подсистем: нейронной сети, генератора траектории и генератора управляющего сигнала. Разработанная архитектура системы управления представлена на рисунке 4.14. В данной схеме задачу интерполяции траектории между опорными точками, следования траектории и позиционирования выполняет генератор управляющего сигнала. Решение перечисленных задач не освещено в представленном исследовании, а требуемыми для решения этих задач функциями и возможностями обладают программные и аппаратные компоненты приводных систем, поставляемых ведущими производителями, как упоминалось в главе 2.

Представленное решение для формирования траекторий и управления движением мехатронных устройств на базе подобной архитектуры не является полностью новым [101]. Но существуют различия между представленными решениями, обусловленные особенностями управляемых систем.

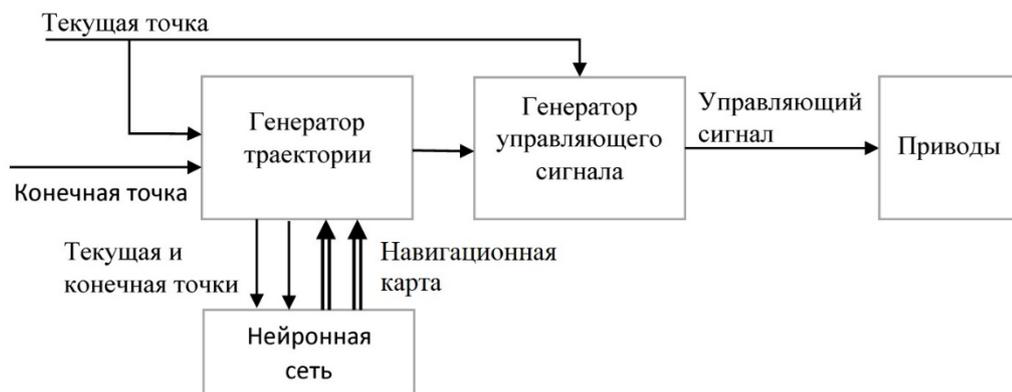


Рисунок 4.14 – Архитектура системы вспомогательного управления движением рабочего органа мехатронного устройства-манипулятора

С одной стороны, как объект управления, промышленный манипулятор проще: не требуется согласовывать траектории нескольких одновременно управляемых объектов, нет необходимости динамически корректировать траекторию в связи с изменчивыми препятствиями [121], а простой характер рабочей зоны способствует решению большинства задач достижения конечной точки без попадания в сложно определяемые локальные минимумы (рисунок 4.15).

С другой стороны, задача управления ПМ осложняется тем, что требуется формировать трехмерную траекторию, нет возможности получать информацию об окружающем пространстве в процессе перемещения РО, а также необходимость

работать на больших глубинах под водой требует формирования более сложного потенциального поля стоимости перехода для каждой дискретной конфигурации манипулятора.

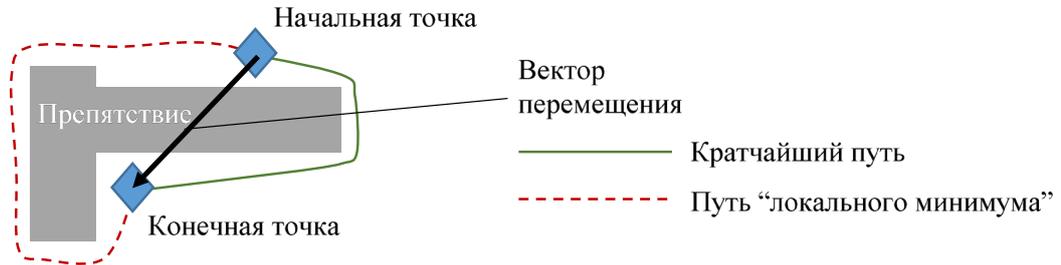


Рисунок 4.15 – Пример локального минимума при поиске траектории

Рабочее пространство манипулятора с прямоугольной пространственной кинематической схемой удобно представлять в виде отдельных трехмерных участков, применяя метод клеточной декомпозиции. С учетом того, что смена ориентации модулей рабочего органа производится вручную между этапами работы установки, каждая конфигурация ПМ соответствует единственной рабочей точке, что упрощает представление препятствий.

Кинематическая схема ПМ включает 3 управляемых поступательных сочленения и одно поворотное, неуправляемое. Проведём дискретизацию конфигурационного пространства манипулятора с разрешением N так, чтобы координата в каждом из сочленений j_1, j_2 и j_3 могла принимать дискретные значения из диапазона q_{xj} ($xj \in \{1, \dots, N\}$), где q_{1j} и q_{Nj} – нижнее и верхнее конструктивные ограничения линейного перемещения в сочленениях. Пусть все множество конфигураций РО, обусловленное набором модулей и доступных ориентаций, составляет O дискретных вариантов, тогда координата в сочленении j_4 может принимать значения q_{o4} ($o4 \in \{1, \dots, O\}$). Дискретная модель конфигурационного пространства манипулятора примет вид множества из $N^3 \cdot O$ векторов

$$DC = \{q_a | a = 1 \dots N^3 \cdot O\} \quad DC = \{q_a | a = 1 \dots N^3 \cdot O\}, \quad (18)$$

где $q_a = [q_{x1} \ q_{x2} \ q_{x3} \ q_{o4}]^T$ – дискретная конфигурация манипулятора $xj \in \{1, \dots, N\}$, где $j = 1, \dots, 3$; $o4 \in \{1, \dots, O\}$, a – одномерный индекс, принимающий значения $a = N^2 \cdot O \cdot (x_1 - 1) + N \cdot O \cdot (x_2 - 1) + O \cdot (x_3 - 1) + o_4$.

Учитывая то, что конфигурация сочленения j_4 (сменный модуль РО) изменяется вручную на специализированном участке, будем исходить из конфигурации манипулятора в сочленениях j_1, j_2 и j_3 . Разница линейных размеров БВ вдоль осей существенна (п. 1.1). Исходя из этого стоит отдельно выбирать степень дискретизации для каждого сочленения: N_1, N_2 и N_3 .

Система располагает ограниченной информацией о множестве препятствий $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$. Это мешает определить множество свободных от столкновения конфигураций $DC_f = \{q_a \in DC | M(q_a) \cap B = \emptyset\}$, где манипулятор в конфигурации q_a обозначен, как $M(q_a)$ [122]. Вместо этого воспользуемся множеством известных конфигураций, которые заведомо безопасны для достижения: DC_s . Это множество является известным подмножеством $DC_f \supseteq DC_s$. Не попадающие в множество DC_s конфигурации, включая B и $DC_f \cap DC_s$, принимаются за множество опасных конфигураций

$$DC_d = B \cup (DC_f \cap DC_s); \quad (19)$$

Множество безопасных конфигураций складывается из множеств конфигураций, соответствующих воздушной и водной областям свободного перемещения (DC_{fa}, DC_{fw}), а также тех конфигураций потенциально недоступной водной области, которые отнесены к безопасным в процессе наблюдения за действиями оператора при ручном управлении (DC_m)

$$DC_s = DC_{fa} \cup DC_{fw} \cup DC_m. \quad (20)$$

Ключевой стратегией при выборе траектории будет стратегия приведения манипулятора только в безопасные конфигурации, избегая остальные, потенциально опасные.

Для упрощения цифрового представления трехмерной карты препятствий, сокращения объема вычислений при формировании траектории и сглаживания поверхностей препятствий, применяется принцип, родственному принципу, применяемому в свёрточных нейронных сетях. Потенциально недоступная водная область представляется в виде множества соответствующих конфигураций ПМ. При этом, для сокращения числа вычислений при фильтрации ячеек, соседние

конфигурации изначально объединены в объемные группы т.к. изначально все конфигурации в рассматриваемой области считаются опасными. Размер объемных групп выбирается кратным линейному размеру минимальной, базовой группы. Пример размера для кубической группы конфигураций:

$$N_g = n_g^3; n_g = l^i, \quad (21)$$

где N_g – полный размер кубической группы, n_g – линейный размер кубической группы, l – линейный размер базовой группы, i – порядок группы. При $i = 0$, рассматривается одиночная конфигурация манипулятора.

Группа конфигураций является трехмерной сверткой соседних конфигураций, которая сохраняет информацию об опасности покрываемой ячейки пространства рабочей зоны. Опасность свертки определяется коэффициентом $d \in [0, \dots, 1]$. Группы, где $d = 0$ – полностью безопасны, а где $d = 1$ – полностью опасны. Если группа содержит только полностью опасные/безопасные группы более низкого порядка, то она также полностью опасна/безопасна.

Проверка безопасности ячейки пространства сводится к последовательному опросу соответствующих групп по убыванию порядка до получения достаточной или исчерпывающей информации.

Одного лишь представления о множествах безопасных и опасных конфигураций ПМ недостаточно для формирования траектории перемещения манипулятора. Необходимо ввести закономерности, описывающие характер связи между соседними конфигурациями ПМ. Опираясь на эти закономерности, СУ сможет судить об эффективности той или иной последовательности конфигураций с точки зрения скорейшего достижения конечной точки при учете параметров, которые могут быть предварительно внесены в модель карты.

Составление нейронной карты возможно на основе структур с различными топологиями связей между нейронами. На плоскости наиболее распространены шестигранная (рисунок 4.16а) или прямоугольная (рисунок 4.16б). Для трехмерной задачи удобно выбрать связь в форме параллелепипедов с диагоналями (рисунок 4.16в). Каждый нейрон имеет 6, 18 или 26 связей с ближайшими нейронами в зависимости от выбранного радиуса нейронной области [123], что связано с

различными величинами расстояний между узлами по линии ребра фигуры a , диагонали грани фигуры $a\sqrt{2}$ (далее – 2D-диагонали) и диагонали самой трехмерной фигуры $a\sqrt{3}$ (далее 3D-диагонали).

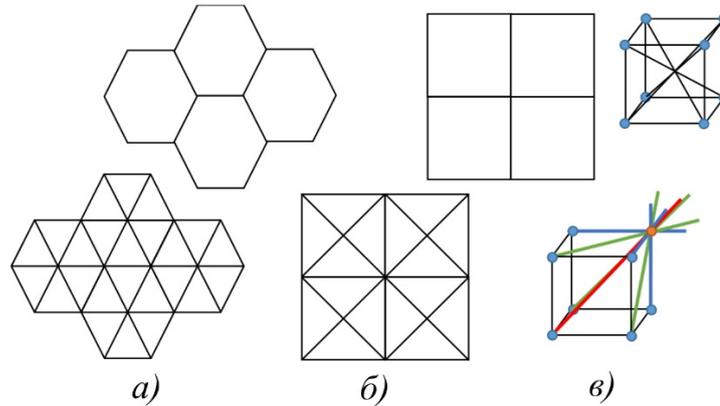


Рисунок 4.16 – Топологии связей между нейронами

В работе рассмотрены трехмерные модели с 26-ю (рисунок 4.17) и 6-ю связями каждой группы конфигураций со всеми соседними группами, что соответствует размерам нейронных областей $r = 1,75$ и $r = 1,0$ соответственно. Число нейронов в нейронной области сохраняется на интервале значений r и выбор конкретного значения из одного интервала не принципиален. Каждой группе конфигураций ставится в соответствие нейрон искусственной нейронной сети с 26 синапсами.

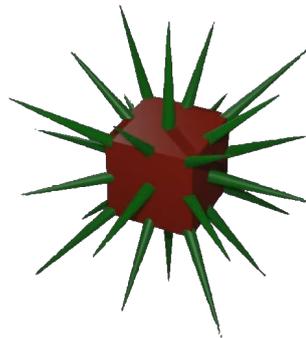


Рисунок 4.17 – Трехмерное представление кубической группы конфигураций ПМ с 26 связями, изображёнными зелёными конусами

Формирование траектории движения рабочего модуля манипулятора производится на основании активированной, взвешенной нейронной карты (навигационной карты) последовательным подъёмом из начальной ячейки в конечную ячейку по направлению максимального градиента. В зависимости от требований управления, в качестве начальной ячейки может выступать ячейка с

целевой конфигурацией, а в качестве конечной – ячейка с исходной конфигурацией. Алгоритм генерации опорных точек траектории представлен на рисунке 4.18 [124].

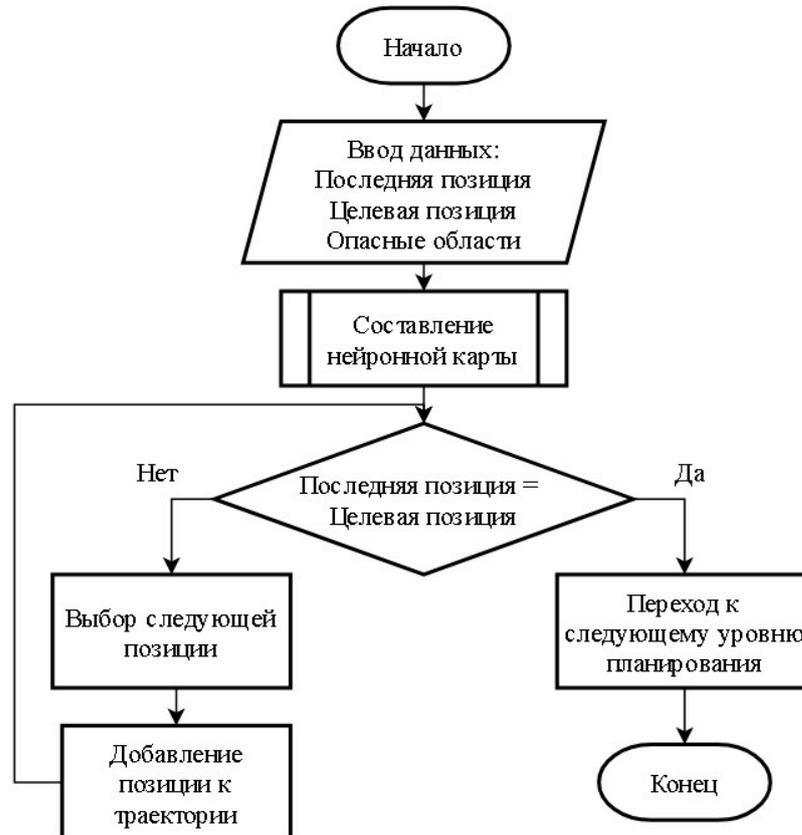


Рисунок 4.18 – Алгоритм генерации траектории

Для того, чтобы из карты препятствий получить карту навигации, необходимо провести активацию карты. Этот процесс предусматривает распространение возбуждения от нейрона с максимальным весовым коэффициентом к другим нейронам через синаптические связи.

Нейрон i характеризуется входным вектором Y , вектором весовых коэффициентов W_i , вектором смещения θ_i , которые формируют суммарный сетевой сигнал [125]

$$u_i = W_i \times Y + \theta_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} v_j + \theta_i. \quad (22)$$

Взвешенный суммарный сигнал обрабатывается нелинейной функцией активации Φ и формируется выходной сигнал нейрона Y_i . В качестве функции активации могут использоваться гиперболический тангенс, сигмоидальная и другие функции. При составлении нейронной карты также необходимо

определяться со следующими параметрами: порядок рассматриваемых групп конфигураций, размер рассматриваемой зоны, вид функции активации и топология связи соседних ячеек. При управлении мехатронными устройствами с применением метода нейронной карты распространены [7-12] топологии нейронной сети со схемами локальных связей, приведёнными на рисунках 4.20а и 4.20б для двухмерной карты. В работе предложена модель для трёх измерений. Визуализация расположения локально-связанных групп приведена на рисунках 4.20в и 4.20г.

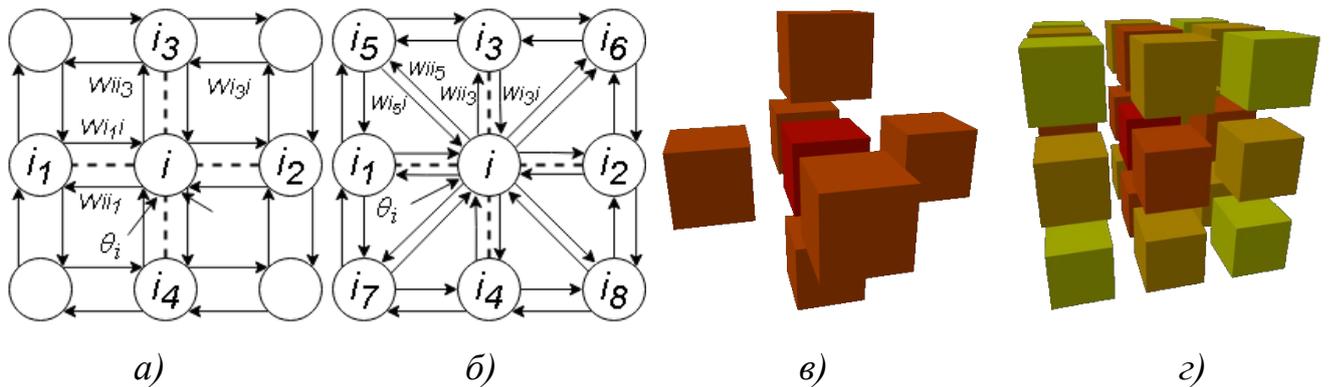


Рисунок 4.20 – Топология локально связанных групп

Порядок рассматриваемых групп конфигураций определит линейные размеры ячейки рабочей зоны, принимаемой за единичную позицию манипулятора, которой ставится в соответствие один нейрон. Этот параметр можно назвать разрешающей способностью нейронной карты. Чем ниже порядок, тем больше нейронов будет включать в себя нейронная карта, что повысит дискретизацию траектории и позволит качественнее отразить потенциально опасную зону БВ. Снижение порядка увеличивает число нейронов в нейронной карте кратно l^3 , где l – линейный размер базовой группы конфигураций.

Весовые коэффициенты связи i -го и j -го нейрона вычисляются по формуле

$$w_{ij} = \frac{1}{1+k_{ij}} \quad (23)$$

где k_{ij} – коэффициент, корректирующий стоимость перехода.

$$k_{ij} = \varepsilon(q_i, q_j) + Mod, \quad (24)$$

Mod – полный модификатор стоимости перемещения, $\varepsilon(q_i, q_j)$ – Евклидово расстояние между конфигурациями, соответствующими нейронам i и j . Он

получается сложением независимого осевого модификатора с произведением соответствующей координаты на зависимый осевой модификатор. Он получается сложением независимого осевого модификатора с произведением соответствующей координаты на зависимый осевой модификатор. Величины модификаторов хранятся в матрице M :

$$M = \begin{pmatrix} m_{x+} & m_{x-} & m_{y+} & m_{y-} & m_{z+} & m_{z-} \\ m_{x(x)+} & m_{x(x)-} & m_{x(y)+} & m_{x(y)-} & m_{x(z)+} & m_{x(z)-} \\ m_{y(x)+} & m_{y(x)-} & m_{y(y)+} & m_{y(y)-} & m_{y(z)+} & m_{y(z)-} \\ m_{z(x)+} & m_{z(x)-} & m_{z(y)+} & m_{z(y)-} & m_{z(z)+} & m_{z(z)-} \end{pmatrix}, \quad (25)$$

где буква в индексе модификатора указывает на ось, стоимость движения вдоль которой модификатор изменяет; знак указывает на направление действия модификатора; буква в скобках у зависимых модификаторов указывает на ось координат от значения которой зависит итоговая величина модификатора.

В качестве функции активации в модели с 26-ю синапсами использовалась линейная функция с насыщением:

$$\Phi(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \leq 0 \\ u_i & 0 < u_i < 1, \\ 1 & u_i \geq 1 \end{cases}, \quad (19)$$

где u_i – взвешенный суммарный сигнал входных синапсов i – го нейрона.

Суммарный сетевой сигнал u_i учитывает также и вектор смещения i -го нейрона θ_i . Значение смещения определяется входными данными нейронной карты:

$$\theta_i = \begin{cases} +\infty & i - \text{ый нейрон соответствует целевой группе конфигураций} \\ -\infty & i - \text{ый нейрон соответствует группе конфигураций с } d > d_{max}, \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (26)$$

где d и d_{max} – коэффициент опасности группы конфигураций, соответствующих i -му нейрону и максимально допустимый коэффициент соответственно.

Благодаря работе вектора смещения, целевой нейрон всегда будет максимально активирован, а нейроны, соответствующие потенциально опасным группам конфигураций манипулятора всегда деактивированы. В других случаях возможно задать величину смещения в виде функции от параметра d , что позволит создавать не только доступные и недоступные зоны, но и нежелательные зоны,

пересечение которых будет возможно, но при отсутствии других подходящих путей. Целевой нейрон может соответствовать как группе конфигураций конечной точки траектории, так и группе конфигураций текущего положения РО. В последнем случае становится возможным формирование траектории до любой достижимой точки рабочего пространства манипулятора за счёт единичного проведения активации нейронов карты. Траектория при этом формируется путём последовательного перебора весовых коэффициентов с движением в направлении максимального градиента из искусственного нейрона соответствующего группе конфигураций с конфигурацией целевой точки в искусственный нейрон, соответствующий группе конфигураций, содержащей начальную (текущую) конфигурацию [50].

4.4 Метод формирования опорных точек траектории движения рабочего органа мехатронного манипулятора УРОБ на основе нейронной карты

Основной подготовкой нейронной карты к формированию траектории является проведение процесса активации карты. В зависимости от задач, возможно несколько подходов к активации: присвоение максимального весового коэффициента (смещения) нейрону, соответствующему конечной целевой группе конфигураций или же текущей, начальной группе конфигураций.

Первый подход позволяет путем однократной активации нейронной карты получить навигационную карту достижения желаемого положения для нескольких однотипных объектов, находящихся в различных конфигурациях. Также этот подход позволяет однократно составить карты для навигации в ключевые, часто достигаемые положения. Этот подход особенно применим для мобильных систем в условиях, когда точная информация о текущем положении доступна сессионно, либо действиями внешних сил объект управления может быть выведен с выбранной траектории несколько раз за среднее время одного маршрута. Также первый подход предпочтителен при внешнем управлении. Например, мобильный

робот с упрощенной системой управления в условиях перебоев со связью, получив навигационную карту единойжды, будет в состоянии самостоятельно скорректировать маршрут и проложить новую траекторию до конечной точки даже если окажется сильно снесен течением.

Второй подход позволяет проложить траекторию в любую достижимую конфигурацию активированной нейронной карты из заданной текущей конфигурации. Этот подход применим при отсутствии внешних сил, способных помешать соблюдению траектории, в условиях, когда следующая целевая конфигурация заранее неизвестна, а время подготовки к навигации после получения команды намного существеннее сказывается на эффективности управления, чем время, доступное для подготовки до получения команды. Например, в рассматриваемом случае следующая целевая конфигурация манипулятора напрямую зависит от результатов работы модуля в текущем положении. При этом, во время работы пневматического рабочего модуля, конфигурация основной части манипулятора не изменяется, что даёт возможность СУ для планирования будущих перемещений и составления новой навигационной карты заблаговременно.

После определения нейрона с максимальным весовым коэффициентом происходит распространение возбуждения через синаптические связи нейронов и присвоение каждому нейрону соответствующего весового коэффициента. Предложенный алгоритм активации нейронной карты и алгоритм активации отдельного нейрона представлены на рисунках 4.20а и 4.20б соответственно.

Карта навигации составляется путем определения для каждого нейрона направления на соседний нейрон с максимальным весовым коэффициентом. Траектория формируется движением из выбранного нейрона по направлению скорейшего роста весового коэффициента к нейрону с максимальным весовым коэффициентом.

Вспомогательное управление промышленным манипулятором представляет из себя комплекс последовательно применяемых мер для снижения влияния негативных факторов ручного управления. Комплекс мер включает в себя:

формирование цифрового представления рабочего пространства с препятствиями; по необходимости, внесение правок с учётом текущей конфигурации, габаритов и ориентации модуля, при обслуживании рабочего органа вручную; упрощение цифрового представления путем сворачивания отдельных конфигураций манипулятора в группы, объединенные общими качествами; формирование и активация нейронной карты; формирование траектории движения манипулятора; сглаживания траектории движения манипулятора за счёт средств и функций программно-аппаратного обеспечения контроллеров приводов; формирование управляющих сигналов для двигателей манипулятора. Схема работы распределённого программного обеспечения вспомогательного управления УРОБВ представлена на рисунке 4.21.

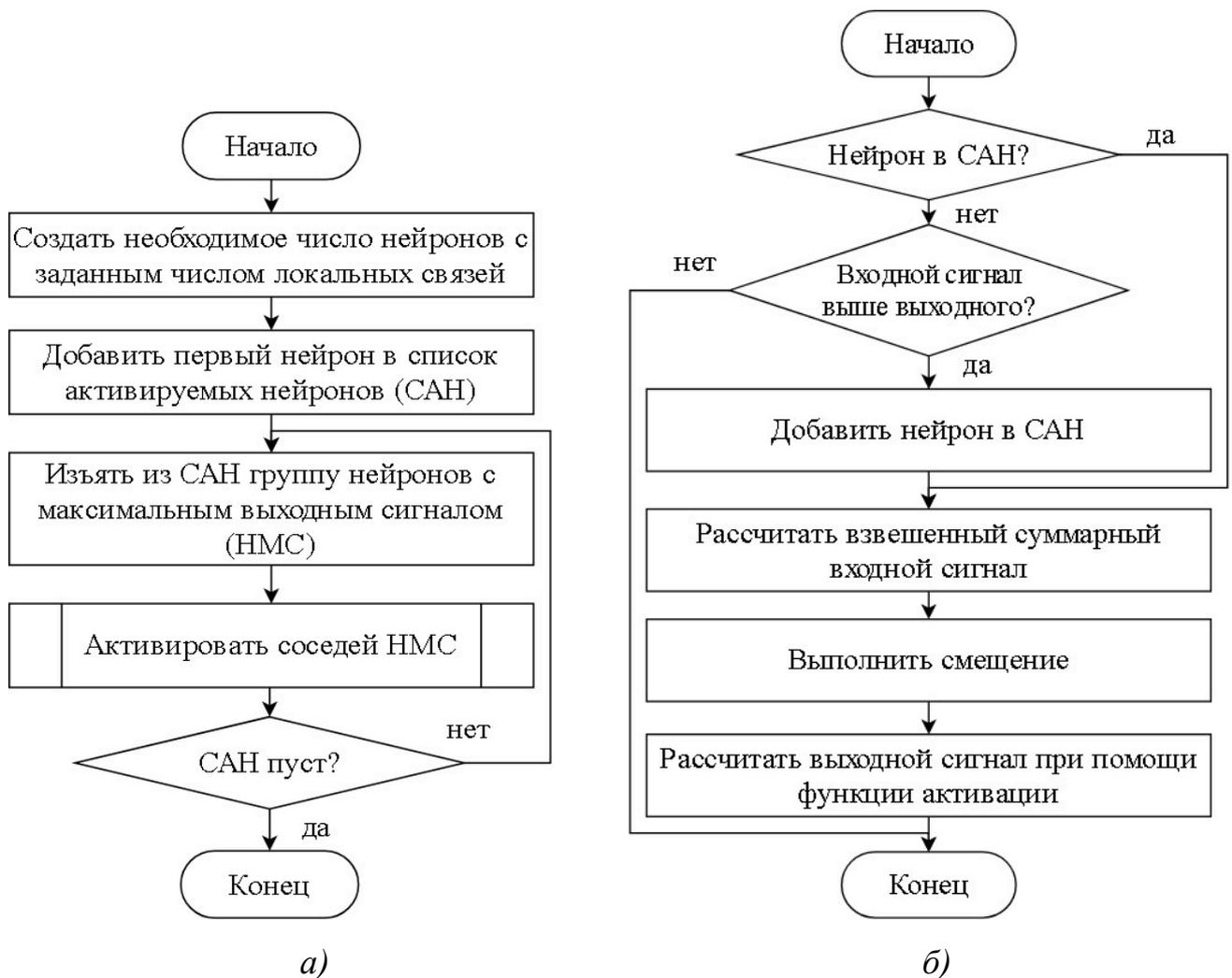


Рисунок 4.20 – Алгоритм активации нейронной карты

Первая упрощенная модель на основе нейронной карты была реализована в табличном процессоре Microsoft Excel для двумерного случая. На рисунке 4.22а

изображен первоначальный вид карты до активации, где опасным конфигурациям (препятствиям) присвоен весовой коэффициент 0, а текущему положению соответствует клетка с коэффициентом 1.

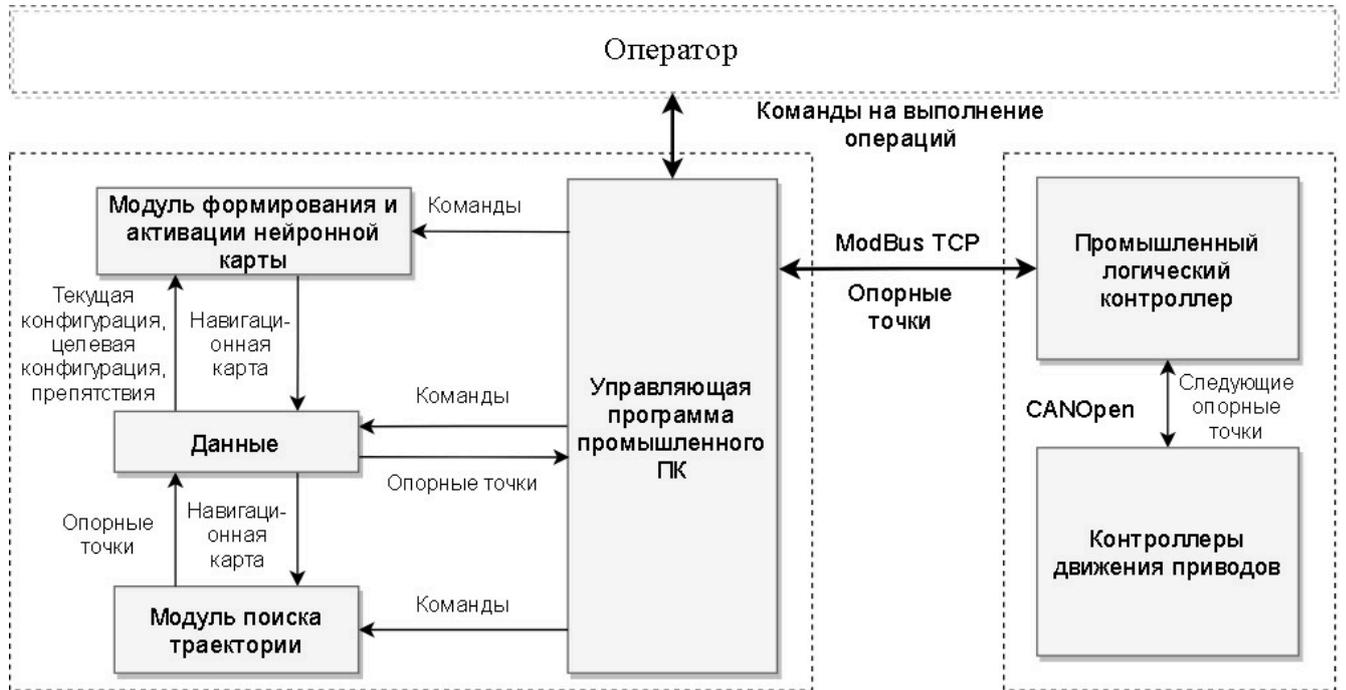


Рисунок 4.21 – Схема распределённой программной системы вспомогательного управления УРОБВ

На рисунке 4.22б изображена активированная карта с выходными сигналами, убывающими по мере трудности достижения конкретной конфигурации при движении из выбранной с максимальным коэффициентом.

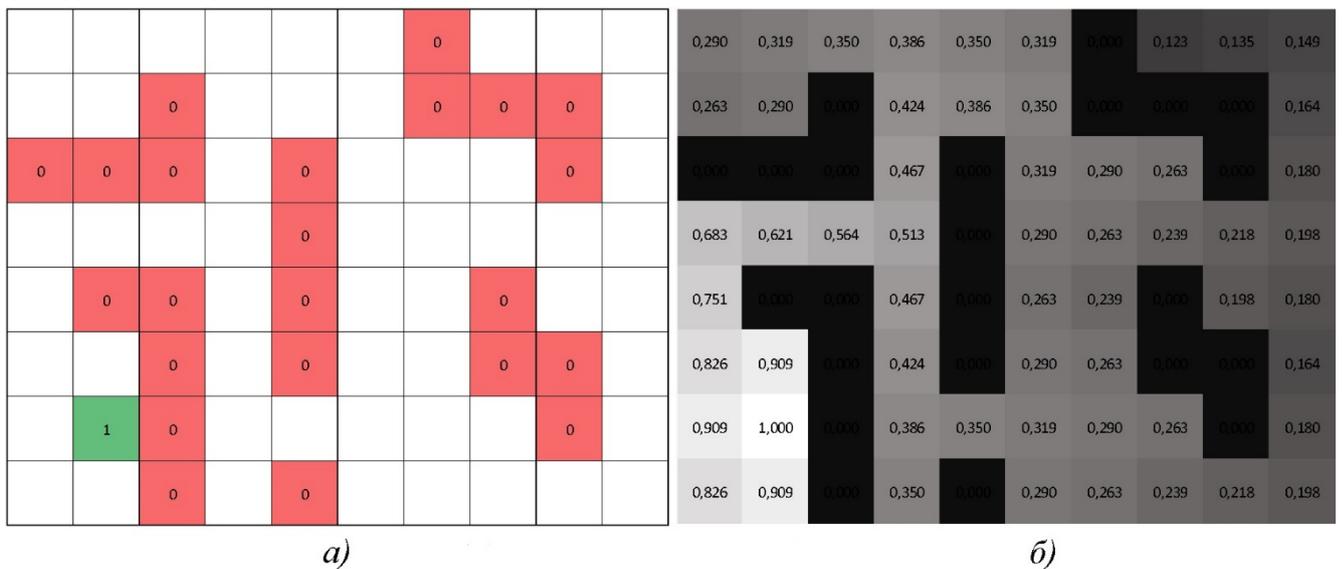


Рисунок 4.22 – 2D нейронная карта препятствий с значениями сигналов

Для наглядности использована цветовая индикация с переходом оттенка от белого цвета к черному по мере снижения выходного сигнала. Моделирование показало, что навигация с помощью нейронной карты позволяет найти кратчайшую траекторию в рамках выбранной дискретизации метода клеточной декомпозиции.

В целях визуализации результатов моделирования трехмерной нейронной карты применяются возможности фреймворка Qt и встроенных методов визуализации. Используя нейрон для трехмерной модели с 26 связями, описанный в главе 4.4 (рисунок 4.17), сформировано изотропное цифровое представление рабочего пространства по габаритам и форме соответствующего БВ. Для этого использованы два класса. Класс MapNeuron реализует функции нейрона. Заголовочный файл класса приведен ниже.

```
#ifndef MAPNEURON_H
#define MAPNEURON_H

#include <QMap>

class MapNeuron {
    const int xcoord;    //координата x
    const int ycoord;    //координата y
    const int zcoord;    //координата z
    const int xyzcode;   //уникальный код нейрона
    QMap<int, MapNeuron *> inputs;    //набор входных синапсов
    QMap<int, MapNeuron *> outputs;   //набор выходных синапсов
    QMap<int, double> nbrWghts;    //возбуждение соседних нейронов
    double weight=0.0;    //возбуждение нейрона
    bool staticNeuron=false;    //фиксирован ли нейрон
    bool outputsDisabled=false;    //проходим ли нейрон
public:
    static double dirMods[4][6];    //матрица коэффициентов стоимости
```

```

static int initial_weight;    //максимум возбуждения
static int initial_coords[3]; //целевые координаты
MapNeuron(int x, int y, int z, int code); //конструктор
~MapNeuron();                //деструктор
void link(int direction, MapNeuron *newout); //добавление синапсов
int getCode(); //возвращает уникальный код нейрона
QMap<int, MapNeuron *> *getOuts(); //возвращает набор входных синапсов
QMap<int, MapNeuron *> *getInputs(); //возвращает набор выходных синапсов
void setIn(int inpt_code); //устанавливает синапс входным
void setStaticWeight(double wght); //фиксирует возбуждение нейрона
void disableOuts(); //делает нейрон непроходимым
bool checkOutsDisabled(); //возвращает проходимость нейрона
void procWeight(); //рассчитывает возбуждение нейрона
double getWeight(); //возвращает возбуждение нейрона
void pulse(int nbr_code, double nbr_wght); //связывает синапсы с соседями
};
#endif // MAPNEURON_H

```

Класс NeuroMap реализует функции карты на основе нейронов. Заголовочный файл класса приведён ниже.

```

#ifndef NEUROMAP_H
#define NEUROMAP_H

#include <QObject>
#include <QVector>
#include <QMap>
#include "mapneuron.h"

```

```

class NeuroMap : public QObject
{

```

```

Q_ОБЪЕКТ
//Размеры карты
const int xsize;
const int ysize;
const int zsize;

QVector<MapNeuron *> neurons;    //нейроны
QVector<MapNeuron *> path;    //опорные точки траектории
int init_neuron_code;    //код целевого нейрона

public:
    explicit NeuroMap(int x, int y, int z, double dirMods[4][6]);    //конструктор
    ~NeuroMap();    //деструктор

    void init();    //создание экземпляров нейронов, связывание синапсов
    void procWaves(int x, int y, int z);    //выполнение активации карты
    void printToFile(QString file_name);    //сохранение навигационной карты
    //добавление препятствия
    void addObstacle(int x_strt, int y_strt, int z_strt, int x_lng, int y_lng, int z_lng);
    void findPath(int x, int y, int z);    //поиск траектории
//технические функции
signals:
    void progBarSetRange(int min, int max);
    void progBarSetValue(int min);
    void logBoxAppendTxt(const QString &txt);
};
#endif // NEUROMAP_H

```

На рисунках 4.23а, 4.23б и 4.23в изображены несколько эквискалярных областей активированной карты с различными диапазонами весов.

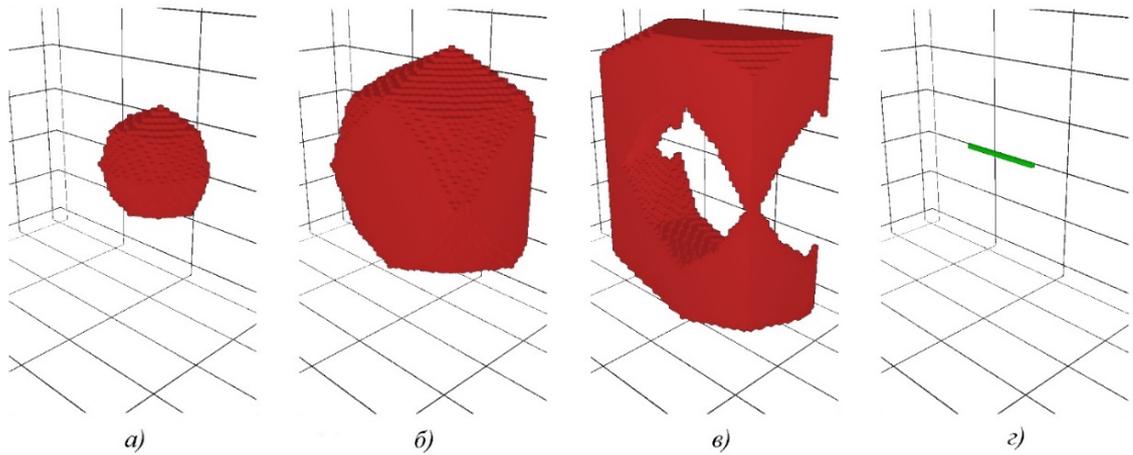


Рисунок 4.23 – Трехмерное моделирование

Нейроны эквискалярных поверхностей имеют примерно одинаковые весовые коэффициенты и соответствуют конфигурациям манипулятора, достижение которых требует примерно схожих затрат, исходя из вида и параметров выбранной функции активации. Трехмерные геометрические формы эквискалярных областей усекаются границами трехмерной карты. На рисунке 4.23г изображена полученная траектория безопасного перемещения между двумя точками на равной глубине, одна из которых соответствует центру активации карты.

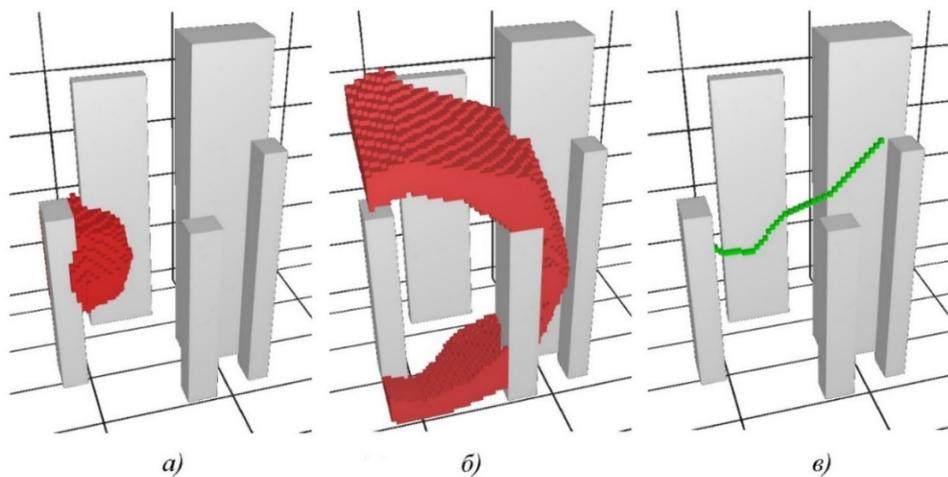


Рисунок 4.24 – Трехмерное моделирование с характерными для БВ препятствиями

На рисунках 4.24а и 4.24б изображены несколько эквискалярных областей активированной карты с различными диапазонами весов. На рисунке 4.24в

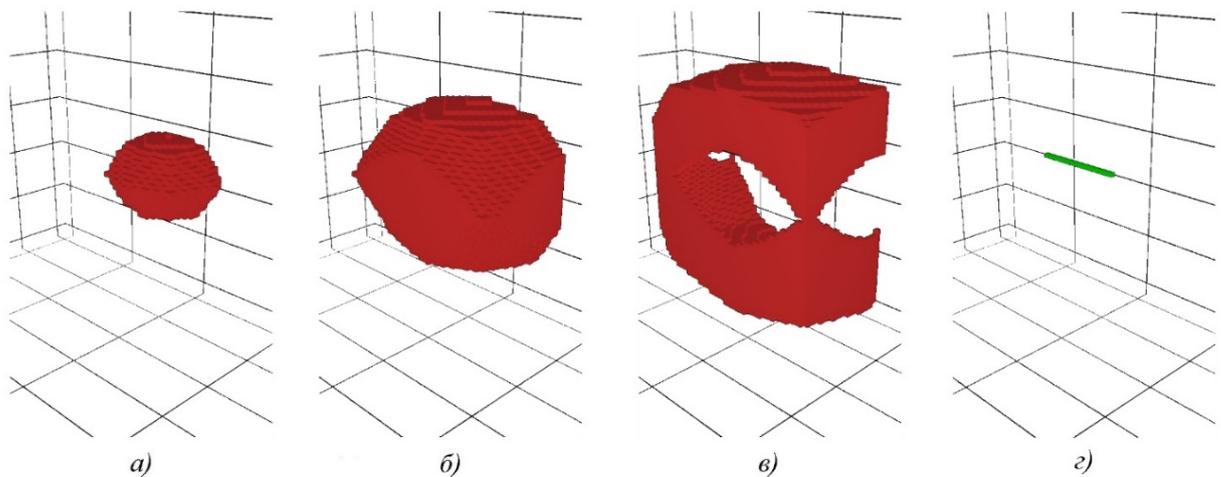
изображена полученная траектория безопасного перемещения между двумя точками на разной глубине, одна из которых соответствует центру активации карты. Концы траектории не находятся в зоне прямой видимости друг относительно друга за счет добавления препятствий, что создаёт необходимость формирования безопасной с точки зрения столкновения с препятствиями обходной траектории.

Однако, на практике представление конфигураций и их групп в форме искусственных нейронов, связанных изотропными симметричными синаптическими связями, часто является слишком грубым упрощением. Применительно к поиску траекторий для плоского случая, например, для мобильного робота, перемещающегося по относительно ровной поверхности с изотропными свойствами, или для летающего на заданной постоянной и безопасной высоте беспилотного устройства, такое упрощение допустимо и нередко используется. Однако, добавление третьей координаты, как правило, сопряжено с необходимостью учитывать влияние гравитационной силы.

Штанга манипулятора состоит из сегментов, раскладывающихся по мере опускания штанги. Чем выше штанга поднимается, тем больше сегментов поднимают тросы и тем «дороже» обходится поднятие. В зависимости от того требует ли участок траектории подъёма или же спуска модуля устройства, закреплённого на конце штанги – будет соответствующим образом изменяться эквивалентная «цена» перемещения по рассматриваемому участку траектории. Применительно к УРОБВ можно отметить, что стоимость вертикального перемещения рабочего модуля имеет зависимость, заданную кусочной функцией, и изменяется порогами по мере выдвижения/подъёма штанги. Это в первую очередь связано с тем, что штанга состоит из крупных металлических сегментов, вес которых с подъёмных тросов по мере опускания штанги переносится на конструкцию тележки и рамы механизма. На рисунках 4.25а, 4.25б и 4.25в изображены эквискалярные области активированной карты с различными диапазонами весов при учёте функции влияния массы подвижных сегментов штанги на стоимость вертикальных перемещений. Поверхность эквискалярных

областей ожидаемо деформировалась в виду возросшей стоимости достижения конфигураций, соответствующих более высокому положению рабочего модуля. На рисунках 4.25г видно, что полученная траектория безопасного перемещения между двумя точками на равной глубине никак не изменилась.

Но помимо параметра, зависящего от вертикальной координаты, в рассматриваемой системе присутствуют и другие [126]. Например, с учетом глубины погружения штанги, достигающей 20 метров ниже уровня жидкости, и большой ширины секции, достигающей 1,5 метров, встаёт вопрос снижения парусности штанги и действующей на подвижную конструкцию силы вязкого трения при горизонтальных перемещениях опорной рамы и тележки. Чем сильнее погружена в жидкость штанга, тем выше силы вязкого трения и тем большие нагрузки испытывает конструкция при осуществлении горизонтальных перемещений.



Повышенные нагрузки приводят к увеличению затрачиваемой электроэнергии, ускорению износа механических частей конструкции. Снижение негативных факторов влияния вязкого трения жидкости по мере поднятия штанги обусловлено и снижением погруженной в жидкость активной площади и сокращением плеча приведённой поперечной силы сопротивления жидкости, действующей на штангу. На рисунках 4.26а, 4.26б и 4.26в приведены изображения эквискалярных областей активированной карты с учётом функции влияния массы подвижных сегментов штанги на стоимость вертикальных перемещений, а также

зависимости величины силы вязкого трения от площади погруженных сегментов штанги с учетом направления перемещения. Сегменты штанги имеют сечение вытянутой прямоугольной формы, что приводит к различиям в парусности штанги при перемещении рабочего модуля в различных направлениях. Форма поверхности эквискалярных областей изменилась. На рисунке 4.26в видно, что самым простым перемещением с учетом введённых зависимых от координат (координатозависимых) параметров является строго вертикальное погружение рабочего модуля, что полностью коррелирует с физическим смыслом введенных поправок и выражено максимальным удалением самой «глубокой» точки эквискалярной поверхности от центра активации. При этом стоимость горизонтального перемещения за счёт увеличения силы вязкого трения штанги увеличивается по мере погружения, что выражается в сужении сечения поверхности по мере роста глубины. При этом сечение поверхности эквискалярной области является эллиптическим, что связано с неоднородностью сил вязкого трения относительно направления перемещения, вызванной формой сечения сегментов штанги. На рисунке 4.26г видно, что полученная траектория безопасного перемещения между двумя точками на равной глубине приобрела форму кривой, изогнутой в сторону поверхности бассейна.

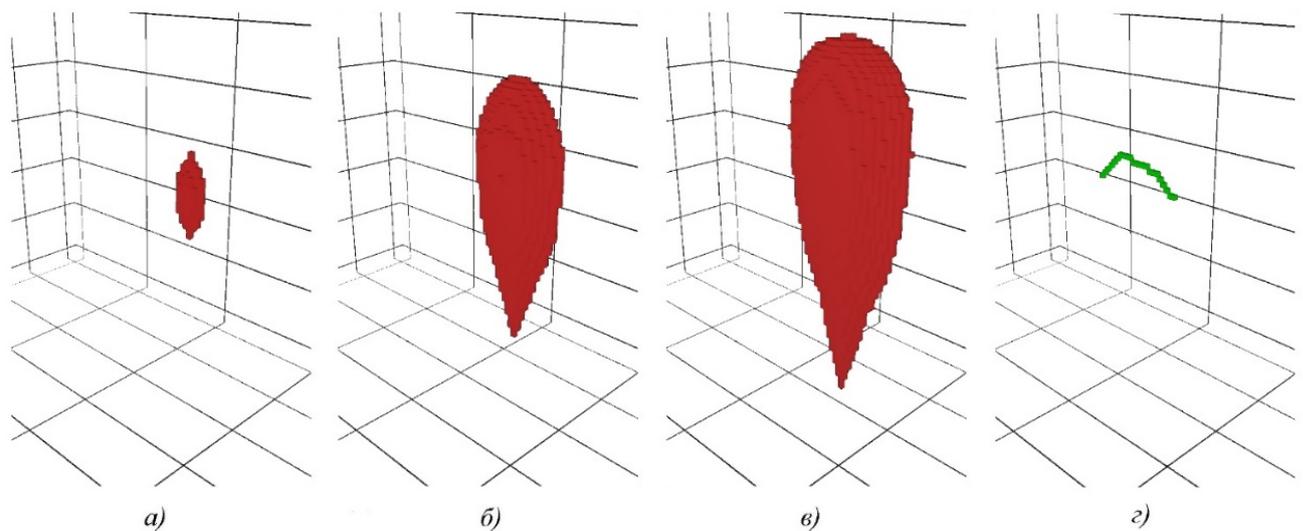


Рисунок 4.26 – Трёхмерное моделирование с учетом веса сегментов штанги

Это явление вызвано введением координатозависимых поправок стоимости перехода (веса) синаптических связей. Изогнутая траектория позволяет найти

компромисс между затратами на поднятие штанги и преодолением сил вязкого трения при выполнении требуемого перемещения. Объединив введённые поправки для синаптических связей нейронной карты с характерными для БВ препятствиями в рабочей зоне манипулятора УРОБВ, можно получить безопасную траекторию перемещения рабочего модуля с учётом снижения негативных факторов учтённых особенностей системы. На рисунках 4.27а, 4.27б, 4.27в, 4.27г приведены изображения эквискалярных областей активированной карты. Рисунок 4.27д содержит изображение траектории, огибающей препятствия и проложенной с учетом изменения массы сегментов штанги, а также сил вязкого трения погруженной части штанги.

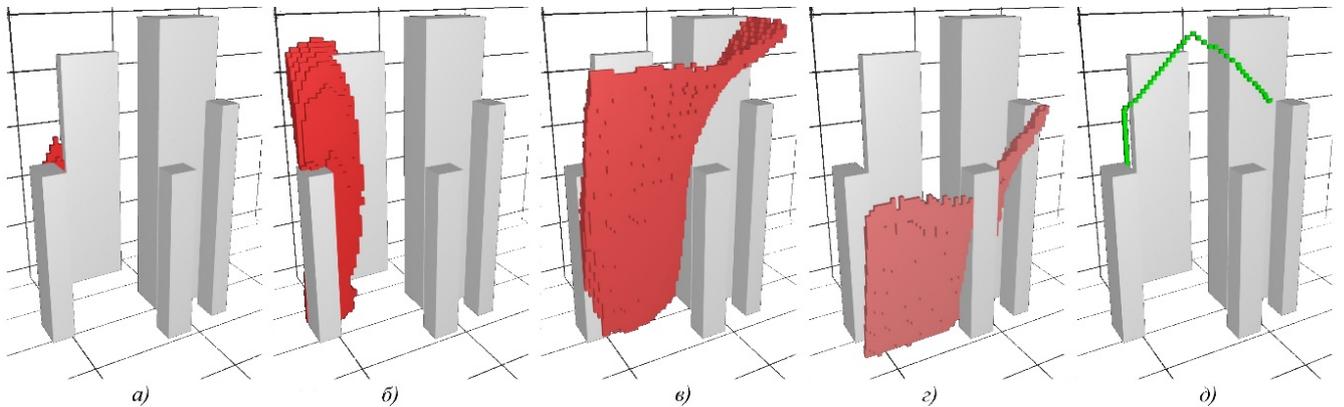


Рисунок 4.27 – Трехмерное моделирование с параметрами

Для наглядности влияния коэффициента вязкого трения, соответствующий параметр намеренно завышен, чтобы отличия траектории от представленной на рисунке 4.24в были более показательными. Причиной отклонения предложенной моделью траектории от кратчайшей является склонность модели минимизировать горизонтальные перемещения на глубине, вызванная введением неоднородного осевого модификатора веса синаптических связей.

На рисунках 4.28а-4.28в приведены траектории перемещения в частично загруженном бассейне для случаев поиска кратчайшего пути, пути с учётом неоднородности и пути с учётом завышенных коэффициентов неоднородности соответственно.

Зелёным цветом обозначены области, содержащие узловые точки траектории, серым цветом обозначены препятствия: стеллажи с блоками ОЯТ и

закрытый отсек бассейна. Синяя линия позволяет оценить нелинейное отклонение участка траектории (рисунок 4.28б) от кратчайшей траектории (рисунок 4.28а) на открытом участке пути.

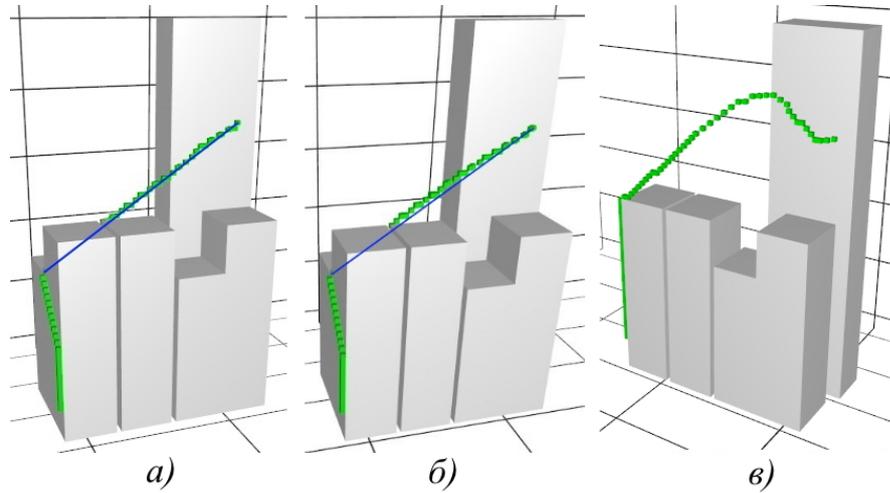


Рисунок 4.28 – Результаты моделирования неоднородной карты

В целях снижения вычислительных затрат и повышения безопасности диагональных перемещений на границе препятствий, работа алгоритма была исправлена под более простую схему связей нейрона: с 6-ю синапсами. Число связей снизилось более чем в четыре раза, что позволяет существенно упростить вычислительную сложность активации карты и размер буфера памяти, используемый при активации карты. Однако, снижение числа связей нарушает свойства метрики трёхмерного пространства рассматриваемой карты. Рассмотрим обобщённую метрику дистанции Минковского:

$$d(x, y) = \left(\sum_{k=1}^n |x_k - y_k|^p \right)^{1/p}, \quad (27)$$

где p – параметр, $d(x, y)$ – метрика при $p \geq 1$.

В силу того, что распространение волнового фронта активации карты производится во всех направлениях изотропно при равенстве координатозависимых параметров стоимости перехода, то диагональные ячейки для 2D-диагоналей и 3D-диагоналей оказываются с весами, аналогичными ячейкам, удалённым от исходной на двойное и тройное расстояние соответственно, чем ячейки, получаемые одиночным недиагональным перемещением вдоль одной из осей. Подобный подход к измерению дистанции называется Манхэттенским или

«такси геометрией» и соответствует значению параметра $p = 1$ в формуле Минковского. Однако, согласно схеме, приведённой на рисунке 4.17, где используется Евклидова метрика дистанции, соответствующая значению параметра $p = 2$ формулы Минковского, эти расстояния отличаются в $\sqrt{2}$ и $\sqrt{3}$ раз соответственно. Это приводит к тому, что в отличие от пространства с Евклидовой метрикой, где в каждой точке градиент строго направлен в центральную точку, возникает неоднородность направления градиента, что сказывается на форме траектории. В описанном случае траектория демонстрирует склонность к участкам, проходящим параллельно одной из координатных осей. Это увеличивает протяженность траектории и нивелирует часть достоинств автоматического управления [127]. На рисунках 4.29а, 4.29б, 4.29в изображены эквискалярные области весов нейронов карты при использовании нейронов с 6-ю связями без корректирующих поправок. На рисунке 4.29г приведена полученная траектория, форма которой соответствует вышеописанным ожиданиям: преобладают перемещения вдоль основных осей, карта не учитывает экономию перемещения в направлениях под углом к основным осям.

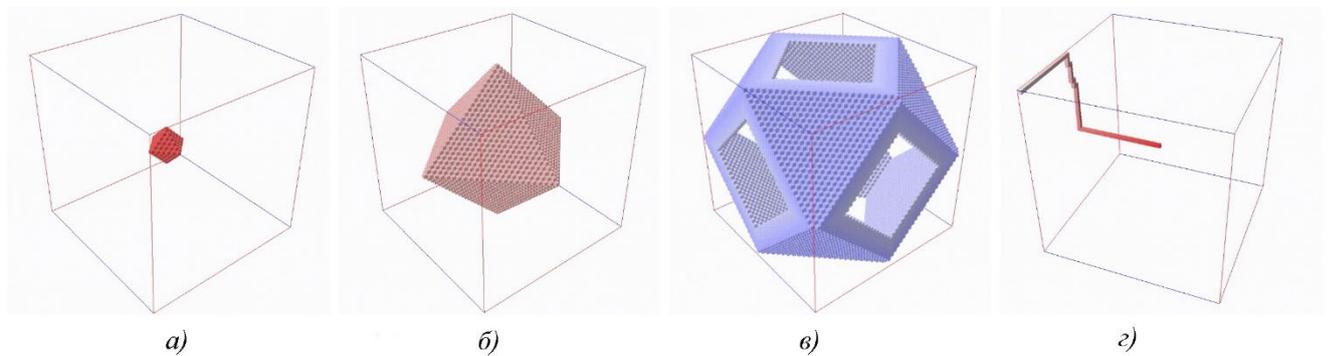


Рисунок 4.29 – Визуализация для модели с 6-ю синапсами без поправок

Моделирование проведено в более совершенной среде: данные сформированы программой, написанной на фреймворке Qt, записаны в формате csv (comma-separated value) и визуализированы с использованием интерактивного интерфейса визуализации Cubix [128]. Этот инструмент визуализации применяется для данных сканирования (взвешенных облаков точек), что востребовано в дизайне и в медицине. Чтобы добиться корректных результатов с сокращенной схемой

связей нейронов, предлагается дополнить используемую функцию активации. Рассматривалось несколько подходов к выбору функции активации.

В первом случае диагональные перемещения рассматриваются, как полные единичные перемещения, но на $\sqrt{2}$ и $\sqrt{3}$ единичной дистанции для 2D и 3D диагоналей соответственно. В этом случае функция активации перехода принимает вид дробной функции [129]:

$$\Phi(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \leq 0 \\ u_i \cdot \frac{(1+\varepsilon \cdot \sqrt{j(n)-1}) \cdot (1+\varepsilon)}{1+\varepsilon \cdot \sqrt{n}} & 0 < u_i < 1, \\ 1 & u_i \geq 1 \end{cases} \quad (28)$$

где u_i – взвешенный суммарный сигнал входных синапсов i – го нейрона, ε – минимальное Евклидово расстояние между конфигурациями, n – число активированных входных синапсов нейрона, $j(n)$ – функция поправки. Число n в общем случае равно 2 для 2D-диагонального перемещения и 3 для 3D-диагонального перемещения, но отличается при наличии препятствий по соседству.

Второй подход рассматривает диагональные перемещения, как частичные ($\sqrt{2}$ и $\sqrt{3}$ для 2D и 3D диагоналей соответственно) перемещения на полную единичную дистанцию. В таком случае функция активации становится показательной т.к. последующий переход приводит к перемножению веса предыдущего нейрона на функцию активации [129]:

$$\Phi(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \leq 0 \\ u_i \cdot \left(\frac{1}{1+\varepsilon}\right)^{\sqrt{j(n)+\sqrt{n-1}}-1} & 0 < u_i < 1, \\ 1 & u_i \geq 1 \end{cases} \quad (29)$$

где u_i – взвешенный суммарный сигнал входных синапсов i – го нейрона, ε – минимальное Евклидово расстояние между конфигурациями, n – число активированных входных синапсов нейрона, $j(n)$ – функция поправки.

Значение функции поправки в исходном варианте принимается равным n , однако, характерный недостаток весов нейронов во всех направлениях кроме осевых, присущий изначальному варианту (рисунок 4.29), сменяется избыточной активацией в горизонтальной, фронтальной и профильной плоскостях

эквискалярной области по направлениям, находящимся между диагоналями и основными осями, что проиллюстрировано эквискалярными поверхностями на рисунке 4.30а для дробной функции и 4.30б для степенной.

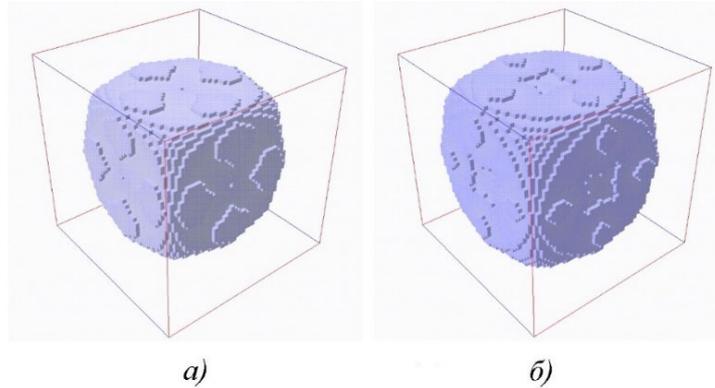


Рисунок 4.30 – Эквискалярные поверхности без поправочной функции

Наблюдаемый эффект происходит по причине накопительного (кумулятивного) усиления весов в описанных направлениях и связан с формой активационной функции, сформированной из соображений необходимости активировать соседние нейроны в направлении 2D и 3D диагоналей для каждого нейрона карты по отдельности.

Введение поправочной функции $j(n)$, снижающей вышеупомянутый кумулятивный эффект за счёт коррекции на базе вычисления неравномерности входных синаптических сигналов нейрона, позволяет сгладить и уравновесить характер активации по направлению. Предложены две формы поправочной функции: линейная и квадратичная [130].

$$j = \sum_1^n \left(\frac{|Y_n - \bar{Y}|}{\bar{Y}} + 1 \right) \text{ и } j = \sum_1^n \left(\frac{(Y_n - \bar{Y})^2}{\bar{Y}} + 1 \right), \quad (30)$$

где n – число активированных входных синапсов нейрона, Y_n – входной вес n -го синапса, \bar{Y} – среднее арифметическое всех входных синапсов нейрона.

Полученные в результате активации навигационные карты (рисунки 4.31а, 4.31б, 4.31в, 4.31г) демонстрируют эквискалярные области с параметрами, приближающимися к данным модели с 26-ю связями (рисунок 4.17). Рисунок 4.31а – дробная функция активации, линейная функция поправки; 4.31б – дробная функция активации, квадратичная функция поправки; 4.31в – степенная функция

активации, линейная функция поправки; 4.31г – степенная функция активации, квадратичная функция поправки.

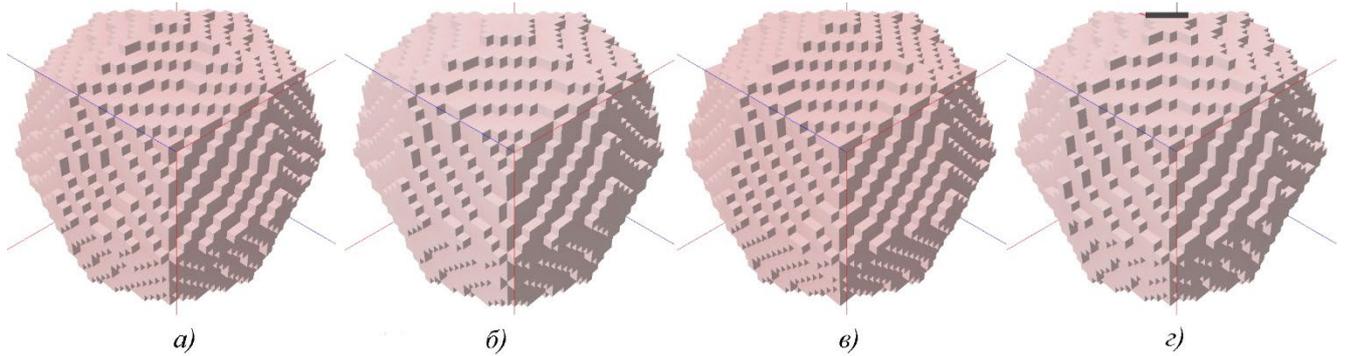


Рисунок 4.31 – Эквискалярные поверхности модели с 6-ю синапсами с поправочной функцией

В качестве альтернативы геометрическому подходу при выборе функции активации предложен подход, основанный на подборе функции с требуемыми свойствами. Основные свойства функции активации нейронной карты исходят из основных требований к характеру навигационной карты: из любой достижимой точки карты в направлении наибольшего роста весового значения должен существовать путь к начальной точке; градиент веса в зонах с равномерными навигационными свойствами должен распространяться сравнительно равномерно, т.е. все пути по равномерным зонам должны быть относительно равнозначными и зависеть только от дистанции. Однако, характер активации карты, форма и число ячеек на которые производится декомпозиция пространства, а также модель связей между ячейками, уже сами по себе ограничивают возможности равнозначности зон. Касательно функции активации, требования приобретают следующий вид: значение функции активации должно быть меньше единицы, функция активации должна обеспечивать по возможности равномерное убывание весовых коэффициентов нейронов во всех направлениях в условиях равномерного пространства. Также, в виду того, что вычислительная сложность функции активации может существенно влиять на практическое время активации карты, желательно снизить вычислительную сложность функции активации.

В соответствии с необходимыми свойствами, предложена функция активации следующего вида:

$$\Phi(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \leq 0 \\ u_i \cdot \left(1 + k_{ij} \frac{(n-1)}{6}\right) & 0 < u_i < 1, \\ 1 & u_i \geq 1 \end{cases} \quad (31)$$

где u_i – взвешенный суммарный сигнал входных синапсов i – го нейрона; k_{ij} – коэффициент, корректирующий стоимость перехода; n – число входящих синапсов нейрона.

Учитывая то, что используется модель с 6-ю синапсами, то предложенная функция удовлетворяет первому требованию и её значение при $0 \leq n \leq 6$ будет всегда меньше единицы. Проверка равномерности убывания весовых коэффициентов во всех направлениях проводилась эмпирически. Для оценки этого качества использовался параметр сферичности поверхности эквискалярной области. В случае равномерного убывания весовых коэффициентов, форма поверхности эквискалярной области для любого значения весов должна стремиться к сфере. Для оценки сферичности применялся коэффициент сферичности Х. Уоделла [131]:

$$\Psi = \frac{A_s}{A_p} = \frac{\sqrt[3]{\pi \cdot (6V_p)^2}}{A_p}, \quad (32)$$

где A_s – площадь поверхности сферы, охватывающей объём эквискалярной области; A_p – площадь фактической внешней поверхности эквискалярной области; V_p – объём эквискалярной области.

При помощи фреймворка Qt написана подпрограмма, вычисляющая объём эквискалярной области и фактическую площадь её поверхности. В качестве площади поверхности A_s использовалась фактическая площадь поверхности сферы равного объёма, составленной в пространстве, декомпозированном с идентичной дискретностью. В силу дискретности формы сравниваемых фигур, коэффициент сферичности периодически колеблется при увеличении объёма. Результат экспериментов показал, что для получаемых эквискалярных областей размером от 21x21 до 99x99 коэффициент сферичности варьируется от 0,89 до 0,99. Например для эквискалярной области размером 59x59 коэффициент сферичности равен 0,98. Форма областей с размерами менее 21x21 совпадает с соответствующими им по

объёму дискретными сферами, о чем свидетельствует коэффициент сферичности равный единице. Эквискалярные области нейронной карты, активированной с помощью выбранной функции активации, представлены на рисунках 4.32а, 4.32б, 4.32в.

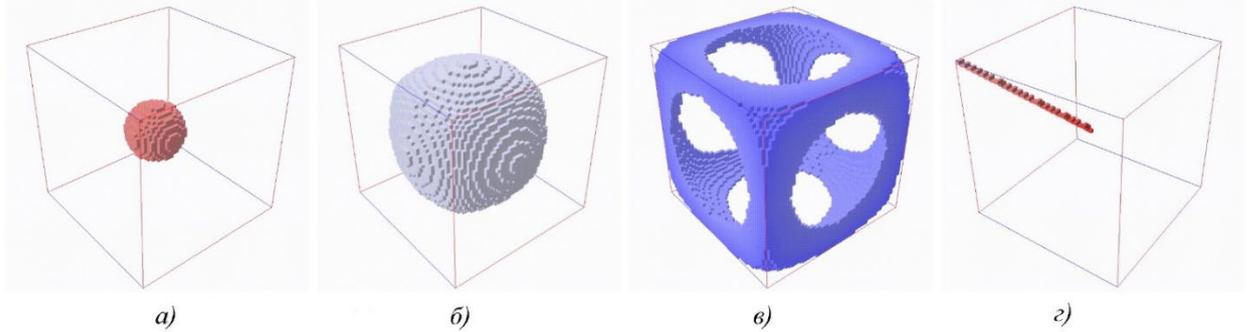


Рисунок 4.32 – Визуализация для модели с выбранной функцией активации

На рисунке 4.32г приведена полученная траектория. В сравнении с траекторией, рассмотренной на рисунке 4.29г, обновлённая траектория в значительной степени приблизилась к траектории кратчайшей прямой между начальной и конечной точками.

Обновлённая программная реализация позволяет использовать не только координатозависимые и направленные параметры активации, но и параметры с комбинацией перечисленных качеств. По сравнению с предшествующей реализацией, новая позволяет учитывать и прежние параметры и новые: направленность стоимости перемещения вдоль вертикальной оси, связанную с действием гравитационных сил; неоднородность стоимости горизонтального перемещения на различной глубине БВ, связанную с действием силы вязкого трения; неоднородность стоимости горизонтального перемещения в зависимости от оси движения, вызванную различной площадью сопротивления и парусностью конструкции штанги и рабочих модулей в соответствующей проекции; неоднородность стоимости горизонтального перемещения вдоль оси в зависимости от направления, которая может быть вызвана различием в обтекаемости конструкции (новая функциональность).

Используя предложенные в работе Лебедева Д. В. [] принцип и результаты сравнительного анализа вычислительной сложности алгоритмов при активации единичного нейрона, можно заключить, что предложенный алгоритм требует

$3n+2N+1$ арифметических операций, где N – размерность конфигурационного пространства, n – число активируемых соседей, исходя из вычислительных экспериментов, в среднем равное 2. Из работы [] видно, что повышение равномерности активации нейронов сопровождается как увеличением плавности траекторий, так и ростом вычислительной сложности. Сложность предлагаемого алгоритма при $N = 3$ составляет 13 операций при 9-12 у лишенных ранее перечисленных преимуществ близких по однородности активации алгоритмов.

На рисунках 4.33а, 4.33б, 4.33в представлены несколько визуализаций поверхности эквискалярных областей и участки траекторий перемещения для случаев параметров активации различного характера.

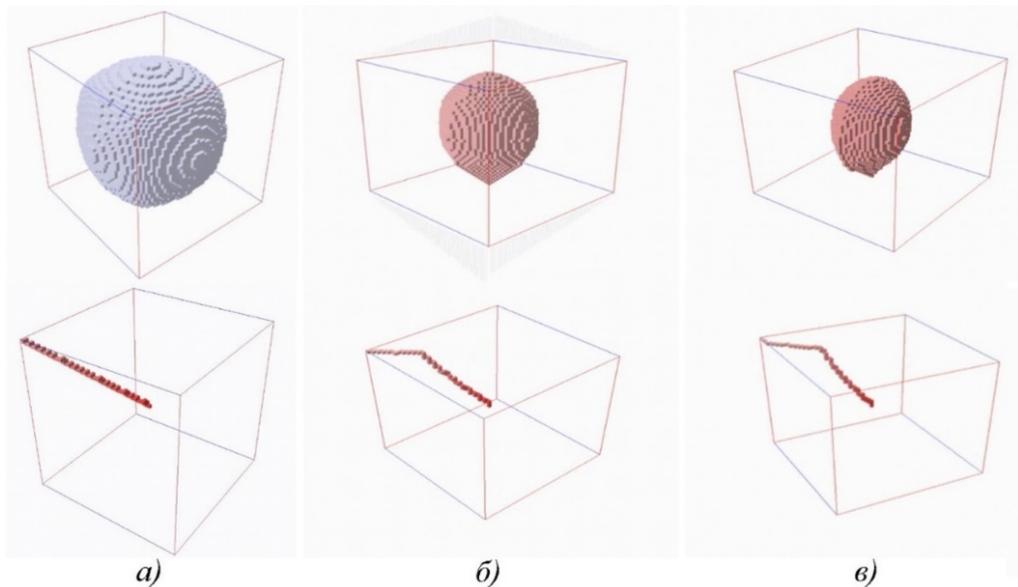


Рисунок 4.33 – Визуализация влияния параметров активации на форму траектории

Рисунок 4.33а иллюстрирует форму траектории для случая изотропных параметров. Рисунок 4.33б показывает изменения, происходящие при введении прогрессивной шкалы стоимости горизонтального перемещения в зависимости от вертикальной координаты. Рисунок 4.33в отражает изменения, вносимые введением неравномерности в прогрессию вышеупомянутой шкалы относительно направления горизонтального перемещения. Представленная модель нейронной карты позволяет помимо учета параметров среды позволяет принимать во внимание изменяемые габариты оборудования (модуля, груза) для коррекции свойств среды и для коррекции карты препятствий. Используемая модель допускает опасные и нежелательные зоны (глава 4.4).

Введение опасных зон позволяет запретить перемещение мехатронного устройства в опасной близости с препятствиями, а также ограничить возможности перемещения в ряде нежелательных зон, полностью не исключая возможность их посещения. Это может быть использовано для создания пешеходных зон, подверженных воздействию нежелательных факторов зон и участков тесной компоновки. В результате посещение означенных зон будет доступно, но произойдёт только в случаях, когда без попадания в означенную зону достичь целевой точки невозможно, либо доступ иными путями существенно усложнён. При этом предлагаемая модель стремится минимизировать участок траектории, пролегающий в нежелательной зоне.

Опасные зоны представлены множеством конфигураций, соответствующих препятствиям, согласно описанной в разделе 4.3 дискретной модели состояний мехатронного манипулятора. Реализация опасных зон производится путём установления максимального по модулю отрицательного входного сигнала сдвига, выполняющего роль тормозящего сигнала и сводящего уровень возбуждения соответствующих нейронов до нуля. Таким образом в процессе навигации участки, соответствующие опасным конфигурациям, недостижимы.

Множество опасных конфигураций актуализируется линейным алгоритмом на основании данных о форме и расположении препятствий в соответствии с типом контролируемой поверхности и видом проводимой операции. От типа поверхности и вида операции зависят номер используемого рабочего модуля и используемая ориентация. Изменение габаритов и положения участков опасных зон вокруг препятствий в зависимости от ориентации и размеров рабочего модуля проиллюстрировано на рисунках (вид сверху) 4.34а, 4.34б и, для вертикальной ориентации при проведении контроля герметичности дна, 4.34в.

Нежелательные для посещения зоны позволяют задать в рабочей зоне мехатронного устройства области, посещение которых будет избегаться, но останется возможным. Реализация нежелательных зон производится путём добавления отрицательного входного сигнала сдвига, выполняющего роль тормозящего сигнала и снижающего уровень возбуждения соответствующих

нейронов. Таким образом достичь участки, соответствующие нежелательным конфигурациям, возможно лишь в особых случаях, когда в процессе активации не сформировалось другого способа достичь целевой точки или другие способы по тем или иным причинам еще менее предпочтительны.

М - рабочий модуль; П - препятствие; ОЗ - опасная зона; ○ - рабочая точка

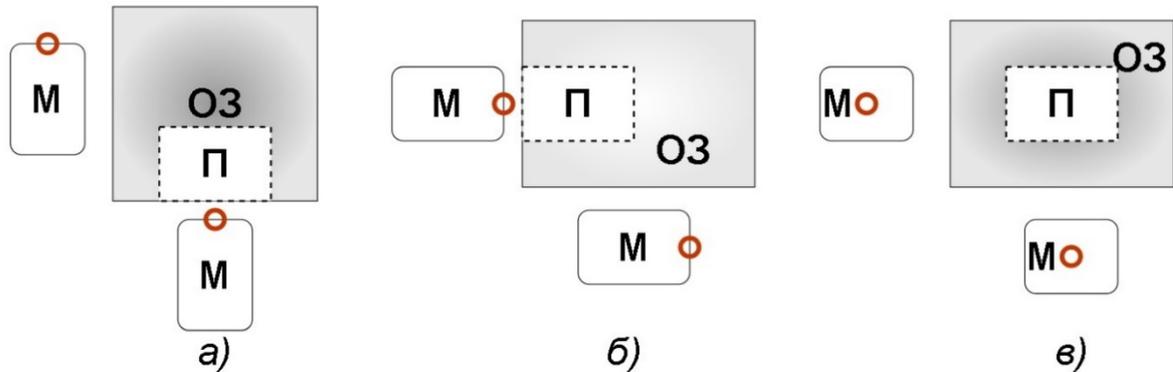


Рисунок 4.34 – Изменение положения и габаритов опасных зон препятствий в зависимости от ориентации рабочего модуля, вид сверху

Совокупность возможностей модели позволяет применять её не только для решения поставленной узкоспециализированной задачи, но и для решения широкого круга похожих задач: управление портальными и мостовыми манипуляторами на автоматизированных промышленных участках обработки, сборки, сортировки и др. На рисунке 4.35 приведена визуализация активированной карты промышленного участка с использованием опасных и нежелательных областей.

Оборудование, элементы конструкции и вспомогательное оснащение представлены участками опасных зон, а также окружены областями нежелательных зон для повышения безопасности. На рисунке 4.35а опасные зоны обозначены красным цветом, а нежелательные – фиолетовым. Рисунок 4.35б демонстрирует множество участков карты из одного диапазона значений весов. Как видно из рисунка, веса участков нежелательных зон приближаются по значению к весам участков зон свободного перемещения, находящимся в значительно большем удалении от исходной точки. Рисунки 4.35в и 4.35г демонстрируют примеры траекторий, проложенных между исходной точкой и двумя точками, находящимися в различных координатах за несколькими препятствиями.

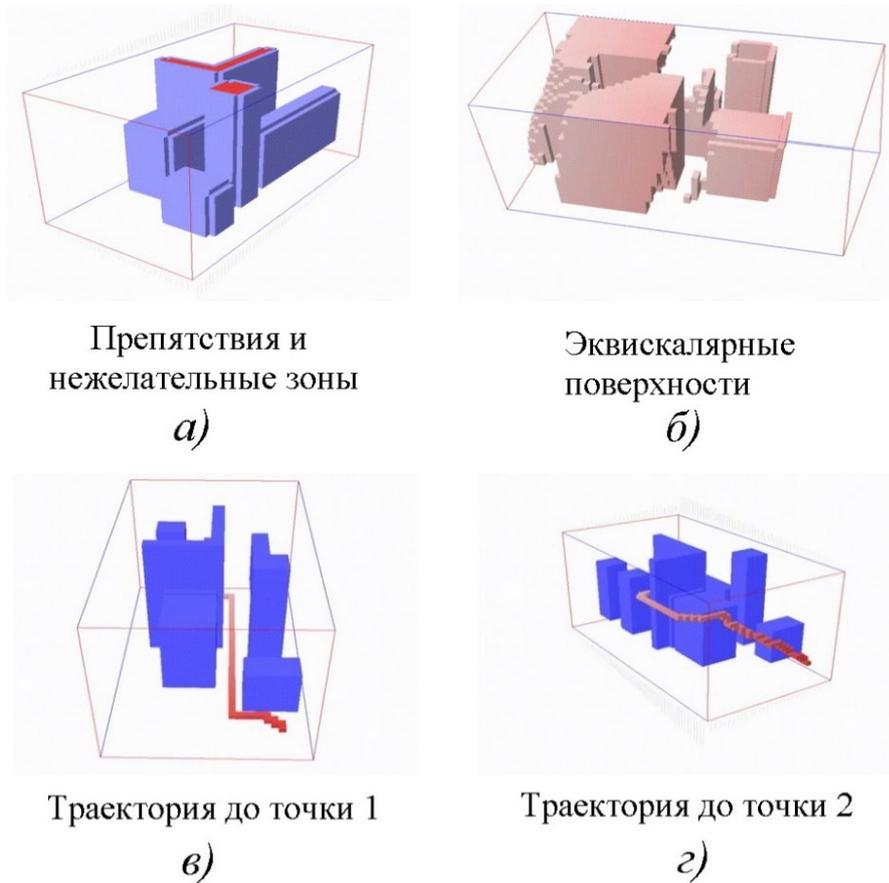


Рисунок 4.35 – Визуализация работы карты для автоматизированного промышленного участка с учётом опасных и нежелательных зон

Работа модели испытывалась, в том числе, в отрыве от рассмотренного применения при решении более сложных пространственных задач. Результаты моделирования для мехатронного устройства, свободно перемещающегося в трёх измерениях (например, летающего дрона) приведены на рисунке К.1 (Приложение Л) при поиске пути в трёхмерном лабиринте. На рисунке К.2 (Приложение К) приведены результаты моделирования обхода препятствия большой площади, где наглядно демонстрируется влияние неоднородности рабочей зоны на способ обхода препятствия. Исследование модели на представленных примерах подтверждает способность градиента выходных весов нейронов карты сохранять монотонность во всех направлениях при многократном прохождении через узкие места в препятствиях, а также при разделении/слиянии фронта активации, в том числе в условиях неоднородности параметров рабочей зоны.

Метод нейронной карты можно рекомендовать к применению при автоматизации гибких производственных участков и аналогичных промышленных

объектов цифрового производства, оснащённых краном-погрузчиком. Как правило, на подобных участках присутствуют долговременные технологические позиции, привязанные к гибким производственным ячейкам и другим частям участка, используемые для погрузки/выгрузки материалов, деталей, изделий и т.д. В этих случаях возможно отказаться от проведения ресурсоёмкой процедуры активации при штатной работе крана-погрузчика. Расположение и границы основных технологических позиций строго регламентированы. Все или практически все перемещения мостового или порталного манипулятора в рамках технологического цикла работы участка производятся между заранее известными и, в общем случае, продолжительное время неизменными позициями. Единичная активация карты позволяет связать все достижимые участки декомпозированного рабочего пространства с исходной точкой активации. В тех случаях, когда используются изотропные параметры, перемещение манипулятора можно осуществлять как из исходной точки в достижимые точки, так и в обратном направлении. Эта возможность позволяет ограничиться относительно небольшим числом активаций, равным числу ключевых позиций, и заблаговременно создать исчерпывающую энциклопедию навигационных карт. Такой подход не позволит перемещаться из любого произвольного положения в другое произвольное положение без проведения активации карты или использования дополнительных средств поиска пути, но он позволяет совершать множественные произвольные курсирования в районе ключевых точек по маршрутам: произвольная точка – ключевая точка, ключевая точка – произвольная точка. Смена навигационной карты на другую, заранее сохранённую, позволит немедленно переориентироваться на работу с новой ключевой точкой. Примеры траекторий, построенных между выбранной ключевой точкой промышленного участка и другими ключевыми точками того же участка, приведены на рисунках Л.1, Л.2 в приложении Л [132]. Смена навигационных карт также позволит осуществлять переключение между заранее спланированными режимами работы участка (рисунок Л.3 в приложении Л), отличающимися формой, размерами и числом опасных и нежелательных зон, а также параметрами активации, которые могут

отличаться в зависимости от размера, массы и других параметров типовых грузов, полностью автономного автоматического режима работы участка или проведения обслуживания оборудования, осуществления других плановых или внеплановых работ, сопровождаемых привлечением персонала в специально отведённые зоны участка.

4.5 Оценка применения модели распределённого управления с программными блоками навигации и вычислений на основе моделей и методов интеллектуального анализа

Применение разработанной архитектуры распределенного управления с программными блоками вычислений и навигации на основе моделей и методов интеллектуального анализа обеспечивает решение задачи управления специализированными мехатронными устройствами при проведении вспомогательных технологических операций. Разработанная система путём автоматизации планирования схемы маршрутных линий координатного крана участка электрохимической дезактивации для перегрузки корзин с твёрдыми радиоактивными отходами позволяет избежать влияния человеческого фактора на безопасность функционирования системы при проектировании и программировании ограничительных маршрутных линий.

Применение предложенной модели представления данных о технологических позициях и вспомогательных перемещениях позволяет с учётом их числа, протяженности, локализации и, для перемещений, направления обеспечить согласованность размещения схемы маршрутных линий с актуальной схемой технологического маршрута. Согласованность оценивается с применением функции, учитывающей удалённость точек маршрутных линий от сонаправленных участков перемещений технологического маршрута. Унифицированная схема позволяет внедрить распределённую программную реализацию в широкий перечень систем управления мехатронными устройствами и ускорить операцию

перепрограммирования маршрутов конечного звена мехатронных устройств за счёт устранения необходимости привлечения узкокомпетентного специалиста. Выявлено, что используемый специалистом способ опирается исключительно на опыт сотрудника и не содержит методик, позволяющих учитывать общую безопасность, протяженность маршрутной схемы в сравнении с протяженностью кратчайшего технологического маршрута, как и другие факторы изменчивой производственной среды, среди которых: изменение свойств груза по мере обработки, наличие/отсутствие груза в захвате на отдельных участках маршрута, наличие зон с чувствительными к источникам компонентами (от длительности близкого контакта с источниками зависит их срок службы) и другие. В соответствии с описанными в разделе 4.2 условиями и полученными результатами, проведен вычислительный эксперимент для оценки протяженности полного технологического маршрута при использовании маршрутной схемы, полученной автоматически с применением блоков интеллектуальных вычислений и навигации относительно протяженности при использовании маршрутной схемы, сформированной специалистом. Определение протяженности выполнено в соответствии с формулой:

$$L_M = \sum_{i=1}^n (L_{xn} + L_{yn}), \quad (33)$$

где n – число вспомогательных технологических процессов, L_{xn} , L_{yn} – протяженности перемещений вдоль осей x и y в n -ом процессе.

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

Автоматизация функций оператора при решении задач вспомогательного перемещения рабочего органа мехатронного манипулятора в составе устройства ремонта облицовки бассейна выдержки позволяет сократить риск столкновения частей рабочего модуля и подвижных звеньев устройства ремонта с РАО и конструктивными элементами, расположенными на дне и по периметру бассейна

выдержки. Опасность при управлении оператором обусловлена низкой оснащённостью подвижной части датчиками безопасности, а также существенной ограниченностью обзора, осуществляемого в зависимости от типа рабочего модуля одной или двумя узконаправленными чёрно-белыми радиационно-стойкими видеокамерами. Исключение непосредственного участия оператора в управлении вспомогательными перемещениями мехатронного устройства-манипулятора смягчает ограничения, накладываемые требованиями технических документов на максимальную скорость перемещения звеньев в два раза и предоставляет возможность согласованного управления осевыми группами приводов, что в совокупности позволяет сократить время выполнения вспомогательного перемещения в 2 – 3,5 раза.

Возможность учитывать неоднородность рабочей зоны позволяет принимать во внимание изменение массы подвижной части штанги при её подъёме и спуске на различных глубинах, а также изменение величины вязкого трения жидкости по мере погружения сегментов на глубину до 20 метров. Глубина погружения рабочего модуля и штанги влияет на площадь погруженных в жидкость элементов мехатронного устройства-манипулятора, от которой зависит величина силы вязкого трения жидкости и приведённый момент этой силы при выполнении горизонтальных перемещений. За счёт согласования глубины погружения штанги с её горизонтальным перемещением, программный блок распределённой системы управления на базе интеллектуального метода нейронной карты позволяет снизить совершаемую двигателями работу при программной автоматизации перемещения мехатронного манипулятора УРОБВ в сравнении с использованием алгоритмов поиска кратчайшего пути или применения однородной нейронной карты. Величина неоднородности 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.

Путём проведения вычислительного эксперимента выполнена оценка приведённого отличия между совершаемой электродвигателями мехатронного

устройства работой при выполнении операций по кратчайшему пути и с учётом неоднородности рабочей зоны $A_{\Pi}=(A_{К}-A_{Н})/A_{К}$. В ходе эксперимента с применением блоков интеллектуальных вычислений и навигации выполнено формирование траекторий для набора технологических позиций в участках обшивки БВ, требующих наиболее частого контроля. Уровень дискретизации при моделировании выбран так, что единичный участок рабочей зоны представляет из себя куб со стороной 0,1 метра. Полученные безопасные траектории перемещения между позицией для обслуживания рабочего модуля, находящейся на поверхности, и 53-мя востребованными технологическими позициями на глубинах 10, 15 и 20 метров с учетом характерных для эксплуатации БВ препятствий приведены на рисунке 4.36. На рисунке 4.36а приведены траектории, полученные при поиске кратчайшего пути. На рисунке 4.36б приведены траектории, полученные при поиске пути с учетом вышеуказанных неоднородностей рабочей зоны.

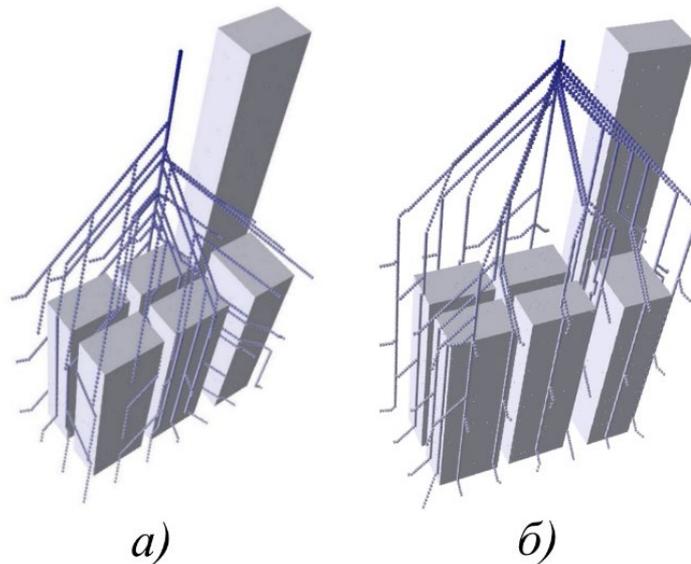


Рисунок 4.36 – Результаты моделирования неоднородной карты

Совершаемая работа оценивалась по совокупности работ по преодолению статических $A_{С}$ и динамических $A_{Д}$ сил без учёта неоднородности рабочей зоны, а также неоднородных сил, величина которых зависит от участка рабочей зоны в котором выполняется перемещение $A_{В}$:

$$A = A_{С} + A_{Д} + A_{В}. \quad (34)$$

$$A_{С} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m F_{СПj} \cdot l_{ij}; \quad A_{Д} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{ДУij} \cdot k_{ij}; \quad A_{В} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m F_{ВПij} \cdot l_{ij},$$

где n – число участков траектории; m – число направлений перемещения в соответствии с матрицей осевых модификаторов (раздел 4.3); $F_{СП}$ – значение, эквивалентное действию приведённых статических моментов и сил; $Q_{ДУ}$ – удельная энергия, затрачиваемая на развитие маршевой скорости; $F_{ВП}$ – значение, эквивалентное действию приведённых неоднородных внешних сил; l_{ij} – перемещение на i -том участке в j -том направлении; k_{ij} – параметр, определяющий наличие разгона до маршевой скорости на i -том участке в j -том направлении.

Вычислительные эксперименты, результаты которых представлены в приложении М, показали, что применение интеллектуального блока формирования траекторий, с учётом неоднородности 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% относительно использования кратчайших траекторий. В среднем для 53-х технологических позиций, расположенных в участках самого вероятного наличия течей, приведённая разница составила 3,37%.

Исходя из перечисленного, можно отметить что разработанная распределённая программная часть рассмотренных автоматизированных систем управления технологическими процессами электрохимической дезактивации ТРО и ремонта облицовки бассейна выдержки оказывает положительное влияние на эксплуатационные качества и степень автоматизации рассмотренных технологических процессов.

Опираясь на нормы, приведённые в эксплуатационной документации рассматриваемых систем, составлены таблицы трудоёмкости операций (Таблицы 4.1 и 4.2). Цветом выделены автоматизируемые операции.

Для оценки степени автоматизации процесса применён соответствующий безразмерный коэффициент K_A .

$$K_A = \frac{T_A}{T_A + T_H}, \quad (35)$$

где T_A – трудоёмкость автоматизированного процесса, T_H – трудоёмкость неавтоматизированного процесса.

Таблица 4.1 – Трудоёмкость технологических операций при коррекции технологического маршрута УЭХД

Операция	Средняя трудоёмкость, час.	Среднее число повторений	Вид
Коррекция координат	2	1	неавт.
Ввод координат и последовательности операций маршрута	1	1	неавт.
Программирование маршрутов автоматизированных перемещений	6	1	авт. в процессе работы

Таблица 4.2 – Трудоёмкость технологических операций УРОБВ

Операция	Средняя трудоёмкость, час.	Среднее число повторений	Вид
Монтаж и демонтаж установки	12	1	неавт.
Монтаж модуля	0,17	9	неавт.
Вспомогательные перемещения	0,17	18	авт. в процессе работы
Поиск течи	2	3	неавт.
Зачистка участка	0,1	3	авт.
Наложение пластыря	12	3	авт.

Общий уровень автоматизации (K_A) процесса ремонта бассейна выдержки увеличивается на 0,055 и достигает $K_A = 0,671$, а процесс изменения и внедрения адаптированной схемы маршрутных линий координатного крана участка дезактивации ТРО при коррекции технологического маршрута становится автоматизированным с уровнем автоматизации, достигающим $K_A = 0,667$. Кроме

того, положительное влияние (увеличение) оказывается на коэффициент непрерывности производственного процесса за счёт сокращения доли вспомогательного времени в общем времени, затрачиваемом на весь реализуемый технологический цикл.

4.6 Выводы по главе 4

1. Формализованы и на основе математической модели параметризованы цифровые представления магистральных линий и опасных зон технологических участков.
2. Реализованы операторы эвристического алгоритма поиска решения задачи расположения маршрутных линий редуцированной схемы перемещений с точки зрения эксплуатационной безопасности и соответствия схеме технологического маршрута.
3. Разработана программная архитектура системы вспомогательного управления перемещением рабочего органа промышленного мехатронного устройства-манипулятора.
4. Сформированы и реализованы в виде прикладных программных решений модели нейронной карты, отличающиеся размерами нейронной области. Проведены вычислительные эксперименты.
5. Выполнено графическое моделирование, анализ и интерпретация результатов для нескольких видов функций активации нейронной карты.
6. Определены основные направления практического применения полученных математических и программно-алгоритмических решений для их инвариантного промышленного применения.

Заключение

В результате проведенных исследований получены следующие новые научные и практические результаты:

1. Решена актуальная научная задача, заключающаяся в автоматизации процесса формирования траекторий и маршрутов специализированных мехатронных устройств в условиях неоднородной технологической среды цифрового производства путём применения разработанных интеллектуальных моделей и программного обеспечения. Полученное решение отличается от имеющихся использованием элементов искусственного интеллекта, адаптированных под специфические требования и ограничения, налагаемые на системы управления этими устройствами.
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 $KA = 66,7\%$, и повышают на 5,5% уровень автоматизации процесса ремонта бассейна выдержки до уровня $KA = 67,1\%$.

Список использованной литературы

1. 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. – V. 1691. – №. 1. – P. 012076.
2. Казаков, Д.Ф. Применение SMART-технологий и систем «малой» автоматизации в цифровом производстве / Д.Ф. Казаков, Е.Е. Ковшов, В.С. Кувшинников // *Повышение доли на международных рынках в условиях цифровой трансформации отрасли: Сб. тезисов VIII научно-практической конф. молодых учёных и специалистов атомной отрасли*. – СПб.: Медиапайпер, 2019. 240 с., Изд-во ДЕПО, 2019. С.11-13.
3. A note on two problems in connexion with graphs / E. W. Dijkstra [et al] // *Numerische mathematik*. – 1959. – V. 1. – №. 1. – P. 269-271.
4. Hart, P. E. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths / P. E. Hart, N. J. Nilsson, B. A. Raphael // *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics*. – 1968. – V. 4. – №. 2. – P. 100-107.
5. LaValle, S. M. *Planning algorithms*. – Cambridge university press, 2006.
6. Harabor, D. D. The JPS Pathfinding System / D. D. Harabor, A. Grastien // *SOCS*. – 2012.
7. Glasius, R. Neural network dynamics for path planning and obstacle avoidance / R. Glasius, A. Komoda, S. C. Gielen // *Neural Networks*. – 1995. – V. 8. – №. 1. – P. 125-133.
8. Glasius, R. A biologically inspired neural net for trajectory formation and obstacle avoidance / R. Glasius, A. Komoda, S. C. Gielen // *Biological Cybernetics*. – 1996. – №. 74(6). – P. 511–520.
9. Lagoudakis, M. G. Mobile robot local navigation with a polar neural map : MS thesis. – University of Southwestern Louisiana, 1998.
10. Lagoudakis, M. G. Neural Maps for Mobile Robot Navigation / M. G. Lagoudakis, A. S. Maida // *Proceedings of the 1999 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. – 1999. – V. 3. – P. 2011–2016.
11. Lebedev, D. V. A New Wave Neural Network Dynamics for Planning Safe Paths of Autonomous Objects in a Dynamically Changing World / D. V. Lebedev, J. J. Steil, H. Ritter // *Advances in Neural Networks World*. – WSEAS Press. – 2002. – С. 141-146.
12. Lebedev, D. V. The dynamic wave expansion neural network model for robot motion planning in time-varying environments / D. V. Lebedev, J. J. Steil, H. Ritter // *Neural networks*. – 2005. – V. 18. – №. 3. – P. 267-285.
13. Норенков, И. П. Генетические методы структурного синтеза проектных решений / И.П. Норенков // *Информационные технологии*. – 1998. – №1. – P. 9-13.
14. Панченко, Т. В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / Т. В. Панченко. – под ред. Ю.Ю. Тарасевича. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.

15. Батищев, Д. И. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации : учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 510200 - Прикладная математика и информатика и по специальности 010200 - Прикладная математика и информатика / Д. И. Батищев, Е. А. Неймарк, Н. В. Старостин ; Федеральное агентство по образованию, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. – Нижний Новгород : Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2006. – 136 с.
16. Демидова Л.А. Методы, модели и алгоритмы поддержки принятия решений в условиях неопределенности на основе теории нечетких множеств, мультимножеств и генетических алгоритмов // Задачи системного анализа, управления и обработки информации: межвузовский сборник научных трудов. – Вып. 2. – М.: МГУП, 2008. – 171 с.: ил.
17. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик; Под ред. В. М. Курейчика. – 2-е изд., исправл. и доп. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.
18. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия–Телеком, 2013. – 384 с.
19. Shopova, E. G. BASIC - A genetic algorithm for engineering problems solution / E. G. Shopova, N. G. Vaklieva-Bancheva // Comput. Chem. Eng. – 2006. – V. 8. – P. 1293–1309.
20. Mitchell, M. An Introduction to Genetic Algorithms / M. Mitchell. – London, England : A Bradford Book The MIT Press, 1999. – 143 p.
21. De Jong, K. A. Evolutionary computation – a unified approach / K. A. De Jong. – Cambridge, Mass. ; London : MIT press, cop. 2006. – IX, 256 p.
22. Filho, J.L. Genetic-Algorithm Programming Environments / J.L. Filho, P.C. Treleaven, C. Alippi // Computer. – 1998. – V. 27, – P. 28–43.
23. Лебедев, В. М. Ядерный топливный цикл / В. М. Лебедев. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 316 с.
24. Шкатов, Е. Ф. Основы автоматизации технологических процессов химических производств : [Учеб. для сред. спец. учеб. заведений хим. профиля] / Е. Ф. Шкатов, В. В. Шувалов. – М. : Химия, 1988. – 303 с.
25. Кавришвили, З. О. Автоматизация сбора и обработки диагностических параметров оборудования новых энергоблоков АЭС / З. О. Кавришвили, В. Л. Рачков // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3 (32). – С. 101–110.
26. Ташлыков, О. Л. Ремонт оборудования атомных станций / О. Л. Ташлыков. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2018. – 352 с.
27. Воробьев, В. А. Эксплуатация и ремонт электрооборудования и средств автоматизации : учебник и практикум для среднего профессионального образования / В. А. Воробьев. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2019. – 365 с.

28. Сальников, А. А. Прогнозирование и предотвращение технологических нарушений эксплуатации оборудования АЭС : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.04.11 / Сальников Андрей Александрович; [Место защиты: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»]. - Волгодонск, 2016. - 25 с.
29. Галиев, И.И. Выбор средств АСУ ТП АЭС на основе комплекса критериев надежности и риска / И.И.Галиев, А.Н.Черняев // Атомная энергия. – 2018 . – Т.124, №3. – с.127-132 .
30. Планы по импортозамещению микроэлектроники для АСУ ТП АЭС обсудили на Совете главных конструкторов // Русатом Автоматизированные Системы Управления URL: <https://rasu.ru/info/news/plany-po-importozameshcheniyu-mikroelektroniki-dlya-asu-tp-aes-obsudili-na-sovete-glavnykh-konstruktorov/> (дата обращения: 31.03.2021).
31. Дунаев, В. Системы автоматического управления и контроля для атомных электростанций / В. Дунаев, Е. Медведовский //Control Engineering Россия. – 2013. – №. 3. – С. 45.
32. Меренов, С. В. Современные тенденции развития управляющих систем атомных электростанций / С. В. Меренов, М. В. Коптелов // Современные научные исследования и разработки. – 2018. – Т. 2, № 11 (28). – С. 471-477.
33. Modern instrumentation and control for nuclear power plants : a guidebook / Technical reports series N 384. – Vienna, Austria : International Atomic Energy Agency, 1999. – 629 p.
34. Современные подходы к созданию АСУТП ВВЭР нового поколения / В. А. Горбаев [и др.] // Атомная энергия. – 2010. – № 109(5). – С. 267-271.
35. Будов, В. М. Конструирование основного оборудования АЭС: Учеб. пособие для вузов / В. М. Будов, В. А. Фарафонов. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 264 с.
36. Синев, Н. М. Экономика ядерной энергетики: Основы технологии и экономики производства ядерного топлива. Экономика АЭС Учебное пособие для вузов / Н. М. Синев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 480 с: ил.
37. Якубенко, И. А. Модернизация системы управления перегрузкой ядерного топлива на энергоблоке №1 Ростовской АЭС / И. А. Якубенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 4 (9). – С. 35-39.
38. Рыболовлев, В. Ю. Разработка и внедрение информационно-моделирующей системы АСУ доменной плавки : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.06. - Екатеринбург, 2002. - 190 с.
39. UAtom [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.uatom.org/ru/obrashhenye-s-radyoaktyvnymy-othodamy-na-dejstvuyushhyh-aes>. – Дата доступа: 01.04.2021.
40. Хвостова, М. С. Обращение с радиоактивными отходами на предприятиях атомной отрасли / М. С. Хвостова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 1. – С. 97-106.

41. Шаталов, В. В. Анализ количественного состава и качественного состояния накопленных РАО / В. В. Шаталов // Бюл. по атомной энергии. – 2002. – № 7. – С. 15-24.
42. Siemens [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://new.siemens.com> – Дата доступа: 07.04.2021.
43. Sew-Eurodrive [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.seweurodrive.com> – Дата доступа: 07.04.21.
44. Pepperl+Fuchs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pepperl-fuchs.com> – Дата доступа: 07.04.2021.
45. ТР ТС 010/2011. О безопасности машин и оборудования: утв. 18.10.2011 г. № 823.
46. Научно-производственный комплекс приборов безопасности «КРОС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nprk-kros.ru> – Дата доступа: 07.04.2021.
47. Tenso-M [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tenso-m.ru> – Дата доступа: 07.04.2021.
48. Schneider Electric corporate Website [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.se.com> – Дата доступа: 07.04.2021.
49. CODESYS Group [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.codesys.com> – Дата доступа: 08.04.2021.
50. Кувшинников, В. С., Ковшов, Е. Е. 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.
51. Сервотехника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://servotechnica.ru> – Дата доступа: 08.06.2021.
52. Kuebler Group - Worldwide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kuebler.com> – Дата доступа: 08.06.2021.
53. Waycon Positionsmesstechnik [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.waycon.ru> – Дата доступа: 08.06.2021.
54. Щербаков, А. Протоколы прикладного уровня CAN-сетей / А. Щербаков // Современные технологии автоматизации. – 1999. – № 3. – С. 6-15.
55. Richards, P. A CAN physical layer discussion // Microchip Technology Inc. – 2002.
56. CAN in Automation (CiA): Controller Area Network (CAN) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.can-cia.org>. – Дата доступа: 09.06.2021.
57. Грибов И. Сетевые технологии CAN Обзор инструментальных средств / И. Грибов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2011. – №. 4. – С. 62-67.
58. CANopen Solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://canopensolutions.com>. – Дата доступа: 08.06.2021.
59. FESTO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.festo.com>. – Дата доступа: 01.06.21.
60. Stebulyanin, M. M., Kovshov, E. E., Kuvshinnikov, V. S. Interval Quadratic Connected Control Systems in Industrial Robotics and Mechatronics / M. M.

- Stebulyanin, E. E. Kovshov, V. S. Kuvshinnikov // *Procedia Computer Science*. – 2019. – Vol. 150. – P. 579-585.
61. Xu, S., Peng, H., Tang, Y. Preview path tracking control with delay compensation for autonomous vehicles / S. Xu, H. Peng, Y. Tang // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2020. – V. 22. – №. 5. – P. 2979-2989.
 62. Lee, H. J., Brell-Cokcan, S. Cartesian coordinate control for teleoperated construction machines / H. J. Lee, S. Brell-Cokcan // *Construction Robotics*. – 2021. – V. 5. – №. 1. – P. 1-11.
 63. Negri, R. B., Prado, A. F. A Novel Robust 3-D Path Following Control for Keplerian Orbits / R. B. Negri, A. F. Prado // *arXiv preprint arXiv:2012.01954*. – 2020.
 64. Афанасов, А. Л. Анализ методов планирования пути автономного мобильного устройства / А. Л. Афанасов // *Вопросы науки и образования*. – 2019. – № 17(64). – С. 9-17.
 65. Лю, В. Методы планирования пути в среде с препятствиями / В. Лю // *Математика и математическое моделирование*. – 2018. – № 01. – С. 15–58.
 66. Казаков, К. А. Обзор современных методов планирования движения / К. А. Казаков, В. А. Семенов // *Труды ИСП РАН*. – 2016. – № 4. – С. 241-294.
 67. Lande, D. V. The use of horizontal visibility graphs to identify the words that define the informational structure of a text / D. V. Lande, A. A. Snarskii, E. V. Yagunova, E. V. Pronoza // *Proceedings - 2013 12th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI 2013, Mexico City, 24–30 ноября 2013 года*. – Mexico City, 2013. – С. 209-215.
 68. Lande, D. V. Usage of horizontal visibility graphs in information analytics / D. V. Lande, A. A. Snarskii // *CEUR Workshop Proceedings : 17, Kyiv, 30 ноября 2017 года*. – Kyiv, 2017. – С. 86-91.
 69. Bezsudnov, I. V. From the time series to the complex networks: The parametric natural visibility graph / I. V. Bezsudnov, A. A. Snarskii // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2014. – Т. 414. – С. 53-60.
 70. Snarskii, A. A. Phase transition in the parametric natural visibility graph / A. A. Snarskii, I. V. Bezsudnov // *Physical Review E*. – 2016. – Т. 94. – № 4. – С. 042137.
 71. Гетман, А. Н. Применение графа видимости для анализа персистентности новообразований головного мозга / А. Н. Гетман, А. Н. Дудин // *Системный анализ в медицине (САМ 2016) : Материалы X международной научной конференции, Благовещенск, 22–23 сентября 2016 года / под общей редакцией В.П. Колосова*. – Благовещенск: Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания, 2016. – С. 59-64.
 72. Сорокин, А. А. Применение графа видимости при решении задачи поиска пути для мобильного робота / А. А. Сорокин, К. Т. Чан, Т. Х. Ч. Во // *Успехи современной науки и образования*. – 2017. – Т. 4. – № 4. – С. 66-69.
 73. Заева, К., Семёнов, А. Система поиска минимального пути в среде с полигональными препятствиями / К. Заева, А. Семёнов // *Графикон'2014*. – 2014. – С. 163-166.

74. Principles of Robot Motion-Theory, Algorithms , and Implementation / H. Choset [et al]. – London, England : MIT Press, 2005. – 603 p.
75. Improved RRT-Connect Algorithm Based on Triangular Inequality for Robot Path Planning / J. G. Kang [et al] // Sensors. – 2021. – V. 21. – №. 2. – P. 333.
76. Cheng, L. Improved hierarchical A-star algorithm for optimal parking path planning of the large parking lot / L. Cheng, C. Liu, B. Yan // 2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). – IEEE, 2014. – P. 695-698.
77. Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot / F. Duchoň [et al] // Procedia Engineering. – 2014. – V. 96. – P. 59-69.
78. An improved A-star algorithm considering water current, traffic separation and berthing for vessel path planning / C. Liu [et al] // Applied Sciences. – 2019. – V. 9. – №. 6. – P. 1057.
79. OctoPath: An OcTree-Based Self-Supervised Learning Approach to Local Trajectory Planning for Mobile Robots / B. Trăsnea [et al] // Sensors. – 2021. – V. 21. – №. 11. – P. 3606.
80. Jessup, J. Robust and efficient multi-robot 3d mapping with octree based occupancy grids / J. Jessup, S. N. Givigi, A. Beaulieu // 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). – IEEE, 2014. – P. 3996-4001.
81. Multi-granularity environment perception based on octree occupancy grid / G. Zhang [et al] // Multimedia Tools and Applications. – 2020. – V. 79. – №. 35. – P. 26765-26785.
82. Kaya, E. C., Tabus I. Neural Network Modeling of Probabilities for Coding the Octree Representation of Point Clouds / E. C. Kaya, I. Tabus // arXiv preprint arXiv:2106.06482. – 2021.
83. Программная реализация поиска пути для множества объектов с областями различной проходимости / В. Ф. Барабанов [и др.] // Вестник ВГТУ. – 2018. – № 5. – С. 33-41.
84. A potential field approach to path planning / Y. K. Hwang [et al] // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1992. – V. 8. – №. 1. – P. 23-32.
85. A potential field-based model predictive path-planning controller for autonomous road vehicles / Y. Rasekhipour [et al] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2016. – V. 18. – №. 5. – P. 1255-1267.
86. Гребенников, Р. В. Модель поведения толпы на основе локальных потенциальных полей / Р. В. Гребенников // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2009. – № 1. – С. 46-50.
87. Лю, В. Построение траекторий и моделирование движения летательного аппарата в среде с препятствиями : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 05.13.18, 05.13.01 / В. Лю; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана]. - Москва, 2018. - 140 с. : ил.
88. Fourer, R., Ma, J., Martin, R. K. Optimization Services: A Framework for Distributed Optimization / R. Fourer, J. Ma; R. K. Martin // Operations Research. – 2010. – № 58(6). – P. 1624-1636.

89. Орлов, А. И. Организационно-экономическое моделирование / А. И. Орлов. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2011. – 486 с.
90. Лубенец, Ю. В. Альтернативный коэффициент конкордации при наличии связанных рангов / Ю. В. Лубенец // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17. – № 1. – С. 40-45.
91. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов ; Акад. наук СССР. Матем. ин-т им. В. А. Стеклова. - Москва : Наука, 1965. - 464 с.
92. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. - М. : Наука, 1983. - 416 с.; 27 см.
93. Айвазян, С. А. [и др.] Прикладная статистика: Исследование зависимостей: Справ. изд. / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин; Под ред. С. А. Айвазяна. — М.: Финансы и статистика, 1985. — 487 с.
94. PathBench: A Benchmarking Platform for Classical and Learned Path Planning Algorithms / A. I. Toma [et al] // arXiv preprint arXiv:2105.01777. – 2021.
95. Beloglazov, D.A. Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments / D.A. Beloglazov. – Oxford, England : Butterworth-Heinemann, 2017. – 312 p.
96. Vu, N. T. T., Tran, N. P., Nguyen, N. H. Recurrent Neural Network-based Path Planning for an Excavator Arm under Varying Environment / N. T. T. Vu, N. P. Tran, N. H. Nguyen // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2021. – V. 11. – №. 3. – P. 7088-7093.
97. Nair, R. S., Supriya, P. Robotic Path Planning Using Recurrent Neural Networks / R. S. Nair, P. Supriya // 2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). – IEEE, 2020. – P. 1-5.
98. Path planning in dynamic environments using Generative RNNs and Monte Carlo tree search / S. Eiffert [et al] // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2020. – P. 10263-10269.
99. Mukherjee, S., Wang, S., Wallace, A. Interacting vehicle trajectory prediction with convolutional recurrent neural networks / S. Mukherjee, S. Wang, A. Wallace // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2020. – P. 4336-4342.
100. Sung, I., Choi, B., Nielsen, P. On the training of a neural network for online path planning with offline path planning algorithms / I. Sung, B. Choi, P. Nielsen // International Journal of Information Management. – 2021. – V. 57. – P. 102142.
101. Даринцев, О. В. Использование нейронной карты для планирования траектории мобильного робота / О. В. Даринцев, А. Б. Мигранов // Искусственный интеллект. – 2009. – № 3. – С. 300-307.
102. Даринцев, О. В., Мигранов, А. Б., Юдинцев, Б. С. Нейросетевой алгоритм планирования траекторий для группы мобильных роботов / О. В. Даринцев, А. Б. Мигранов, Б. С. Юдинцев // Искусственный интеллект. – 2011. – № 1. – С. 154-160.

103. Юдинцев, Б.С., Даринцев, О.В. Интеллектуальная система планирования траекторий мобильных роботов, построенная на сети Хопфилда / Б. С. Юдинцев, О. В. Даринцев // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – С. 199.
104. Юдинцев, Б. С. Синтез нейросетевой системы планирования траекторий для группы мобильных роботов / Б. С. Юдинцев // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 4. – С. 163-186.
105. Юдинцев, Б. С. Нейросетевая система планирования траекторий для группы мобильных роботов: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.13.01 / Юдинцев Богдан Сергеевич; [Место защиты: ФГБОУ ВО «УГАТУ»]. - Уфа, 2020. - 19 с.
106. Кувшинников, В. С., Ковшов, Е. Е. Автоматизация управления специализированным порталным 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.
107. Кувшинников, В.С., Ковшов, Е.Е. 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.
108. Aggarwal, C.C. An Introduction to Cluster Analysis. / C.C. Aggarwal // Data Clustering: Algorithms and Applications. – 2013.
109. Kaufman, L., Rousseeuw, P. J. Finding groups in data: An introduction to cluster analysis / L. Kaufman, P. J. Rousseeuw – New York, USA : John Wiley & Sons, 2009. – 344 p.
110. Kuvshinnikov, V., Kovshov, E. Special-Purpose Solid Radwaste Transfer Gantry Crane Control Automation Using Genetic Algorithm / V. Kuvshinnikov, E. Kovshov // 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2020. – P. 449-454.
111. Wang, Z., Yang, F., Yu, Y. L. Gaussian mutation in evolution strategies / Z. Wang, F. Yang, Y. L. Yu // Applications and Science of Computational Intelligence. – International Society for Optics and Photonics, 1998. – V. 3390. – P. 308-311.
112. Jupyter Project [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://jupyter.org> – Дата доступа: 05.07.21.
113. The official home of the Python Programming Language [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.python.org> – Дата доступа: 05.07.21.
114. The fundamental package for scientific computing with Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://numpy.org> – Дата доступа: 05.07.21.
115. Matplotlib: Python plotting [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://matplotlib.org> – Дата доступа: 05.07.21.
116. The home of Standard C++ on the web [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://isocpp.org> – Дата доступа: 05.07.21.

117. NET : Free. Cross-platform. Open Source [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dotnet.microsoft.com> – Дата доступа: 05.07.21.
118. Matplotlib for C++ documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://matplotlib-cpp.readthedocs.io> – Дата доступа: 05.07.21.
119. Кувшинников, В.С., Ковшов, Е.Е. 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.
120. Борисенко, Е.В., Мартынов, П.Н., Ковшов, Е.Е. Оценка эффективности интерактивного взаимодействия пользователя с компьютерной системой / Е.В. Борисенко, П.Н. Мартынов, Е.Е. Ковшов // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – 2009. – Т. 2. - № 2. - С. 47-49.
121. Даринцев, О. В. Система планирования движения группы мобильных микророботов на основе генетических алгоритмов / О. В. Даринцев, А. Б. Мигранов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2007. – № 3. – С. 163-173.
122. Лоборева, Л. А., Кожевников, М. М. Поиск траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями / Л. А. Лобарева, М. М. Кожевников // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 43-50.
123. Кожевников, М. М., Пашкевич, А. П., Чумаков, О. А. Планирование траекторий промышленных роботов-манипуляторов на основе нейронных сетей / М. М. Кожевников, А. П. Пашкевич, О. А. Чумаков // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2010. – №. 4 (50). – С. 54-61.
124. Kuvshinnikov, V. S., Kovshov, E. E. Improvement of specialized industrial manipulator movement control / V. S. Kuvshinnikov, E. E. Kovshov // ITM Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – V. 18. – P. 01004.
125. Kuvshinnikov, V. S., Kovshov, E. E. Machine shop portal manipulator movement path modeling for digital manufacturing / V. S. Kuvshinnikov, E. E. Kovshov // 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.
126. Кувшинников, В.С., Ковшов, Е.Е. Формирование траектории перемещения рабочего органа портального 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.

127. Kuvshinnikov, V. S., Kovshov, E. E. 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. – IOP Publishing, 2020. – V. 714. – №. 1. – P. 012015.
128. Bach, B., Pietriga, E., Fekete, J. D. Visualizing dynamic networks with matrix cubes / B. Bach, E. Pietriga, J. D. Fekete // Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems. – 2014. – P. 877-886.
129. Кувшинников, В. С., Ковшов, Е. Е. 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.
130. Кувшинников, В.С., Ковшов, Е.Е. Цифровые и информационные технологии при вспомогательном управлении порталным манипулятором бассейна выдержки / В.С. Кувшинников, Е.Е. Ковшов // Сб. докладов конф. молодых специалистов. – М.: НИКИЭТ, 2019. – Секция 7. – С. 1035–1046.
131. Wadell, H. Volume, shape, and roundness of quartz particles / H. Wadell // The Journal of Geology. – 1935. – V. 43. – №. 3. – P. 250-280.
132. Кувшинников, В. С., Ковшов, Е. Е. Энергоэффективное управление порталным манипулятором / В. С. Кувшинников, Е. Е. Ковшов // Цифровая трансформация в энергетике: Материалы Всероссийской научной конф. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 303-306.

Приложение А. Справки и акты о внедрении



НИКИМТ-АТОМСТРОЙ
РОСАТОМ

Акционерное общество «Научно-исследовательский
и конструкторский институт
монтажной технологии – Атомстрой»
(АО «НИКИМТ-Атомстрой»)

Алтуфьевское шоссе, д.43, стр.2, Москва, 127410, Россия
Тел.: +7 (495) 411 65 50, Факс: +7 (495) 411 65 52
E-mail: post@atomrus.ru, nikimatomstroy.ru
ОКПО 08621486, ОГРН 5087746235836
ИНН 7715719854, КПП 771501001

СПРАВКА ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Предоставленные ведущим инженером-программистом Кувшинниковым В.С. методика и программная реализация биоинспирированных алгоритмов для формирования маршрутов технологических операций мехатронного манипулятора участка электрохимической дезактивации как результат диссертационного исследования были рассмотрены на секции №8 «Информационные технологии и цифровые компьютерные системы» НТС АО «НИКИМТ-Атомстрой» (г. Москва).

В результате анализа научных материалов было установлено, что они представляют как научно-методический, так и практический интерес для совершенствования автономности и гибкости управления мехатронными установками автоматизированных технологических участков по утилизации радиоактивных отходов на объектах атомной энергетики.

Материалы диссертационной работы рекомендованы к применению в процессе разработки прикладного программного обеспечения для гибкого автоматизированного управления технологическими установками участков комплекса переработки твёрдых радиоактивных отходов и могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем управления различными автоматизированными технологическими участками на АЭС.

Главный метролог НИКИМТ
канд. техн. наук



С.В. СМУК



ЦЕНТР
КОМПЕТЕНЦИЙ



Справка о внедрении результатов диссертационной работы

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы

**Кувшинникова
Владимира Сергеевича**

успешно апробированы и внедрены в курс обучения специалистов
различным видам неразрушающего контроля согласно ГОСТ Р 56542-2019

Руководитель ОЦК



О.А. Толстых

АО «НИКИМТ-Атомстрой»

2021 г.

Акционерное общество
«Научно-исследовательский и
конструкторский институт
монтажной технологии - Атомстрой»
(АО «НИКИМТ-Атомстрой»)



Joint Stock Company
«Research and Development
Institute of Construction
Technology - Atomstroy»
(JSC «NIKIMT-Atomstroy»)

Алтужевское шоссе, д. 43, стр. 2,
Москва, 127410
Тел.: (495) 411-65-50, 411-65-51
Факс: (495) 411-65-52, 411-65-53
E-mail: post@atomrus.ru

ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

Altufjevskoe shosse st., h. 43, bld. 2,
Moscow, 127410
Tel.: (495) 411-65-50, 411-65-51
Fax : (495) 411-65-52, 411-65-53
E-mail: post@atomrus.ru



№ _____

На № _____ от _____

Кандидат технических наук,
начальник лаборатории
АО «НИКИМТ-Атомстрой»



/Горбачев В.И./

«16» июня 2020 года

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Кувшинникова Владимира Сергеевича

Методы и алгоритмы, разработанные в диссертационной работе Кувшинникова Владимира Сергеевича, связанные с решением научно-практических задач адаптивного планирования пространственных траекторий и управления распределённой мехатронной системой, рекомендованы к внедрению и реализации при создании автоматизированной системы неразрушающего контроля и ремонта облицовки бассейна выдержки объектов атомной энергетики и используются в Эксперт-Центре АО «НИКИМТ-Атомстрой», профессиональная деятельность которого связана, в том числе, с разработкой и внедрением комплексных промышленных систем неразрушающего контроля объектов и изделий.

Проведённая опытная эксплуатация разработанного программного модуля в составе прикладного программного обеспечения для неразрушающего контроля и ремонта облицовки бассейна выдержки подтвердила его работоспособность, что, в свою очередь, позволяет автоматизировать процесс управления перемещением промышленных роботов с декартовой кинематической схемой и мехатронных установок порталного и мостового типов, а использование предлагаемых автором методов и алгоритмов поиска пути обеспечивает повышение безопасности и снижение продолжительности цикла обслуживания.

Руководитель группы
«Эксперт-Центра»

/ Е.Ю. Аленичева /

Приложение Б. Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017661591

«Дистанционный контроль герметичности»

Правообладатель: *Акционерное общество
«Научно-исследовательский и конструкторский институт
монтажной технологии - Атомстрой» (RU)*

Авторы: *Ковшов Евгений Евгеньевич (RU), Косач Алиса
Анатольевна (RU), Кувшинников Владимир Сергеевич (RU)*

Заявка № **2017618555**

Дата поступления **24 августа 2017 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **17 октября 2017 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018617688

«Управление порталным манипулятором»

Правообладатель: *Акционерное общество
«Научно-исследовательский и конструкторский институт
монтажной технологии - Атомстрой» (RU)*

Авторы: *Ковшов Евгений Евгеньевич (RU),
Кувшинников Владимир Сергеевич (RU)*



Заявка № 2018614924

Дата поступления 16 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 июня 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020619327

«Управление регистрами PLC»

Правообладатель: *Акционерное общество
«Научно-исследовательский и конструкторский институт
монтажной технологии - Атомстрой» (RU)*

Авторы: *Ковшов Евгений Евгеньевич (RU),
Кувшинников Владимир Сергеевич (RU)*

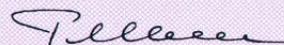
Заявка № **2020618466**

Дата поступления **05 августа 2020 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **17 августа 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ибраев**



Приложение Г. Управление пневматическими приводами

Таблица Г.1 – Перечень комбинаций состояния клапанов пневмоострова

Пневмораспределители			ПР 1		ПР 2		ПР 3		ПР 4		ПР 5	
Клапаны пневмораспределителей			Кл 1	Кл 2	Кл 3	Кл 4	Кл 5	Кл 6	Кл 7	Кл 8	Кл 9	Кл 10
Модуль	Пневмоцилиндр Пневмомотор	Выполняемая операция										
Модуль 1 Поиск течи стена	Ц 1	Подъём платформы	Откр.	Закр.	Закр.		Закр.	Закр.	Закр.	Закр.	Закр.	Закр.
		Опускание платформы	Закр.	Откр.	Закр.							
	ПМ 1	Телекамера ТК 1 вперёд	Закр.		Откр.	Закр.						
		Телекамера ТК 1 назад	Закр.		Закр.	Откр.						
Модуль 2 Поиск течи угол	Ц 2	Подъём платформы	Откр.	Закр.	Закр.							
		Опускание платформы	Закр.	Откр.	Закр.							
	ПМ 2	Телекамера ТК 2 вперёд	Закр.		Откр.	Закр.						
		Телекамера ТК 2 назад	Закр.		Закр.	Откр.						
Модуль 3 Зачистка	Ц 3	Подъём платформы	Откр.	Закр.	Закр.							
		Опускание платформы	Закр.	Откр.	Закр.							
	Ц 4	Рычаг поднят	Закр.		Откр.	Закр.						
		Рычаг опущен	Закр.		Закр.	Откр.						
	Ц 5	Щётка вперёд	Закр.		Закр.		Откр.	Закр.				
		Щётка назад	Закр.		Закр.		Закр.	Откр.				
	ПМ 3	Вращение щётки	Закр.		Закр.		Закр.		Откр.	Закр.		
		Неработающий пневмомотор	Закр.		Закр.		Закр.		Закр.			
	ПМ 4	Щётка вправо	Закр.		Закр.		Закр.		Закр.		Откр.	Закр.
		Щётка влево	Закр.		Закр.		Закр.		Закр.		Закр.	Откр.
Модуль 4 Наложение пластыря стена	Ц 6	Подъём платформы	Откр.	Закр.	Закр.		Закр.	Закр.	Закр.	Закр.	Закр.	Закр.
		Опускание платформы	Закр.	Откр.	Закр.							
Ц 7	Рычаг поднят	Закр.		Откр.	Закр.							
	Рычаг опущен	Закр.		Закр.	Откр.							
Модуль 5 Наложение пластыря угол	Ц 8	Подъём платформы	Откр.	Закр.	Закр.							
		Опускание платформы	Закр.	Откр.	Закр.							
	Ц 9	Рычаг поднят	Закр.		Откр.	Закр.						
Рычаг опущен		Закр.		Закр.	Откр.							

Приложение Д. Программный код функциональных блоков среднего уровня управления

```
FUNCTION_BLOCK WALK_CMD_TO_DRIVE
```

```
VAR_INPUT
```

```
    stat_MANUAL_mode: BOOL;
    cmd_move_X: CMD_MOVE;
    cmd_move_Y: CMD_MOVE;
    march_speed: DWORD;    (*маршевая скорость*)
    posit_speed: DWORD;    (*скорость позиционирования*)
    posit_range_x: DWORD; (*дистанция позиционирования по X*)
    posit_range_y: DWORD; (*дистанция позиционирования по Y*)
    curr_x_coord: DWORD;
    curr_y_coord: DWORD;
    stat_point_x_reached: BOOL;
    stat_point_y_reached: BOOL;
```

```
END_VAR
```

```
VAR_OUTPUT
```

```
    cmd_drive_X: CMD_DRIVE;
    cmd_drive_Y: CMD_DRIVE;
    stat_marching: BOOL;
    stat_positioning: BOOL;
```

```
END_VAR
```

```
VAR
```

```
END_VAR
```

(* Блок посвящен формированию удобных для управления приводами рамы и тележки команд: указываются скорость движения, направление и сигнал пуск. *)

```
    IF NOT stat_MANUAL_mode THEN
        IF stat_point_y_reached THEN
            cmd_drive_Y.cmd_go := FALSE;

            cmd_drive_X.cmd_go := cmd_move_x.cmd_go;
            cmd_drive_X.cmd_backward := curr_x_coord > cmd_move_x.cmd_coord;

            IF ( curr_x_coord < cmd_move_X.cmd_coord + posit_range_x ) AND (
curr_x_coord > cmd_move_X.cmd_coord - posit_range_x ) THEN
                cmd_drive_X.cmd_speed := posit_speed;
                stat_marching := FALSE;
                stat_positioning := cmd_move_x.cmd_go;
            ELSE
                cmd_drive_X.cmd_speed := march_speed;
                stat_marching := cmd_move_x.cmd_go;
                stat_positioning := FALSE;
            END_IF
        ELSE
            cmd_drive_X.cmd_go := FALSE;
            cmd_drive_Y.cmd_go := cmd_move_y.cmd_go;
            cmd_drive_Y.cmd_backward := curr_y_coord > cmd_move_y.cmd_coord;
```

```

        IF ( curr_y_coord < cmd_move_Y.cmd_coord + posit_range_y ) AND (
curr_y_coord > cmd_move_Y.cmd_coord - posit_range_y) THEN
            cmd_drive_Y.cmd_speed := posit_speed;
            stat_marching := FALSE;
            stat_positioning := cmd_move_y.cmd_go;
        ELSE
            cmd_drive_Y.cmd_speed := march_speed;
            stat_marching := cmd_move_y.cmd_go;
            stat_positioning := FALSE;
        END_IF
    END_IF
ELSE
    cmd_drive_X.cmd_go := FALSE;
    cmd_drive_Y.cmd_go := FALSE;
    stat_marching := FALSE;
    stat_positioning := FALSE;
END_IF
END_FUNCTION_BLOCK

```

FUNCTION_BLOCK LIFT_CMD_TO_DRIVE

VAR_INPUT

```

    stat_MANUAL_mode: BOOL;
    cmd_move_down_trig: BOOL;
    cmd_move_up_trig: BOOL;
    cmd_stp_trig: BOOL;
    march_speed: DWORD;      (*маршевая скорость*)
    posit_speed: DWORD;     (*скорость позиционирования*)
    lim_low: BOOL;
    lim_high_1: BOOL;
    lim_high_2: BOOL;
    lim_high_3: BOOL;

```

END_VAR

VAR_OUTPUT

```

    cmd_drive_Z: CMD_DRIVE;
    stat_marching_down: BOOL;
    stat_positioning_up: BOOL;
    stat_marching_up: BOOL;

```

END_VAR

VAR

```

    stat_walking: BOOL;
    stat_positioning: BOOL;
    walk_back: BOOL;

```

END_VAR

(* Блок посвящен формированию удобных для управления приводами лебёдки команд: указываются скорость движения, направление и сигнал пуск. *)

```

    IF NOT stat_MANUAL_mode THEN

```

```

        IF NOT(stat_walking) THEN (* not walking *)

```

```

            IF cmd_move_down_trig THEN

```

```

                stat_walking := TRUE;

```

```

                walk_back := FALSE;

```

```

        ELSIF cmd_move_up_trig THEN
            stat_walking := TRUE;
            walk_back := TRUE;
        END_IF
    ELSIF cmd_stp_trig THEN (* walking *)
        stat_walking := FALSE;
    ELSE

        IF walk_back THEN
            IF lim_high_2 OR lim_high_3 THEN
                stat_walking := FALSE;
            ELSIF lim_high_1 THEN
                stat_positioning := TRUE;
            ELSE
                stat_positioning := FALSE;
            END_IF
        ELSE
            stat_positioning := FALSE;
            IF lim_low THEN
                stat_walking := FALSE;
            END_IF
        END_IF

    END_IF
ELSE
    stat_walking := FALSE;
END_IF

(* применение логики для вывода *)
IF stat_positioning THEN
    cmd_drive_Z.cmd_speed := posit_speed;
ELSE
    cmd_drive_Z.cmd_speed := march_speed;
END_IF

cmd_drive_Z.cmd_backward := walk_back;
cmd_drive_Z.cmd_go := stat_walking;
stat_marching_down := NOT walk_back AND stat_walking;
stat_positioning_up := walk_back AND stat_walking AND stat_positioning;
stat_marching_up := walk_back AND stat_walking AND NOT stat_positioning;

```

END_FUNCTION_BLOCK

FUNCTION_BLOCK NAVIGATE_WALK_CMD

VAR_INPUT

```

    stat_walking: BOOL;
    trig_walk_start: BOOL;
    next_m: BYTE;
    dest_x_coord: DWORD;
    dest_y_coord: DWORD;

```

END_VAR

```

VAR_OUTPUT
  cmd_move_X: CMD_MOVE;
  cmd_move_Y: CMD_MOVE;
END_VAR
VAR
  prev_next_m: BYTE;
  dest_m_xy: M_DATA;
  flag_next_m_changed: BOOL;
END_VAR

```

(* При смене следующей целевой магистрали - получаем точные координаты (если магистраль протяженная вдоль одной из осей, то координата по этой оси - 0, а если магистраль является пересечением, то обе координаты заданы численно) *)

```

IF next_m <> prev_next_m THEN
  dest_m_xy := m_xy_arr[next_m];
  prev_next_m := next_m;
  flag_next_m_changed := TRUE;
ELSE
  flag_next_m_changed := FALSE;
END_IF

```

(* При начале движения или смене следующей магистрали формируем команды для перемещения вдоль осей x и y, содержащие целевую координату и сигнал двигаться/не двигаться *)

```

IF trig_walk_start OR flag_next_m_changed THEN
  IF next_m = 0 THEN
    cmd_move_X.cmd_coord := dest_x_coord;
    cmd_move_Y.cmd_coord := dest_y_coord;
    cmd_move_X.cmd_go := TRUE;
    cmd_move_Y.cmd_go := TRUE;
  ELSE
    IF dest_m_xy.m_x_num = 0 THEN
      (* cmd_drive_x.cmd_coord := 0; *)
      cmd_move_X.cmd_go := FALSE;
    ELSE
      cmd_move_X.cmd_coord := pos_x_arr[dest_m_xy.m_x_num];
      cmd_move_X.cmd_go := TRUE;
    END_IF
    IF dest_m_xy.m_y_num = 0 THEN
      (* cmd_drive_y.cmd_coord := 0; *)
      cmd_move_Y.cmd_go := FALSE;
    ELSE
      cmd_move_Y.cmd_coord := pos_y_arr[dest_m_xy.m_y_num];
      cmd_move_Y.cmd_go := TRUE;
    END_IF
  END_IF
  ELSIF NOT stat_walking THEN
    cmd_move_X.cmd_go := FALSE;
    cmd_move_Y.cmd_go := FALSE;
  END_IF
END_FUNCTION_BLOCK
FUNCTION_BLOCK CHECK_POINT_REACHED

```

```

VAR_INPUT
    trig_walk_start: BOOL;
    cmd_move_X: CMD_MOVE;
    cmd_move_Y: CMD_MOVE;
    curr_x_coord: DWORD;
    curr_y_coord: DWORD;
    coord_accuracy: DWORD;
END_VAR
VAR
    point_x_coord: DWORD;
    point_y_coord: DWORD;

    x_reached: BOOL;
    y_reached: BOOL;

END_VAR

VAR_OUTPUT
    stat_point_reached: BOOL;
    stat_point_x_reached: BOOL;
    stat_point_y_reached: BOOL;
END_VAR

(* Блок посвящен проверке достижения текущей точки траектории и отдельно x и y
координат текущей точки с учетом точности позиционирования coord_accuracy. *)
point_x_coord := cmd_move_X.cmd_coord;
point_y_coord := cmd_move_Y.cmd_coord;

IF (NOT cmd_move_X.cmd_go) OR (point_x_coord = 0) OR ( (curr_x_coord >=
(point_x_coord - coord_accuracy)) AND ( curr_x_coord <= (point_x_coord + coord_accuracy) ) )
THEN
    x_reached := TRUE;
    stat_point_x_reached := TRUE;
ELSE
    x_reached := FALSE;
    stat_point_x_reached := FALSE;
END_IF

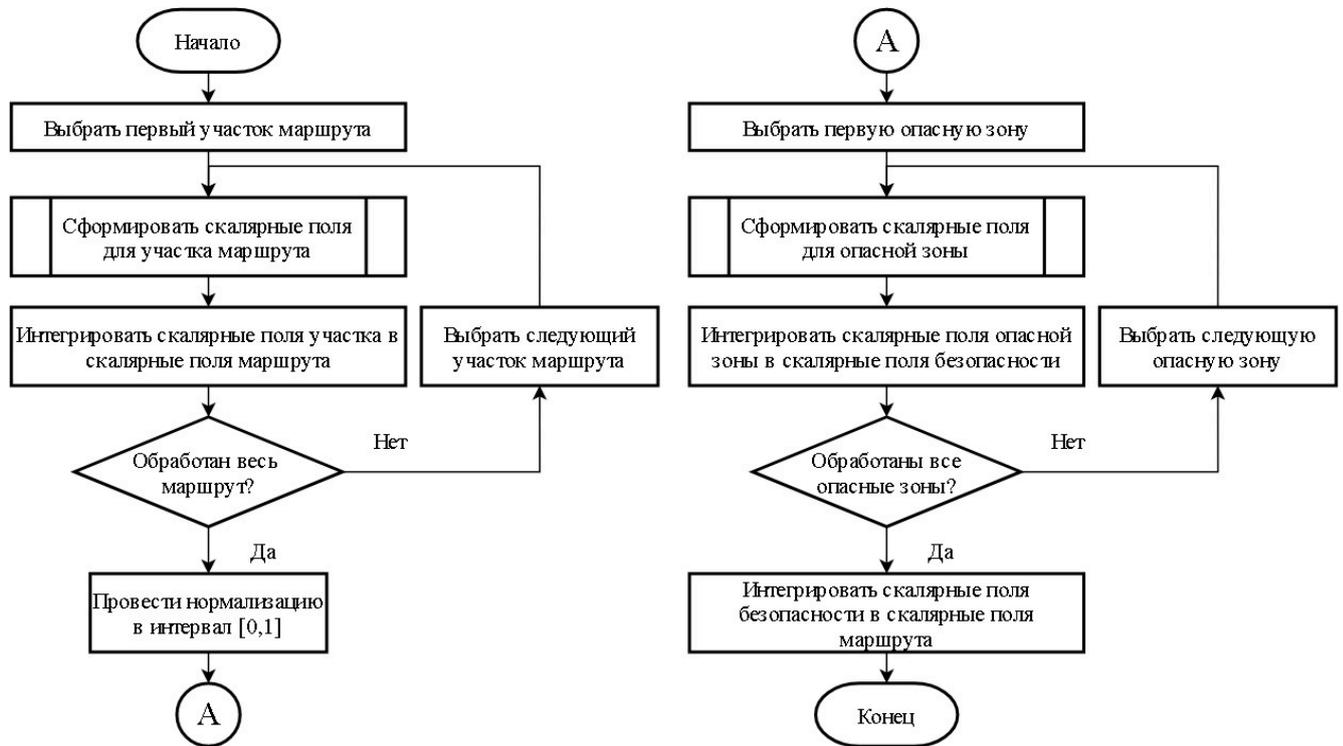
IF (NOT cmd_move_Y.cmd_go) OR (point_y_coord = 0) OR ( (curr_y_coord >=
(point_y_coord - coord_accuracy)) AND ( curr_y_coord <= (point_y_coord + coord_accuracy) ) )
THEN
    y_reached := TRUE;
    stat_point_y_reached := TRUE;
ELSE
    y_reached := FALSE;
    stat_point_y_reached := FALSE;
END_IF

stat_point_reached := (NOT trig_walk_start) AND x_reached AND y_reached;

END_FUNCTION_BLOCK

```

Приложение Е. Алгоритмы цифрового представления данных и генетического поиска



Приложение Ж. Программный код цифрового представления технологического маршрута в виде скалярных полей

```

import numpy as np

Plant_data = np.load('GA_data/Plant_data.npz', allow_pickle = True)

dot_type = np.dtype([('x', 'i'), ('y', 'i')])
tech_points = Plant_data['tech_points']
route = Plant_data['route']
tech_pts = np.array(tech_points, dtype=dot_type)
obstacles = Plant_data['obstacles']

def gauss(par, sigma=5, par_shift = 1):
    return np.exp( ( -(par-par_shift)**2 )/( 2*(sigma**2) ) )

get_ipython().run_line_magic('matplotlib', 'widget')

X_max = 11000
Y_max = 8000
N = 111
tmp_border = (X_max-Y_max)/2
X = np.linspace(0, X_max, N)
Y = np.linspace(0-tmp_border, Y_max+tmp_border, N)
X, Y = np.meshgrid(X, Y)

Z = np.ones(shape = (N, N))
Z_vert_fwd = Z.copy()
Z_vert_bwd = Z.copy()
Z_hor_fwd = Z.copy()
Z_hor_bwd = Z.copy()

#переменные для хранения параметров линий полного маршрута
a_list = []
b_list = []
c_list = []

#Расчёт векторного поля в соответствии с маршрутом

#предварительные параметры функции гаусса
gauss_height = 1
gauss_width = 1000

def check_gauss_width(gauss_width):
    X_max = 11000
    Y_max = 8000
    N = 111
    tmp_border = (X_max-Y_max)/2
    X = np.linspace(0, X_max, N)

```

```

Y = np.linspace(0-tmp_border, Y_max+tmp_border, N)
X, Y = np.meshgrid(X, Y)

Z = np.ones(shape = (N, N))
Z_vert_fwd = Z.copy()
Z_vert_bwd = Z.copy()
Z_hor_fwd = Z.copy()
Z_hor_bwd = Z.copy()

for i in range(1, len(route)):
    tmp_x = tech_pts[route[i-1:i+1]]['x']
    tmp_y = tech_pts[route[i-1:i+1]]['y']
    a_list.append( tmp_y[1]-tmp_y[0] )
    b_list.append( tmp_x[1]-tmp_x[0] )
    c_list.append( tmp_x[0]*tmp_y[1] - tmp_y[0]*tmp_x[1] )

    if tmp_x[0] == tmp_x[1]:
        pass
        tmpZ_vert = gauss(Y, gauss_width, (b_list[-1]*Y+c_list[-1])/a_list[-1])*gauss_height
        tmp_vert_decay1 = np.where( Y <= tmp_y.min(), gauss(Y, gauss_width, tmp_y.min() ),
gauss_height)
        tmp_vert_decay2 = np.where( Y >= tmp_y.max(), gauss(Y, gauss_width, tmp_y.max() ),
gauss_height)
        tmp_vert_decay = tmp_vert_decay1*tmp_vert_decay2
        tmpZ_vert *= tmp_vert_decay
        if a_list[-1]>=0:
            Z_vert_fwd += tmpZ_vert
            Z_hor_fwd += gauss_height/2
        else:
            Z_vert_bwd += tmpZ_vert
            Z_hor_bwd += gauss_height/2

    elif tmp_y[0] != tmp_y[1]:
        tmpZ_hor = gauss(X, gauss_width, (a_list[-1]*X.T-c_list[-1])/b_list[-1])*gauss_height
        tmp_hor_decay1 = np.where( X <= tmp_x.min(), gauss(X, gauss_width, tmp_x.min() ),
gauss_height)
        tmp_hor_decay2 = np.where( X >= tmp_x.max(), gauss(X, gauss_width, tmp_x.max() ),
gauss_height)
        tmp_hor_decay = tmp_hor_decay1*tmp_hor_decay2
        tmpZ_hor *= tmp_hor_decay
        if b_list[-1]>=0:
            Z_hor_fwd += tmpZ_hor
            Z_vert_fwd += gauss_height/2
        else:
            Z_hor_bwd += tmpZ_hor
            Z_vert_bwd += gauss_height/2

    if tmp_y[0] == tmp_y[1]:
        pass
        tmpZ_hor = gauss(Y, gauss_width, (a_list[-1]*X.T-c_list[-1])/b_list[-1])*gauss_height
        tmp_hor_decay1 = np.where( X <= tmp_x.min(), gauss(X, gauss_width, tmp_x.min() ),
gauss_height)

```

```

    tmp_hor_decay2 = np.where( X >= tmp_x.max(), gauss(X, gauss_width, tmp_x.max() ),
    gauss_height)
    tmp_hor_decay = tmp_hor_decay1*tmp_hor_decay2
    tmpZ_hor *= tmp_hor_decay
    if b_list[-1]>=0:
        Z_hor_fwd += tmpZ_hor
        Z_vert_fwd += gauss_height/2
    else:
        Z_hor_bwd += tmpZ_hor
        Z_vert_bwd += gauss_height/2

    elif tmp_x[0] != tmp_x[1]:
        tmpZ_vert = gauss(X, gauss_width, (b_list[-1]*Y+c_list[-1])/a_list[-1])*gauss_height
        tmp_vert_decay1 = np.where( Y <= tmp_y.min(), gauss(Y, gauss_width, tmp_y.min() ),
    gauss_height)
        tmp_vert_decay2 = np.where( Y >= tmp_y.max(), gauss(Y, gauss_width, tmp_y.max() ),
    gauss_height)
        tmp_vert_decay = tmp_vert_decay1*tmp_vert_decay2
        tmpZ_vert *= tmp_vert_decay
        if a_list[-1]>=0:
            Z_vert_fwd += tmpZ_vert
            Z_hor_fwd += gauss_height/2
        else:
            Z_vert_bwd += tmpZ_vert
            Z_hor_bwd += gauss_height/2

    cut_y_amount = int( tmp_border/(X_max/(N-1)) )
    X = X[cut_y_amount:-cut_y_amount, :]
    Y = Y[cut_y_amount:-cut_y_amount, :]

    Z_hor_fwd = Z_hor_fwd[cut_y_amount:-cut_y_amount, :]
    Z_hor_bwd = Z_hor_bwd[cut_y_amount:-cut_y_amount, :]
    Z_vert_fwd = Z_vert_fwd[cut_y_amount:-cut_y_amount, :]
    Z_vert_bwd = Z_vert_bwd[cut_y_amount:-cut_y_amount, :]

    Z_hor_fwd /= Z_hor_fwd.max()
    Z_hor_bwd /= Z_hor_bwd.max()
    Z_vert_fwd /= Z_vert_fwd.max()
    Z_vert_bwd /= Z_vert_bwd.max()

    k = 0.1
    return(( (1.0-Z_hor_fwd.min(), 1.0-Z_hor_bwd.min(), 1.0-Z_vert_fwd.min(), 1.0-
    Z_vert_bwd.min()),
        (np.power(np.gradient(Z_hor_fwd), 2).sum()*k, np.power(np.gradient(Z_hor_bwd),
    2).sum()*k, np.power(np.gradient(Z_vert_fwd), 2).sum()*k, np.power(np.gradient(Z_vert_bwd),
    2).sum()*k) ))

pars = np.array([check_gauss_width(i*50) for i in range(1, 400)])

#Подбор параметров формирования поля
p_max = np.argmax( pars[:,0].sum(axis=1)*100-pars[:,1].sum(axis=1) )

```

```
#Расчёт влияния препятствий
```

```
gauss_height = 1
gauss_width = 300
```

```
for (x1,x2,y1,y2) in obstacles:
```

```
    tmp_obst_v1 = np.where( X <= x1, gauss(X, gauss_width, x1 ), gauss_height)
    tmp_obst_v2 = np.where( X >= x2, gauss(X, gauss_width, x2 ), gauss_height)
    tmp_obst_h1 = np.where( Y <= y1, gauss(Y, gauss_width, y1 ), gauss_height)
    tmp_obst_h2 = np.where( Y >= y2, gauss(Y, gauss_width, y2 ), gauss_height)
```

```
    tmp_obst_v_decay1 = np.where( Y <= y1, gauss(Y, gauss_width, y1 ), gauss_height)
    tmp_obst_v_decay2 = np.where( Y >= y2, gauss(Y, gauss_width, y2 ), gauss_height)
    tmp_obst_h_decay1 = np.where( X <= x1, gauss(X, gauss_width, x1 ), gauss_height)
    tmp_obst_h_decay2 = np.where( X >= x2, gauss(X, gauss_width, x2 ), gauss_height)
    obst_v = gauss_height-tmp_obst_v_decay1*tmp_obst_v_decay2*tmp_obst_v1*tmp_obst_v2
    obst_h = gauss_height-tmp_obst_h_decay1*tmp_obst_h_decay2*tmp_obst_h1*tmp_obst_h2
```

```
    Z_hor_fwd *= obst_h
    Z_hor_bwd *= obst_h
    Z_vert_fwd *= obst_v
    Z_vert_bwd *= obst_v
```

```
#Сохранение в файл
```

```
np.savez('GA_data/Map_data', X=X, Y=Y, Z_hor_fwd=Z_hor_fwd, Z_hor_bwd=Z_hor_bwd,
Z_vert_fwd=Z_vert_fwd, Z_vert_bwd=Z_vert_bwd)
```

Приложение И. Программный код алгоритма эволюционного поиска решения

```

import numpy as np
from collections import namedtuple
import copy
import random as rnd

Plant_data = np.load('GA_data/Plant_data.npz', allow_pickle = True)
Map_data = np.load('GA_data/Map_data.npz', allow_pickle = True)

dot_type = np.dtype([('x', 'i'), ('y', 'i')])
tech_points = Plant_data['tech_points']
route = Plant_data['route']
tech_pts = np.array(tech_points, dtype=dot_type)

#Границы координат начальных и конечных точек магистральных линий
x_min = tech_pts[1:]['x'].min()
x_max = tech_pts[1:]['x'].max()
y_min = tech_pts[1:]['y'].min()
y_max = tech_pts[1:]['y'].max()

#Масштаб по осям
x_scale = Map_data['Y'][1, 0]
y_scale = Map_data['X'][0, 1]

#Границы в масштабе
x_min_scl = int(x_min/x_scale)
x_max_scl = int(x_max/x_scale)
y_min_scl = int(y_min/y_scale)
y_max_scl = int(y_max/y_scale)

#Класс хромосомы
class Chromosome(object):
    def __init__(self):
        #Constructor
        self.x1_scl = rnd.randint(x_min_scl, x_max_scl)
        self.x2_scl = rnd.randint(x_min_scl, x_max_scl)
        self.y1_scl = rnd.randint(y_min_scl, y_max_scl)
        self.y2_scl = rnd.randint(y_min_scl, y_max_scl)
        scheme = None
        fitness = None
    def __str__(self):
        #Строковое отображение
        return "x1 {}; y1 {}; x2 {}; y2 {}; scheme {}; fitness {}".format(self.x1_scl, self.y1_scl,
self.x2_scl, self.y2_scl, self.scheme, self.fitness)

#Расчёт приспособленности
def fitness(chromosome, Z_hor_data_name, Z_vert_data_name):
    x1_scl = min(chromosome.x1_scl, chromosome.x2_scl)

```

```

y1_scl = min(chromosome.y1_scl, chromosome.y2_scl)
x2_scl = max(chromosome.x1_scl, chromosome.x2_scl)
y2_scl = max(chromosome.y1_scl, chromosome.y2_scl)

x1_scl = max(x1_scl, x_min_scl)
y1_scl = max(y1_scl, y_min_scl)
x2_scl = min(x2_scl, x_max_scl)
y2_scl = min(y2_scl, y_max_scl)

fx1_y1 = Map_data[Z_hor_data_name][y1_scl:x1_scl].sum()
fx1_y2 = Map_data[Z_hor_data_name][y2_scl:x1_scl].sum()
fx2_y1 = Map_data[Z_hor_data_name][y1_scl:x2_scl:].sum()
fx2_y2 = Map_data[Z_hor_data_name][y2_scl:x2_scl:].sum()

fy1_x1 = Map_data[Z_vert_data_name][:y1_scl,x1_scl].sum()
fy1_x2 = Map_data[Z_vert_data_name][:y1_scl,x2_scl].sum()
fy2_x1 = Map_data[Z_vert_data_name][y2_scl:,x1_scl].sum()
fy2_x2 = Map_data[Z_vert_data_name][y2_scl:,x2_scl].sum()

fx1x2_y1 = Map_data[Z_hor_data_name][y1_scl,x1_scl:x2_scl+1].sum()
fx1x2_y2 = Map_data[Z_hor_data_name][y2_scl,x1_scl:x2_scl+1].sum()

fy1y2_x1 = Map_data[Z_vert_data_name][y1_scl:y2_scl+1,x1_scl].sum()
fy1y2_x2 = Map_data[Z_vert_data_name][y1_scl:y2_scl+1,x2_scl].sum()

Scheme = namedtuple('Scheme', 'weight scheme')
schemes = [Scheme(fx1_y1 + fx1x2_y1 + fx2_y2 + fy1_x1 + fy1y2_x2 + fy2_x2, 1),
            Scheme(fx1_y1 + fx1x2_y2 + fx2_y2 + fy1_x1 + fy1y2_x1 + fy2_x2, 2),
            Scheme(fx1_y2 + fx1x2_y1 + fx2_y1 + fy1_x2 + fy1y2_x1 + fy2_x1, 3),
            Scheme(fx1_y2 + fx1x2_y2 + fx2_y1 + fy1_x2 + fy1y2_x2 + fy2_x1, 4)]
fit = max(schemes, key = lambda sub: sub[0])

chromosome.x1_scl = x1_scl
chromosome.x2_scl = x2_scl
chromosome.y1_scl = y1_scl
chromosome.y2_scl = y2_scl
chromosome.scheme = fit.scheme
chromosome.fitness = fit.weight

return fit.weight

#Оператор ранжирования
def get_winners(breed_num, elit_num):
    sample = np.random.normal(0, elit_num, breed_num)
    sample = (abs(sample)).astype(int)
    return sample

#Оператор скрещивания
def crossover(parents, children):
    cross_attr_list = list(vars(parents[0]).keys())[:-2]

    while len(cross_attr_list):

```

```

attr_num = rnd.randint(0, len(cross_attr_list)-1)

cross_shift = rnd.randint(1, 7)
tmp1 = getattr(parents[0], cross_attr_list[attr_num])
tmp2 = getattr(parents[1], cross_attr_list[attr_num])
setattr(children[0], cross_attr_list[attr_num], (tmp1&(255<<cross_shift)|(tmp2&(255>>(8-
cross_shift))))
setattr(children[1], cross_attr_list[attr_num], (tmp2&(255<<cross_shift)|(tmp1&(255>>(8-
cross_shift))))
cross_attr_list.pop(attr_num)

if rnd.randint(0, 100) < 25:
    pass
else:
    break

return children

#Оператор мутации
def mutate(children):
    mut_attr = rnd.choice(list(vars(children[0]).keys())[:-2])

    bit1 = rnd.randint(0, 7)
    tmp = getattr(children[0], mut_attr)+rnd.randint(-1,1)
    setattr(children[0], mut_attr, tmp)

    bit1 = rnd.randint(0, 7)
    tmp = getattr(children[1], mut_attr)+rnd.randint(-1,1)
    setattr(children[1], mut_attr, tmp)

    return

#Оператор спаривания
def pair(pop, elit_num, breed_num, cross_prob, mut_prob):
    parents_nums = get_winners(breed_num*2, elit_num)
    breed = []
    for i in range(0, breed_num*2-1, 2):
        parents = pop[parents_nums[i]], pop[parents_nums[i+1]]
        children = copy.deepcopy(parents)
        if rnd.randint(0, 100) < cross_prob :
            children = crossover(parents, children)
            if rnd.randint(0, 100) < mut_prob :
                mutate(children)
        else:
            children = tuple(parents)
        breed += children
    return breed

#Оператор отбора
def select(pop, pop_size, elit_num, Z_hor_data_name, Z_vert_data_name):
    pop.sort(key=lambda chrom: fitness(chrom, Z_hor_data_name, Z_vert_data_name), reverse=True)
    del pop[pop_size:]

```

```

best = pop[:elit_num]
return best

#Генетический поиск
def procGA(Z_hor_data_name, Z_vert_data_name, pop_size, elit_num, breed_num, cross_prob,
mut_prob, generations, fitness_data):
    #Первое поколение
    pop = [Chromosome() for _ in range(pop_size)]
    best = select(pop, pop_size, elit_num, Z_hor_data_name, Z_vert_data_name)
    total_generations = 0
    stable = 0
    last_best = 0
    #Поиск
    while (total_generations < generations)and(stable < generations//10):
        breed = pair(pop, elit_num, breed_num, cross_prob, mut_prob)
        pop += breed
        best = select(pop, pop_size, elit_num, Z_hor_data_name, Z_vert_data_name)
        if (best==last_best)and( (fitness_data[-1][1]-fitness_data[-1][0])/fitness_data[-1][1] < 0.01 ):
            stable += 1
        else:
            stable = 0
            last_best = best
            fitness_data.append([pop[-1].fitness, pop[0].fitness])
    return best[0]

pop_size = 100
elit_num = 5
breed_num = pop_size//2
cross_prob = 80
mut_prob = 30
generations = 50

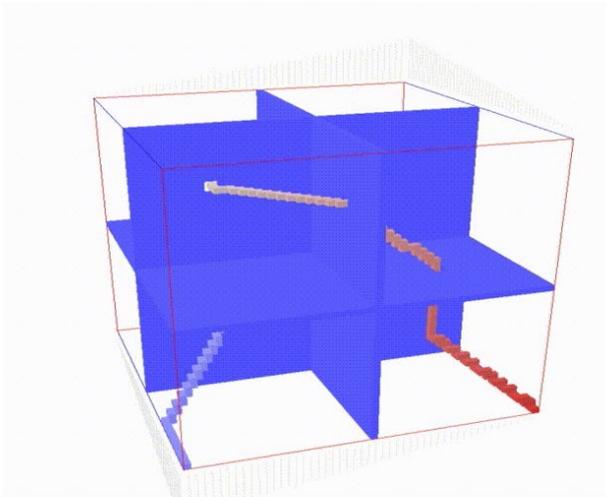
fitness_data_fwd = []
fitness_data_bwd = []

best_chr_fwd = procGA("Z_hor_fwd", "Z_vert_fwd ", pop_size, elit_num, breed_num, cross_prob,
mut_prob, generations, fitness_fig_data_fwd)
best_chr_bwd = procGA("Z_hor_bwd ", "Z_vert_bwd", pop_size, elit_num, breed_num, cross_prob,
mut_prob, generations, fitness_fig_data_bwd)

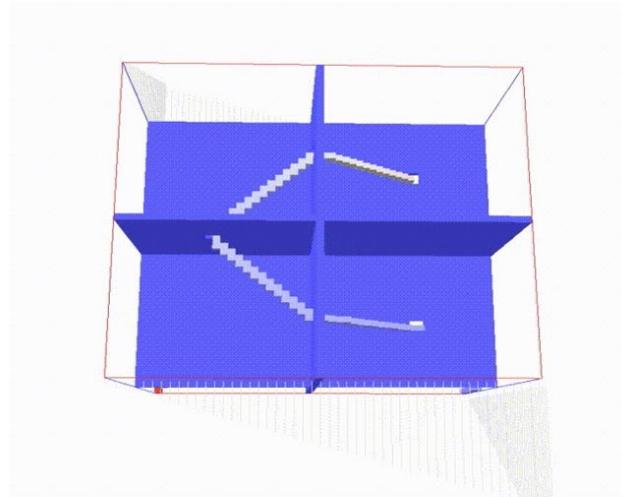
#Сохранение результатов
np.savez('GA_data/MainLines_data', fwd_mainlines = best_chr_fwd, bwd_mainlines = best_chr_bwd)

```

Приложение К. Результаты вычислительных экспериментов с моделью нейронной карты

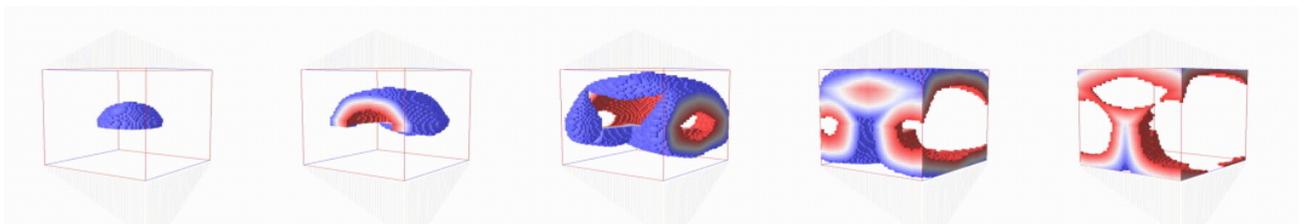


Вид спереди

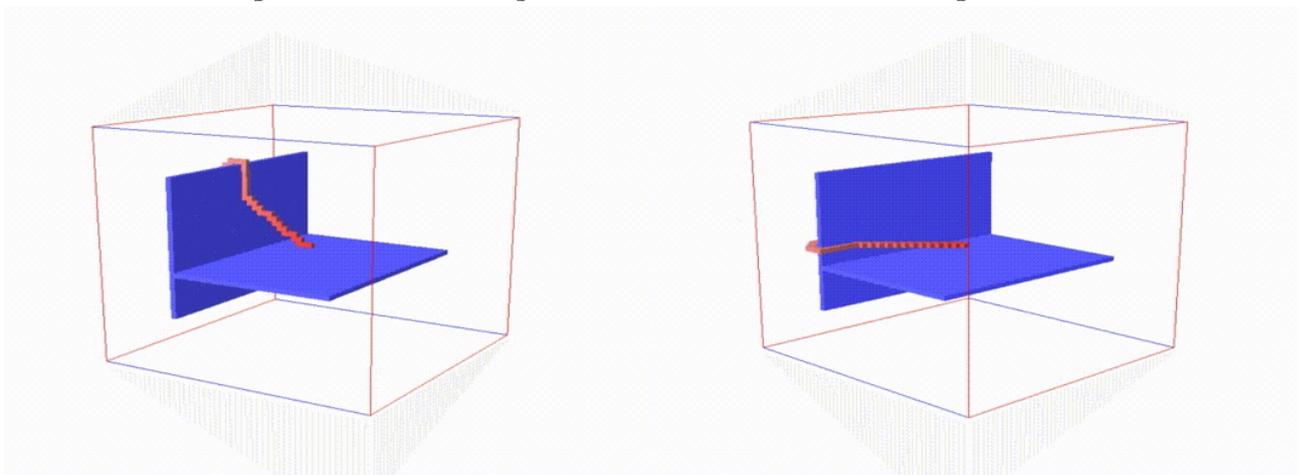


Вид сзади

Траектория в трёхмерном лабиринте



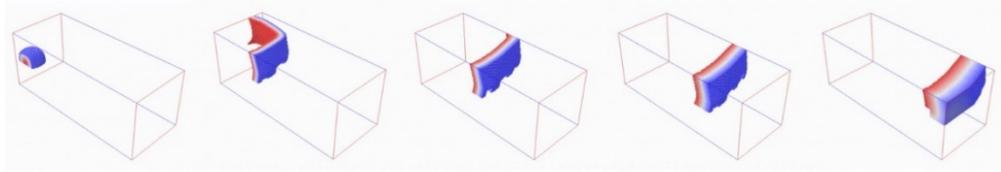
Огибание препятствий эквискалярными поверхностями нейронной карты при активации для среды с повышенной ценой набора высоты



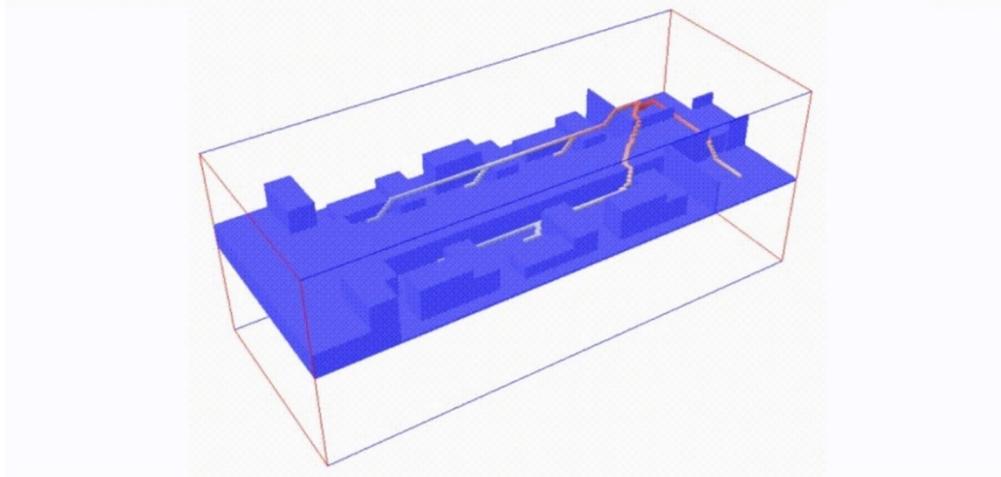
Короткий путь

Выгодный путь

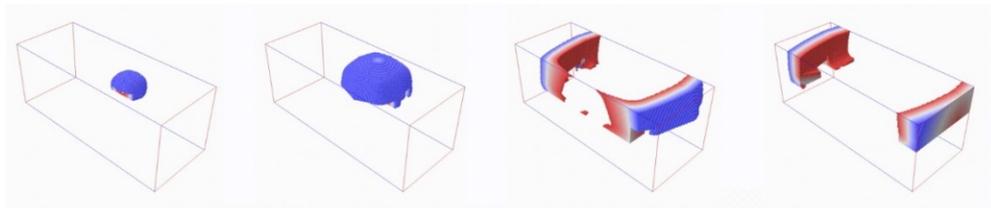
Рисунок К.2 – Пример влияния неоднородности рабочей зоны на способ обхода препятствия

Приложение Л. Нейронная карта для производственного участка

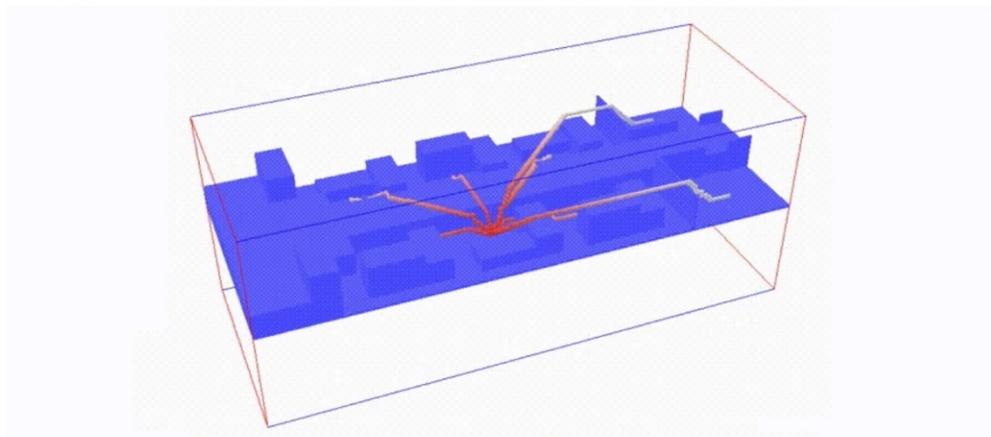
Эквискалярные поверхности



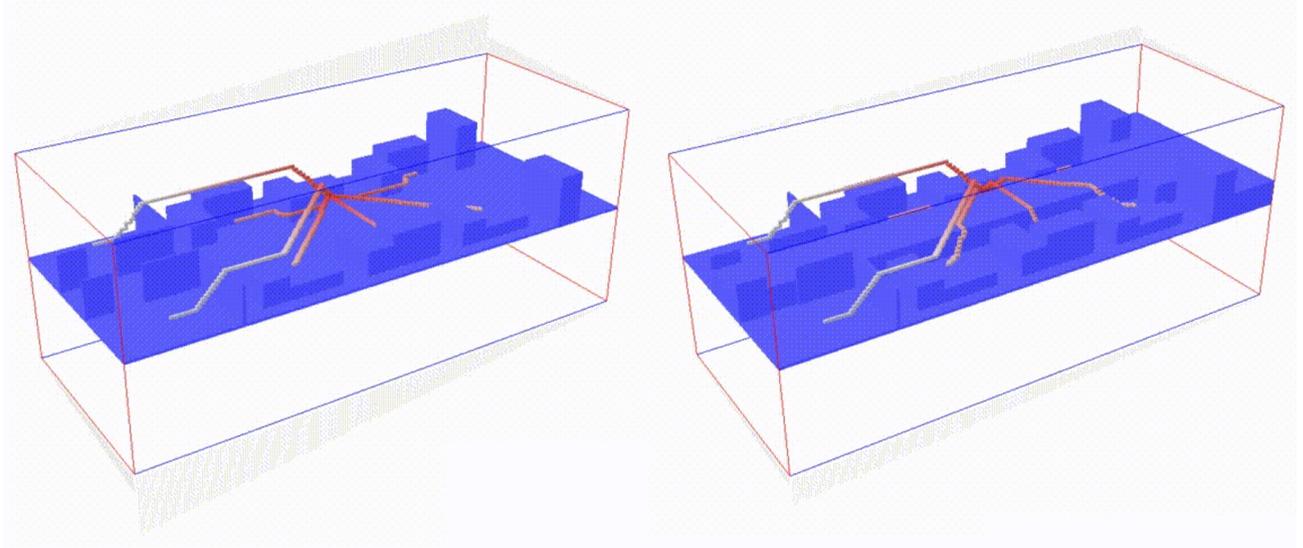
Траектории для участка складирования



Эквискалярные поверхности



Траектории для производственной ячейки



Траектории для автоматического режима

Траектории с учетом безопасного коридора

Рисунок Л.3 – Траектории для позиции в зоне производственной ячейки в условиях автономной работы участка и соблюдения безопасного коридора

Приложение М. Результаты вычислительных экспериментов к Главе 4

Таблица М.1 – Расчеты приведённого отличия между совершенной работой при перемещении рабочего модуля по кратчайшим траекториям без учёта неоднородности рабочей зоны и с учётом неоднородности $A_{П}=100 \cdot (A_{К}-A_{Н})/A_{К}$

Координаты целевого участка. (размер 10x10x10см)								
Ось Z = 100	Ось X	120	100	80	60	40	20	0
	Ось Y							
	0	1,30	2,00	2,74	0,71	0,71	X	X
	20	2,17	X	X	X	X	3,39	1,55
	40	2,79	X	X	X	X	X	3,06
	60	3,40	4,32	3,09	0,46	0,92	3,31	4,10

Координаты целевого участка. (размер 10x10x10см)								
Ось Z = 150	Ось X	120	100	80	60	40	20	0
	Ось Y							
	0	5,79	7,06	6,56	0,35	0,35	X	X
	20	3,06	X	X	X	X	6,99	7,49
	40	2,86	X	X	X	X	X	7,80
	60	9,08	9,97	4,89	1,03	2,69	7,15	9,62

Координаты целевого участка. (размер 10x10x10см)								
Ось Z = 200	Ось X	120	100	80	60	40	20	0
	Ось Y							
	0	12,66	12,14	10,41	1,45	1,45	X	X
	20	3,00	X	X	X	4,99	10,98	13,29
	40	3,08	X	X	X	5,38	X	14,20
	60	7,94	12,80	6,31	1,60	2,44	12,23	13,63