

На правах рукописи



Мельниченко Маркел Андреевич

**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель:

ГОРЬКАВЫЙ Михаил Александрович кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и инновационные технологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Официальные оппоненты:

ШЕЛЕНОК Евгений Анатольевич, доктор технических наук, доцент, профессор высшей школы кибернетики и цифровых технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет»

ЗАКАМАЛДИН Андрей Андреевич, кандидат технических наук, главный специалист по автоматизации, Общество с ограниченной ответственностью «Электра +»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится 29 ноября 2024 г. в 15:30 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.140.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, ауд. 201-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», https://sovet.knastu.ru/diss_defense

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
99.2.140.02



А.С. Гудим

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из наиболее приоритетных направлений современного производства является автоматизация технологических процессов на основе роботизированных технологических комплексов (РТК). Роботизация промышленности обеспечивает существенное повышение производительности и качества выпускаемой продукции, однако, в то же время, влечет за собой увеличение энергопотребления, за счет замещения значительной доли ручного труда машинным и повышения концентрации высокотехнологичного роботизированного оборудования на производственных предприятиях. В связи с этим приобретают особую актуальность вопросы оптимизации интегральных показателей качества функционирования, в частности, энергетической эффективности РТК в условиях повышения уровня автоматизации производства за счет применения роботизированной техники.

На сегодняшний день большая часть алгоритмов проектирования технологий изготовления изделий с применением промышленных роботов (ПР) не предусматривает наличия методов повышения ее эффективности за счет реализации системного подхода к целям и задачам процесса. Зачастую, комплексная оценка целесообразности и потенциала автоматизации операций с применением робототехнических систем невозможна по причине отсутствия унифицированных инструментов оптимизации роботизированных технологических процессов (в частности по критерию минимизации энергопотребления). Непринятие во внимание комплекса факторов, зачастую демонстрирует мнимый общий положительный эффект от роботизации – снижение трудозатрат на фоне значительного повышения энергопотребления.

Наличие моделей, методов и средств оценки потенциала энергосбережения роботизированных технологических процессов (РТП), а также возможность прогнозирования энергетических затрат робототехнических систем (за счет анализа управляющих программ) и автоматизированного вывода решения задачи оптимизации с применением интеллектуальных средств позволит обеспечить комплексный положительный эффект от автоматизации цепочки операций и, как следствие, повысить конкурентоспособность предприятия.

Таким образом, с учетом вышеизложенного возникает необходимость в разработке интеллектуальных методов, моделей, алгоритмов управления позволяющих оптимизировать интегральные показатели качества функционирования роботизированных технологических комплексов, повысив их энергетическую эффективность без изменения ключевых параметров технологического процесса, отраженных в техническом задании.

В рамках научной работы предложено решение проблемы снижения потребления электрической энергии при проведении роботизированных технологических операций.

Объектом исследования являются системы управления ПР в составе роботизированных технологических комплексов.

Предметом исследования являются методы, модели и алгоритмы повышения энергетической эффективности РТП.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами оптимизации интегральных показателей, синтеза интеллектуальных методов, моделей и алгоритмов повышения энергетической эффективности РТК посвящено большое количество научных работ.

Исследованием методов оптимизации и интеллектуализации РТК занимаются как отечественные ученые (А.С. Климчик, С.И. Савин, Е.А. Магид, В.О. Антонов, Ф.Б. Тебуева, Ю.Н. Хижняков, В.В. Кожевников, В.Х. Пшихопов, И.А. Несмиянов, М.М. Кожевников, А.Д. Погорелов и др.), так и зарубежные (Oussama Khatib, Anthony A. Maciejewski, Angel Gonzalez, Du Jiang, Ying Sun, Renato Vidoni).

Синтезу эффективных систем управления ПР посвящены многие работы А.А. Варкова, А.П. Пашкевича, В.Х. Пшихопова, а также Ф. А. Рахима, Phil Webb и Jose de Jesus Rubio.

Методы, модели и алгоритмы оптимизации РТП прошли значительный путь от классических математических вычислений оптимальных значений параметров процесса до реализации сложных интеллектуальных алгоритмов вывода на современных компьютерах большой вычислительной мощности, а также суперкомпьютерах.

На сегодняшний день во всем мире вопросами повышения энергетической эффективности РТК заняты ведущие робототехнические корпорации мира: KUKA robotics (Германия), ABB robotics (Швейцария), FANUC robotics (Япония), Epson robots (США), Kawasaki robotics (США) и др. Наиболее перспективными в этом плане представляются решения, основанные на применении компьютерных моделей и интеллектуальных алгоритмов оптимизации (нейронные сети, нечеткая логика, роевой интеллект и др.), позволяющих получить высокое качество результата при низких трудовых и ресурсных затратах на их реализацию.

Цель работы – повышение эффективности функционирования РТП за счет разработки интеллектуальных методов, моделей, алгоритмов и систем поддержки принятия решений в условиях актуальных требований к снижению энергопотребления без необходимости внесения изменений в техническое задание и ухудшения качества конечного продукта.

Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1) Разработка систем измерений (косвенной оценки) энергопотребления ПР и динамических параметров систем управления электрическим приводом (СУЭП), а также системы аналитической обработки получаемых данных;

2) Анализ зависимости энергопотребления и затрат времени на исполнение дифференцированных технологических операций ПР от формы траекторий перемещения центральной точки инструмента (ЦТИ);

3) Синтез нейро-нечеткой имитационной модели (ННИМ) энергопотребления ПР на основе экспериментальных и синтетических данных, обеспечивающей расчет динамических параметров СУЭП ПР;

4) Формирование комплекса нейросетевых имитационных моделей (НИМ) энергопотребления ПР (в составе РТК для ограниченного множества классов РТП) и программного обеспечения, реализующего синтез моделей в автоматизированном режиме;

5) Разработка методов и алгоритмов решения задач оптимизации траекторных перемещений ПР по критериям минимизации энергопотребления и времени на выполнение операции для ограниченного множества классов РТП и синтез возможных вариантов коррекции управляющих программ ПР.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.3:

1) Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами;

2) Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами;

3) Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников;

4) Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Сформирована методика идентификации нелинейной зависимости энергопотребления и затрат времени ПР от форм траекторий перемещения ЦТИ, позволяющая существенно упростить процедуру оптимизации РТП;

2) Разработана ННИМ энергопотребления промышленного роботоманипулятора на основе экспериментальных и синтетических данных, востребованная при разработке и апробации алгоритмов снижения энергопотребления ПР;

3) Предложена технология синтеза ННИМ энергопотребления ПР, обеспечивающая высокую скорость синтеза в условиях частичного/полного отсутствия информации о технических характеристиках ПР.

4) Разработан метод синтеза НИМ энергопотребления ПР, выполняющих дифференцированные технологические операции двух видов: с преобладанием длинноходных и с преобладанием короткоходных траекторных перемещений для формирования оптимальных алгоритмов управления РТП.

5) Получен комплекс алгоритмов оптимизации РТП с преобладанием длинноходных и с преобладанием короткоходных траекторных перемещений по критериям минимизации энергопотребления и времени на исполнение комплекса роботизированных технологических операций.

Теоретическая значимость работы:

- 1) Предложен оригинальный подход к формированию НИМ энергопотребления ПР в составе РТК для ограниченного множества классов РТП;
- 2) Приведены научно-обоснованные рекомендации по повышению энергетической эффективности РТК широкого назначения.

Практическая значимость работы:

- 1) Предложена автоматизированная процедура измерения затрат энергии и времени ПР на проведение роботизированных операций;
- 2) Разработан комплекс программ для формирования НИМ энергопотребления ПР на основе экспериментальных и синтетических данных;
- 3) Разработан комплекс программ, обеспечивающий синтез НИМ энергопотребления ПР для реализации оптимизационных процедур РТП в автоматизированном режиме и в режиме системы поддержки принятия решений, включая инструменты графического интерфейса пользователя.

Методология и методы исследования:

Научные исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, основывались на методах идентификации, анализа и синтеза, а также математического, в частности, имитационного моделирования для создания моделей энергопотребления РТК. При синтезе систем управления и управляющих программ были использованы методы теории автоматического управления (в том числе оптимального и адаптивного), элементы искусственного интеллекта (нечеткая логика, нейронные сети), а также объектно-ориентированный подход к разработке управляющих программ на языках высокого уровня (Java, MATLAB, C++). Программирование ПР осуществлялось с использованием языка KRL. При решении имитационных задач использовались методы математического моделирования в программных средах Simulink и Simscape Multibody. Измерение показателей энергопотребления ПР производилось разработанными автором устройствами.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждена их соответствием законам математики и физики, а также корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений, применением широко апробированных методов оптимизации, адекватностью полученных моделей. При этом схемы созданных автором измерительных устройств не противоречат законам электрических цепей, а сами измерительные устройства изготовлены с использованием только сертифицированных электрических компонентов.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Способ идентификации нелинейных зависимостей энергопотребления ПР от форм траекторий перемещения ЦТИ ПР;
- 2) Нейро-нечёткая имитационная модель энергопотребления ПР, построенная на основе экспериментальных и синтетических данных;
- 3) Комплекс нейросетевых имитационных моделей энергопотребления ПР, выполняющих дифференцированные технологические операции;

4) Метод и комплекс алгоритмов оптимизации РТП – поиска эффективных по времени и энергии траекторий перемещения ЦТИ ПР в составе РТК при реализации дифференцированных технологических операций.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конкурсах и конференциях: XXVI Краевой конкурс молодых ученых и аспирантов с докладом «Синтез нейро-нечеткой имитационной модели энергопотребления промышленного робота-манипулятора», Тихоокеанский государственный университет (22.01.2024); V Международная научно-практическая конференция «Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии» (ДТИ-2023) с докладом «Автоматизированный синтез нейросетевых моделей энергопотребления промышленных роботов в составе роботизированных технологических комплексов», Институт экономики УрО РАН (25.10.2023); XXIV Краевой конкурс молодых ученых и аспирантов с докладом «Нейросетевые модели оптимизации энергопотребления роботизированных технологических процессов», Тихоокеанский государственный университет (13.01.2022);

Реализация работы осуществлена на базе Научно-образовательного центра «Промышленная робототехника и передовые промышленные технологии» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» в рамках научных проектов:

1) ФГБОУ ВО КНАГУ № ВН002/2020 «Разработка методов повышения энергетической эффективности роботизированных технологических процессов». Руководитель – Горькавый М.А.

2) РФФ 22-71-10093 «Разработка и синтез перспективных мультимодальных адаптивных алгоритмов и методов управления поведением коллаборативных робототехнических систем с учетом нештатных ситуаций и экстремальных условий в недетерминированной среде». Руководитель – Иванов Ю.С.

Публикации. По результатам работы было опубликовано 35 научных статей, из них 12 – индексируемых базой научного цитирования Scopus, 9 – ВАК, 14 – РИНЦ. Получены 12 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Сформирована 1 заявка на патент.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 159 страницах машинописного текста, списка использованных источников из 126 наименований и 19 приложений. Работа включает 65 рисунков и 15 таблиц.

Автор выражает благодарность научному руководителю, заведующему кафедрой «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, кандидату технических наук, доценту **Горькавому Михаилу Александровичу**, а также доценту кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, кандидату технических наук, доценту **Горькавому Александру Ивановичу** и руководителю Научно-образовательного центра «Промышленная робототехника и

передовые промышленные технологии» при Комсомольском-на-Амуре государственном университете, доценту кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», кандидату технических наук, доценту **Сухорукову Сергею Ивановичу** за научные консультации, помощь и поддержку при работе над диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы; сформулирована цель и основные задачи диссертационной работы; отмечены научная новизна и практическая ценность результатов исследований; изложены основные положения, выносимые на защиту и результаты апробации работы.

В первой главе проведено исследование номенклатуры существующих РТП и приведена обоснованная статистика успешного применения средств промышленной автоматизации/роботизации на отечественных и зарубежных предприятиях. Определены ключевые проблемы данного направления развития промышленности, связанные с отсутствием унифицированного инструментария и научно-обоснованных рекомендаций по повышению энергетической эффективности РТП. Сделан вывод о том, что значительный потенциал энергосбережения РТП заложен в организационно-технологической компоненте.

Проведен аналитический обзор существующих методов оптимизации РТП и установлено, что наиболее высокое качество решения оптимизационных задач может быть достигнуто за счет формирования математических моделей исследуемых систем управления ПР в составе РТК. Ключевым этапом построения моделей является структурный и параметрический синтез, основанный на классических принципах теории автоматического управления. В то же время, согласно результатам проведенного анализа, в условиях недостаточности информации о внутренних структурах систем управления ПР и ограниченности сроков и ресурсов для построения детализированных математических моделей наиболее целесообразным подходом к повышению энергетической эффективности РТК является синтез редуцированных моделей в формате «черный ящик», концепция которых была впервые представлена в работах У. Р. Эшби.

С целью формирования новых инструментов оптимизации в первой главе диссертационного исследования представлена разработанная классификация РТП, согласно которой роботизированные процессы разделены на два класса: с преобладанием длинноходных перемещений и с преобладанием короткоходных перемещений. Принадлежность РТП к определенному классу определяется величиной G равной отношению суммарной длины траекторий перемещения ЦТИ к числу изменений вектора управляющего воздействия на протяжении технологического цикла (управляющей программы)

$$G = \frac{L}{N},$$

где L – суммарная длина траекторий перемещения ПР (м); N – количество смен вектора управляющего воздействия.

Эмпирически установлено, что $G \in (0; 0.3]$ соответствует РТП с преобладанием короткоходных перемещений, а $G \in (0.3; \infty)$ соответствует РТП с преобладанием длинноходных перемещений. Каждый из представленных классов РТП имеет свою специфику при проведении оптимизационных мероприятий.

Вторая глава посвящена разработке ННИМ энергопотребления промышленного робота-манипулятора, необходимой для обеспечения возможности разработки и апробации алгоритмов оптимизации затрат энергии/времени на исполнение комплексов траекторий перемещения ПР. С учетом опыта исследований отечественных и зарубежных ученых, в данной главе синтезирован комплекс моделей энергопотребления ПР, отличающихся от уже существующих тем, что в основе проектируемых моделей заложены как системы дифференциальных уравнений, так и интеллектуальные алгоритмы формирования функциональных зависимостей, облегчающих процесс синтеза при соблюдении высоких показателей адекватности полученных моделей. Спроектированная последовательность синтеза ННИМ энергопотребления ПР включает, следующие основные этапы:

- разработку автоматизированного алгоритма расчета прямой задачи кинематики (ПЗК) механизмов шестиосевых промышленных роботов-манипуляторов на основе метода Денавита-Хартенберга (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023667029).

- формирование кинематической модели ПР с элементами графической визуализации в специализированной программной среде MATLAB (Simscape Multibody) (рисунок 1), включающей кинематическую модель механизма ПР, блоки задания вектора управляющего воздействия, ограничений углов поворота осей, моделей используемых СУЭП, а также блок автоматического расчета ПЗК и блок вывода графиков момента (M), угловой скорости (ω) и угла положения (φ);

- разработку ННИМ энергопотребления ПР (рисунок 2), включающей ранее представленную кинематическую модель и комплекс моделей СУЭП, состоящий из эталонных моделей (актуальных при наличии исчерпывающих технических данных о параметрах СУЭП ПР), а также нечетких и нейросетевых моделей (востребованных в условиях отсутствия подробных технических характеристик СУЭП ПР). В проектируемой модели предусмотрено переключение типов используемых СУЭП (эталонных/нечетких/нейросетевых) для достижения желаемого функционала качества.

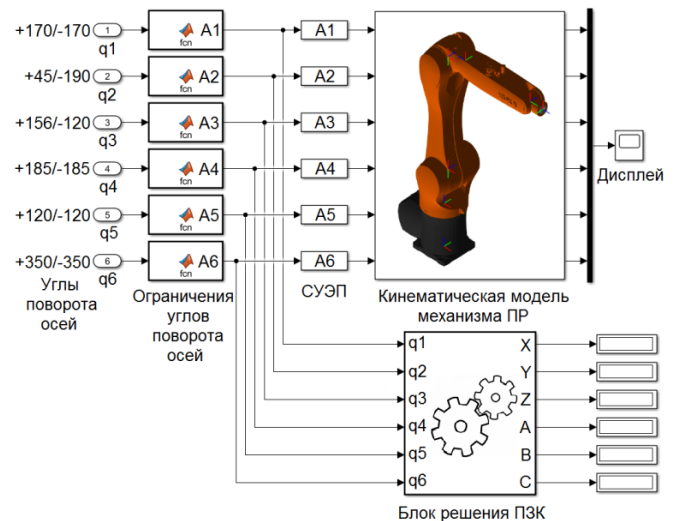


Рисунок 1 – Структурная схема расчёта динамических параметров на основе кинематической модели ПР

Согласно приведенной структурной схеме механическая часть ПР моделируется укрупненным блоком 1 в среде MATLAB Simscape Multibody аналогично схеме рисунка 1.

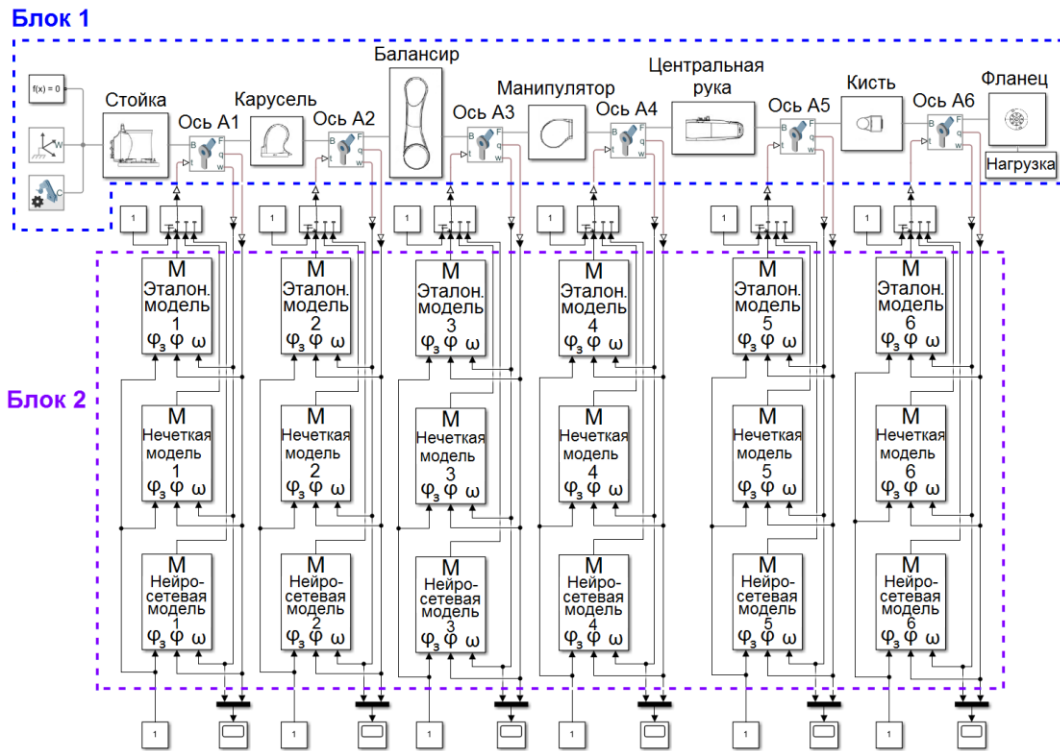


Рисунок 2 – Структурная схема нейро-нечеткой имитационной модели энергопотребления ПР

Каждая часть блока 2 имеет в своем составе уникальную эталонную модель СУЭП (рисунок 3), построенную на принципах модального и подчиненного регулирования и объединяющую их положительные свойства. При таком подходе к формированию СУЭП достигается высокая вариативность настройки контуров тока и скорости для имитации реальных изменений физических переменных описывающих состояние электрического привода.

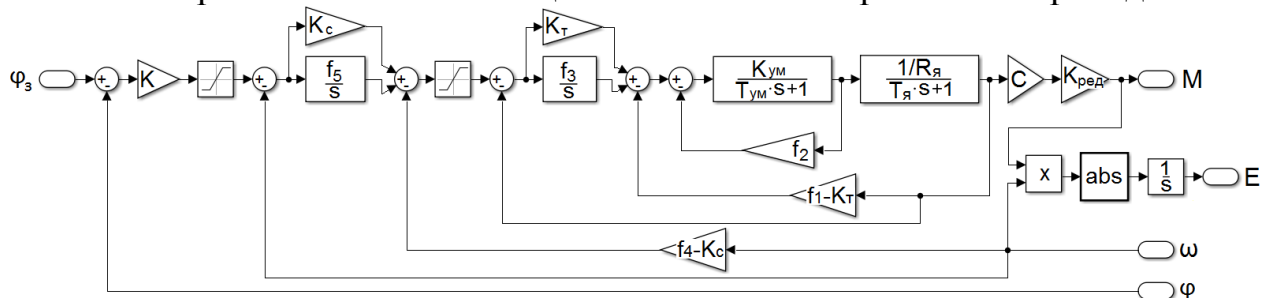


Рисунок 3 – Детализированная структурная схема эталонной модели СУЭП

Результаты имитационного моделирования эталонных СУЭП при обработке роботом вектора управляющего воздействия $\varphi_3 = [0.5 \ 0.6 \ 0.8 \ 0.4 \ 0.4 \ 0.4]^T$ и матриц ограничений тока $Lim_I = [8 \ -8; 20 \ -20; 8 \ -8; \infty \ -\infty; \infty \ -\infty; \infty \ -\infty]^T$ и угловой скорости $Lim_\omega = [1.2 \ -1.2; 2 \ -2; 1.2 \ -1.2; \infty \ -\infty; \infty \ -\infty; \infty \ -\infty]^T$ продемонстрированы на рисунке 4 в виде графиков потребления энергии и полученных итоговых значений энергии на поворот каждой оси. Малые значения энергопотребления осей А4-А6 (рисунок 2) обусловлены низкой инерционностью центральной руки, кисти и фланца манипулятора.

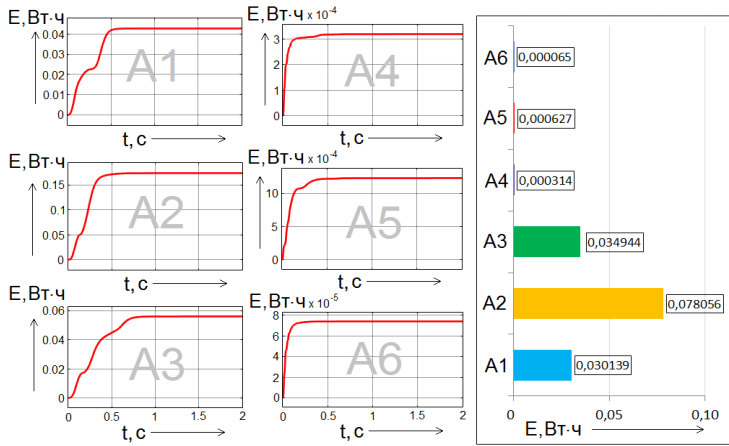


Рисунок 4 – Графики переходных процессов и диаграмма энергопотребления эталонных СУЭП

могут быть использованы в качестве обучающей выборки, необходимой для синтеза интеллектуальных (нечетких и нейросетевых) моделей в составе блока 2 (рисунок 2). В качестве одного из возможных вариантов настройки нечетких моделей в работе произведено их обучение на основе синтетических данных, полученных с эталонных моделей СУЭП. Параметры функций принадлежности (MF) нечетких систем представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики лингвистических переменных нечетких моделей

Ось	Input				Output	
	Число MF	Тип MF	Диапазон значений $\Delta\varphi$	Диапазон значений ω	Тип MF	Диапазон значений M
A1	3 3	gaussmf	- 0.851; 0.851	- 1.201; 1.201	constant	- 912.77; 912.68
A2	7 7	gbellmf	- 0.820; 0.820	- 2.017; 2.017	constant	- 1556.6; 1338.4
A3	3 3	gaussmf	- 0.849; 0.849	- 1.234; 1.295	constant	- 702.27; 805.82
A4	7 7	gbellmf	-0.565; 0.567	-5.982; 5.976	linear	-3.317; 3.769
A5	7 7	gbellmf	-0.68; 0.678	-4.271; 4.258	linear	-13.25; 31.579
A6	3 3	gaussmf	-1.405; 1.405	-7.505; 7.492	constant	-3.017; 4.15

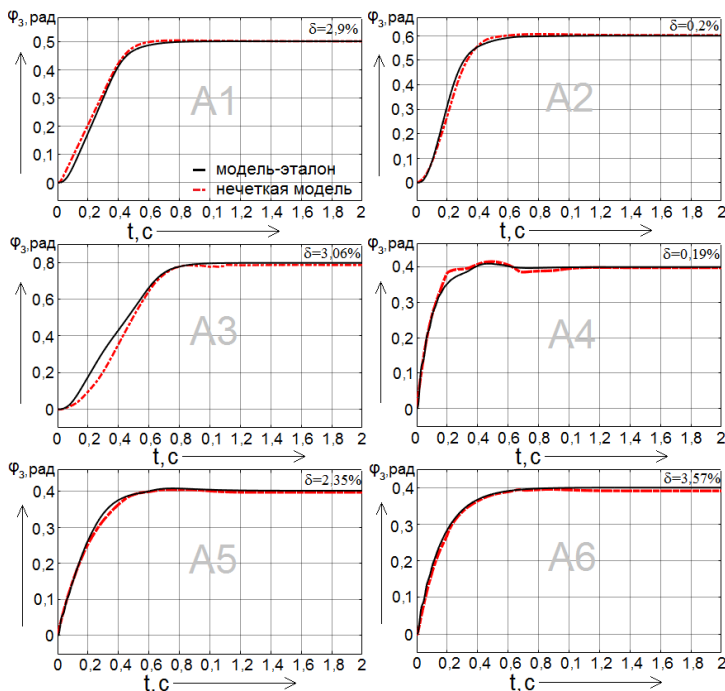


Рисунок 5 - Графики изменения углов положения осей ПР

Представленный подход к формированию моделей СУЭП ПР позволяет с высокой степенью адекватности воспроизвести переходные процессы, протекающие в реальных ЭП ПР широкой номенклатуры за счет вариативности настройки разработанной модели СУЭП. Более того, данные полученные в результате численного эксперимента на эталонных моделях

Результаты сравнительного моделирования синтезированных эталонных и нечетких моделей СУЭП ПР представлены на рисунке 5. Графики изменения углов положения осей А1-А6 демонстрируют наличие динамических ошибок (не более 4% от установившихся значений), что обусловлено настройками нечетких моделей.

Синтез нейросетевых моделей реализован на основе экспериментальных данных измерений, полученных с помощью разработанной системы мониторинга с ПР (рисунок 6).

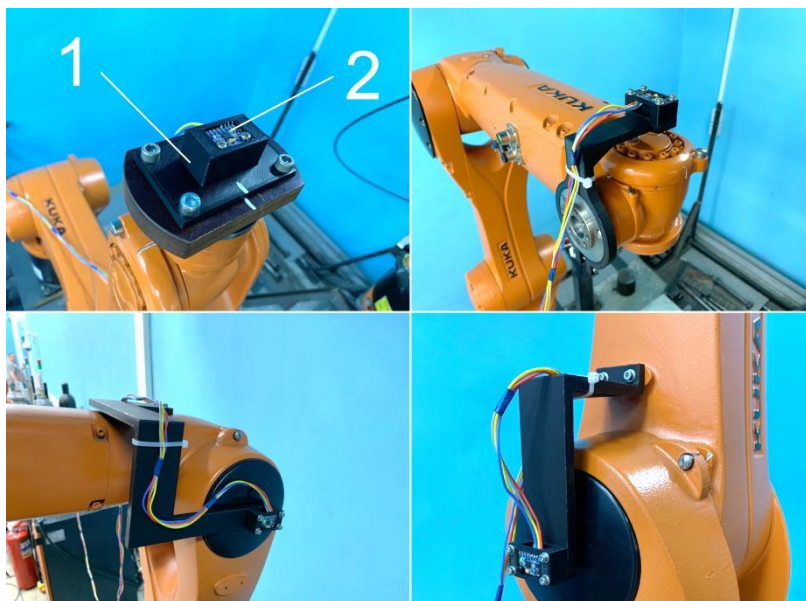


Рисунок 6 – Элементы системы мониторинга динамических параметров и энергопотребления:

1 – крепление, 2 – гироскоп и акселерометр

В результате процедуры идентификации объекта исследования получены данные об изменении угловой скорости при повороте осей. Фрагмент экспериментальных данных интерпретирован в виде графиков угловой скорости (ω), угла положения (φ) и углового ускорения (ε) (рисунок 7). При этом данные об изменении угла положения (φ) и углового ускорения оси (ε) получены в результате интегрирования и дифференцирования соответственно.

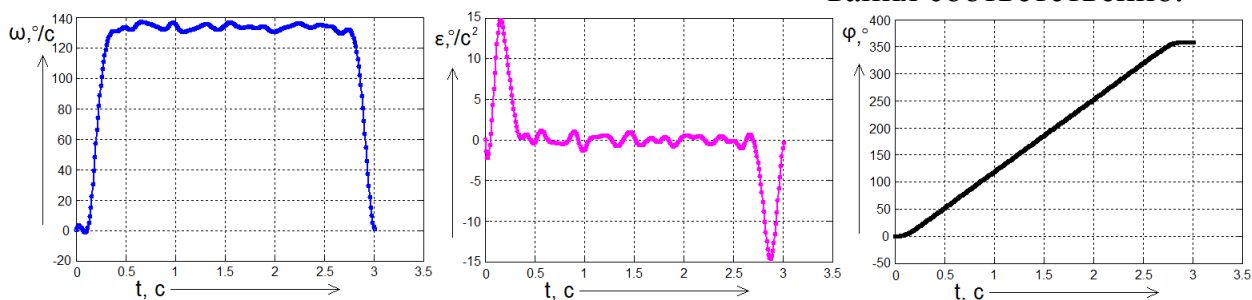


Рисунок 7 – Графики изменения угловой скорости (ω), угла положения (φ) и углового ускорения (ε) оси A1 при повороте на угол $\varphi_3 = 30^\circ$

Структура нейросетевых моделей СУЭП представлена на рисунке 8.

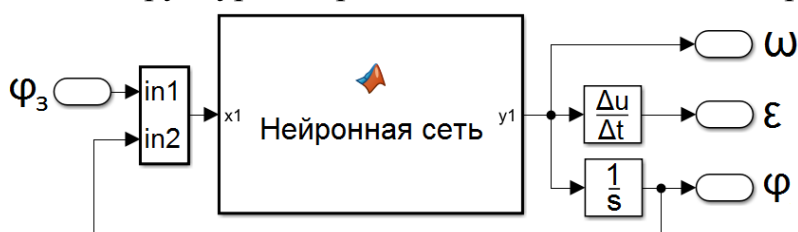


Рисунок 8 – Структура нейросетевой модели

Таким образом, в работе продемонстрирована высокая вариативность синтеза имитационных моделей энергопотребления ПР для достижения поставленного функционала качества, что представляет особую теоретическую и практическую значимость для инженеров и исследователей.

В третьей главе представлен автоматизированный метод и алгоритм поиска комплекса оптимальных (по времени и энергии) траекторий перемещения ЦТИ ПР выполняющего дифференцированные технологические операции с преобладанием длинноходных перемещений (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668069). Рассмотрен РТП укладки грузов (рисунок 9), являющийся, согласно принятой классификации, экземпляром класса РТП с преобладанием длинноходных перемеще-

ний ($G > 0.3$). Согласно сценарию технологического процесса ПР (1) захватывает блок (2) движущийся по конвейеру с предыдущего технологического участка и позиционирует его на роботизированную тележку (РТ) (3) с установленным поддоном (4). Таким образом, ПР формирует комплекс грузов (5) заданной размерности. При этом РТ способна менять свое положение в зоне загрузки, т.е. занимать определенную позицию и располагаться под определенным углом к плоскости ZOX. Соответственно, при изменении положения тележки в зоне загрузки

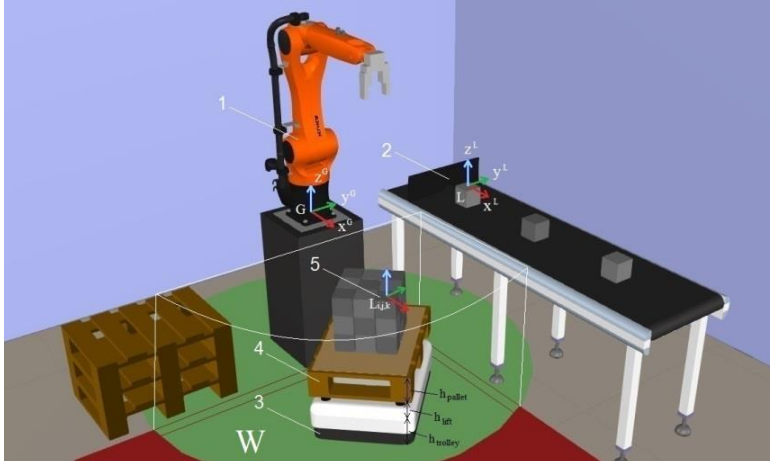


Рисунок 9 – Виртуальная модель РТП укладки грузов: 1 – промышленный робот-манипулятор, 2 – конвейерная лента, 3 – роботизированная тележка, 4 – поддон, 5 – блок в зоне загрузки

тележки изменяются комплексы траекторий перемещения ЦТИ ПР, которые сопровождаются изменением затрат времени и энергии на выполнение операции, что было подтверждено в результате предварительных экспериментов.

Решение оптимизационной задачи базирования тележки заключается в формировании всего допустимого спектра однотипных перемещений (рисунок 10) в пределах рабочей зоны ПР, а также измерении затрат электрической энергии и времени на прохождение ЦТИ по каждой траектории. При формировании комплекса траекторий перемещения следует учесть необходимость погрузки всего объема грузов на поддон (отсутствие нарушений технологического режима). Согласно представленной схеме с помощью разработанного измерительного устройства произведены замеры энергопотребления и времени на исполнение траекторных перемещений. Основными ограничениями исследуемого типового режима функционирования ПР являются величины линейной скорости ЦТИ ($v = 1$ м/с) и линейного ускорения ЦТИ ($a = 2$ м/с²). Форма траекторий задана в системе пользовательских координат, характеризующих высоту подъема груза (z_{up}), длину сдвига относительно стойки робота (x_{side}), поворот вокруг оси Z глобальной системы координат ПР (φ_0), длину спуска (z_{down}). В результате выполнения серии экспериментов по измерению энергетических затрат ПР на реализацию траекторных перемещений ЦТИ в различные точки рабочей зоны установлено, что показания затрат времени на каждое отдельно взя-

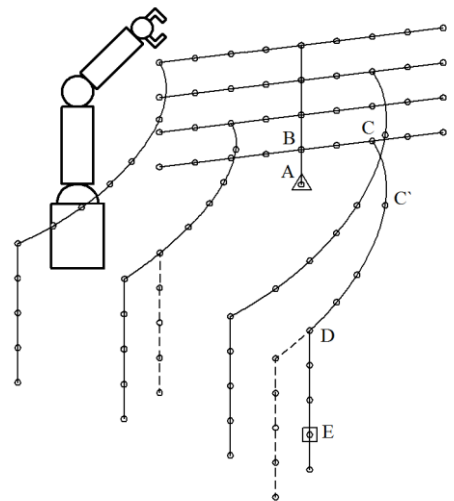


Рисунок 10 – Схема комплекса траекторий для проведения измерений

тое перемещение отличаются от одной итерации эксперимента к другой менее чем на 0.003 с, значение среднеквадратичной ошибки измерений (RMSE) рассчитанное по формуле $RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum (e_i - e_{cp})^2}$ доказывает высокую точность полученных значений времени исполнения траекторий. В то же время отмечено, что показания энергетических затрат отличаются от одной итерации эксперимента к другой (при сохранении общего тренда результирующих графиков), что обусловлено наличием постоянной составляющей мощности возникающей в результате взаимодействия систем управления ПР в составе РТК и не оказывающей влияния на положение экстремальных точек искомых функциональных зависимостей.

Полученные расчетные и экспериментальные данные использованы в качестве обучающей выборки нейронной сети (НС), аппроксимирующей зависимость энергопотребления/времени от формы траектории перемещения ЦТИ ПР. В данном случае использование интеллектуальных инструментов нейронных сетей позволяет существенно сократить количество замеров и, как следствие, ресурсные и трудовые затраты на проведение эксперимента.

Учитывая специфику сформированной обучающей выборки, рассматриваемая в работе нелинейная зависимость была идентифицирована нейронной сетью типа Feed-forward backprop. Так, на основе принципов построения нейронных сетей синтезирована общая структура нейросетевой имитационной модели (рисунок 11), реализующей концепцию «черного ящика» или модели «вход-выход».

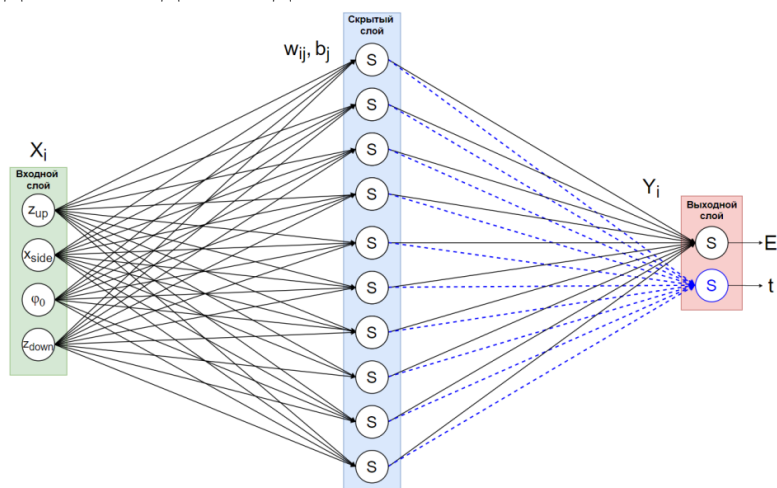


Рисунок 11 – Структура нейросетевой имитационной модели РТП укладки

Представленная структура обладает следующими характеристиками и атрибутами:

- количество слоев – 2;
- число нейронов скрытого слоя – 10;
- тренировочная функция – *TRAINLM*. Данная функция обучения сети обновляет значения веса (w) и смещения (b) в соответствии с оптимизацией методом Левенберга-Марквардта;

- функция адаптации обучения – *LEARNGDM* вычисляет изменение веса dW для данного нейрона из входа нейрона и ошибки, веса (или смещения) gW , скорости обучения Lr и константы импульса Mc в соответствии с градиентным спуском с импульсом: $dW = Mc \cdot dW_{prev} + (1 - Mc) \cdot Lr \cdot gW$. Предыдущее изменение веса dW_{prev} сохраняется и считывается из состояния обучения;

- метрика качества – средняя квадратичная ошибка (MSE);

- функция активации – *TANSIG* определяет выходное значение нейрона в зависимости от результата взвешенной суммы входов и порогового значения согласно формуле $f(s) = \frac{2}{(1+e^{-2s})-1}$, где *S* - взвешенная сумма входов нейрона.

Представленная в работе НС сформирована в среде MATLAB с использованием инструментов Neural Network Toolbox. Результаты обучения позволяют сделать вывод о высокой степени соответствия результатов вывода НС реальным процессам энергопотребления и затрат времени. Значения ошибок НС равны $MSE_E \approx 0.0003$ для энергопотребления и $MSE_t \approx 0.0009$ для затрат времени, что удовлетворяет заявленным требованиям и говорит о высоком качестве сформированных нейронных сетей. Сформированные функциональные зависимости $E = f_E(z_{up}, x_{side}, \varphi_0, z_{down})$ и $t = f_t(z_{up}, x_{side}, \varphi_0, z_{down})$ интерпретированы в виде цветowych карт энергопотребления и времени (рисунок 12), характеризующих трехмерную зону погрузки (*W*) (рисунок 9).

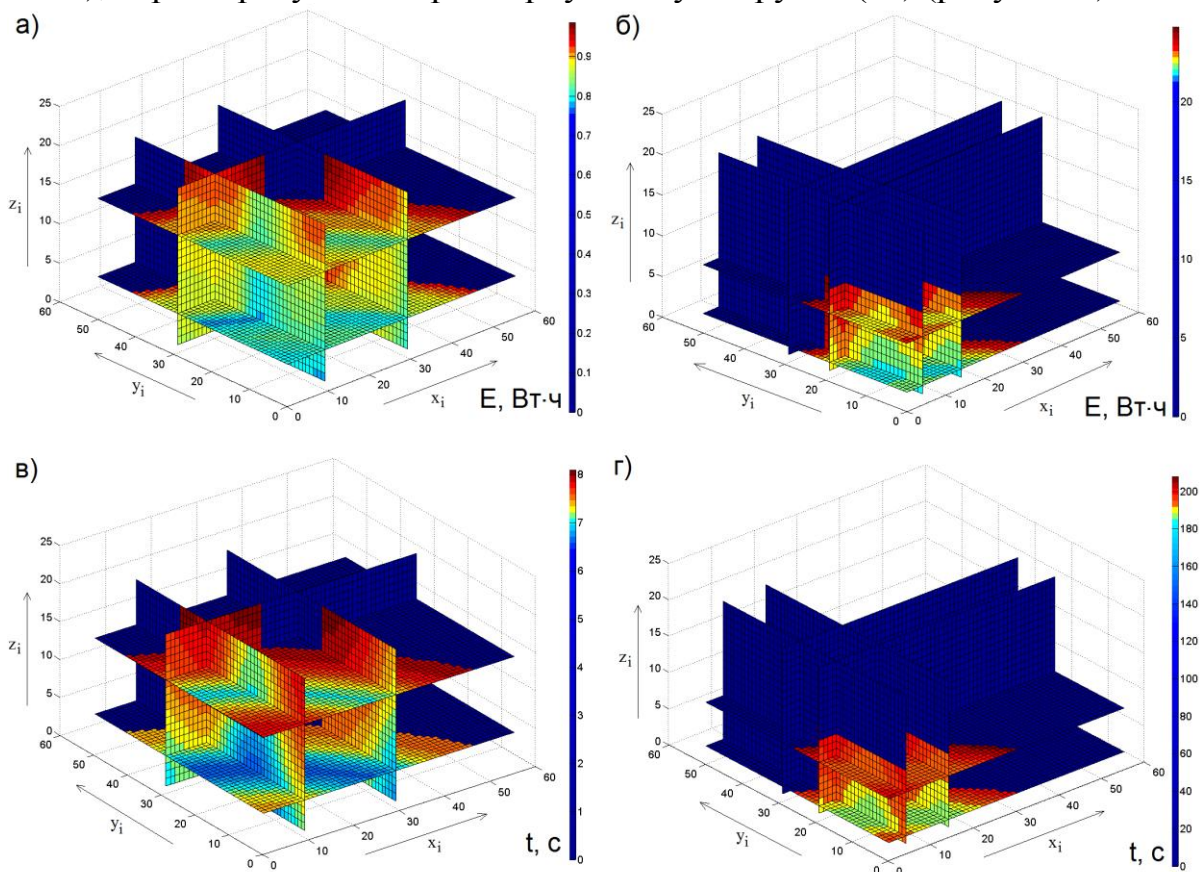


Рисунок 12 – 3D Карта энергопотребления ПР при укладке одного блока (а), 3D карта энергопотребления ПР при укладке сборного груза (б), 3D карта затрат времени ПР при укладке одного блока (в), 3D карта затрат времени ПР при укладке сборного груза (г)

По представленным картам с использованием разработанного алгоритма оптимизации представляется возможным определение базовой точки позиционирования РТ в пределах рабочей зоны ПР для достижения оптимумов по производительности и/или энергопотреблению, пользуясь следующим функционалом качества

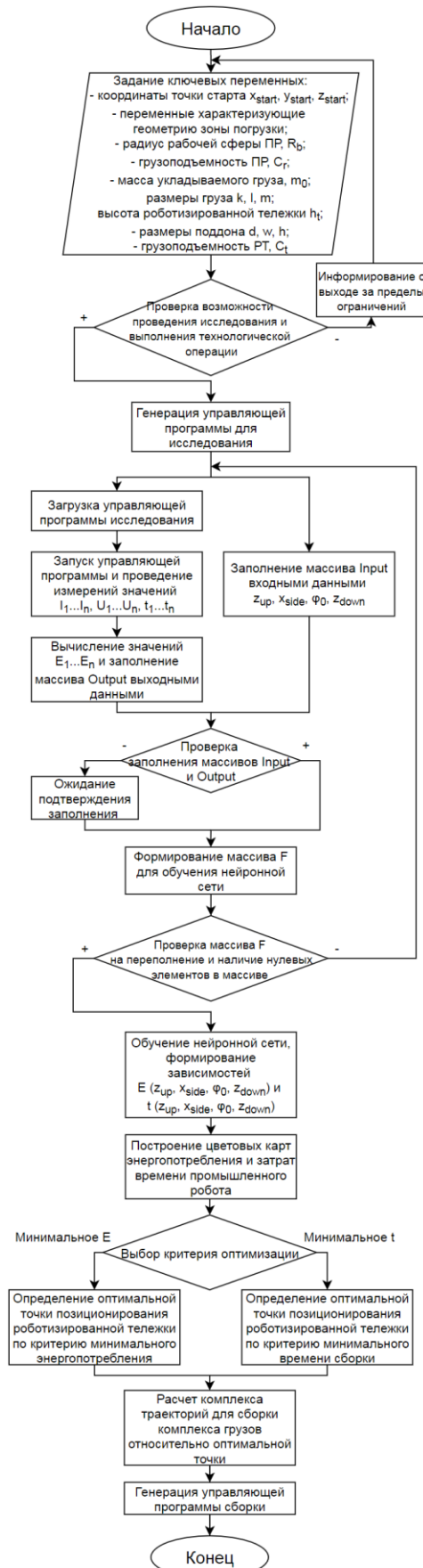


Рисунок 13 – Блок-схема алгоритма поиска комплекса оптимальных траекторий перемещения ЦТИ ПР

$$E = f_E(z_{up}, x_{side}, \varphi_0, z_{down}); E \rightarrow \min;$$

$$t = f_t(z_{up}, x_{side}, \varphi_0, z_{down}); t \rightarrow \min;$$

где E – значение энергии на исполнение операции; t – общее время операции.

Укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации представлена на рисунке 13. Согласно представленному алгоритму формирование комплекса возможных траекторий перемещения ЦТИ ПР происходит с учетом ограничений, определяемых характеристиками: 1) рабочего пространства ПР (габаритные размеры зоны погрузки W и неподвижных объектов в составе РТК); 2) силовой части ПР (радиус рабочей сферы (R_b , мм), грузоподъемность (C_r , кг); 3) захватываемого объекта (масса (m_0 , кг) и габаритные размеры груза ($k \times l \times m$, мм)); 4) РТ (грузоподъемность (C_t , кг), допустимая высота подъема (h_t , мм), габаритные размеры поддона ($d \times w \times h$, мм)).

После задания исходных данных и проверки на выход из ограничений в автоматизированном режиме происходит генерация управляющей программы ПР, необходимой при измерении энергопотребления на исполнение сформированного комплекса траекторий, а также создается массив входных данных (Input) для обучения НС. В свою очередь, управляющая программа загружается в контроллер ПР, оснащенный измерительным устройством, определяющим значения затраченных энергии и времени на основании данных напряжения, тока и времени с соответствующих датчиков. Итогом работы измерительного устройства является массив (Output) значений энергии (E) и времени (t) – целевых данных для обучения НС. Составляющие обучающей выборки агрегируются в единый массив (F), который проходит проверку на переполнение и наличие нулевых элементов.

Полученная выборка используется для формирования НС, позволяющей пользователю в автоматизированном режиме определить оптимальную по энергопотреблению/времени

точку и сгенерировать новую управляющую программу для сборки комплекса грузов с учетом выбранного критерия оптимизации (минимум энергопотребления и/или затрат времени на сборку), а также сформировать цветовые карты энергопотребления и затрат времени. Данный подход является однозначным преимуществом в конечной реализации для инженера осуществляющего наладку роботизированных систем с использованием разработанной модели на производстве.

Для подтверждения эффективности работы предложенного метода по модели произведен сравнительный расчет энергии (рисунок 14, а) и времени (рисунок 14, б) на сборку комплекса блоков относительно базовой точки с минимальными и максимальными затратами.

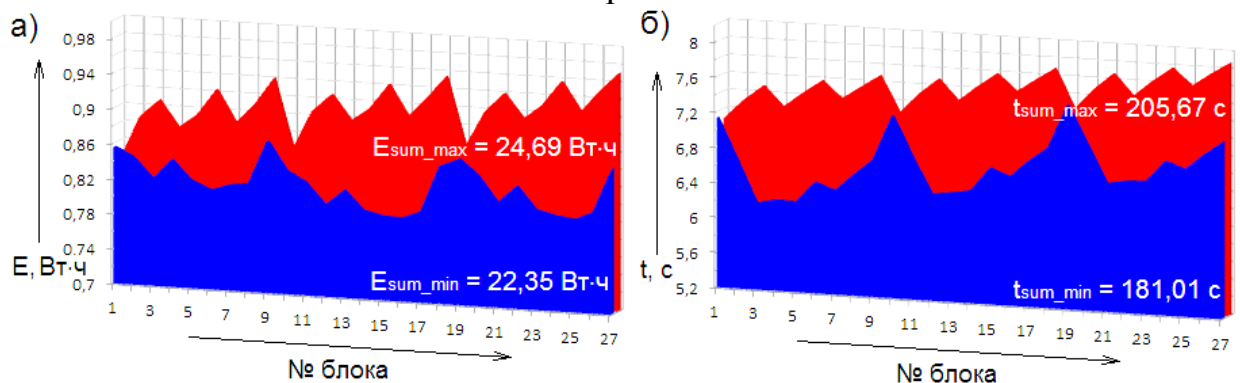


Рисунок 14 – Графики затрат энергии (а) и времени (б) на сборку комплекса блоков относительно базовой точки

Как следует из представленных графиков, для исследуемого технологического режима при $v = 1$ м/с, $a = 2$ м/с² потенциал энергосбережения ($E_{г\%}$) может достигать 9.5%, а сокращение времени технологического цикла ($t_{г\%}$) возможно вплоть до величины 12%.

В четвертой главе представлен автоматизированный метод и комплекс алгоритмов поиска энергоэффективного положения заготовки в рабочей зоне промышленного робота, выполняющего дифференцированные технологические операции с преобладанием короткоходных перемещений ($0 < G < 0.3$). С целью разработки и апробации предложенных решений рассмотрен роботизированный технологический процесс механической обработки (рисунок 15), являющийся экземпляром класса с преобладанием короткоходных перемещений. Основными элементами рассматриваемого РТК механической обработки являются ПР (1), рабочая зона которого описывается множеством R_p . На фланце промышленного робота установлен электрический шпиндель с режущим инструментом (фреза, гравер и т.д.). РТК способен осуществлять фрезерование и гравировку объёмных/плоских изделий в пределах рабочей зоны R_p . Заготовка детали (2) устанавливается на рабочем столе (3), имеющем возможность регулирования по высоте (h), и, плоскость которого представлена множеством Q . Таким образом, заготовка может быть установлена в различные позиции пространства Q_v , имеющего объём $V = Q \cdot h$. При этом множество точек в объёме $Q_v \subset R_p$.

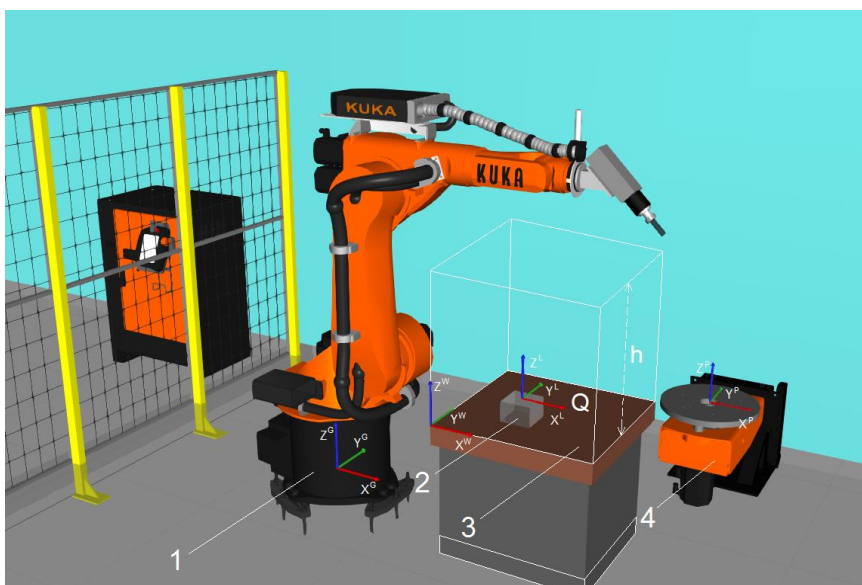


Рисунок 15 – Виртуальная модель РТК механической обработки: 1 – ПР; 2 – заготовка детали; 3 – рабочий фрезерный стол; 4 – промышленный позиционер

Принимая во внимание технологические ограничения, налагаемые на РТП с преобладанием короткоходных перемещений (такие как, запрет на реконфигурацию форм траекторий перемещения ЦТИ), а также многочисленность команд перемещения в составе управляющей программы обработки, для повышения энергетической эффективности данного класса РТП разработан особый метод и комплекс алгоритмов оптимизации основанных на гипотетическом предположении о зависимости энергопотребления ПР от положения заготовки детали в рабочей зоне. В результате предварительных исследований данная гипотеза нашла свое подтверждение – доказан нелинейный характер распределения значений энергетических затрат по областям возможного позиционирования заготовки.

Предложенный метод и алгоритм оптимизации РТП с преобладанием короткоходных перемещений включает следующие основные этапы:

1) разделение рабочей зоны ПР на отдельные области, имеющие форму прямоугольного параллелепипеда, фиксированный размер и заранее определенные координаты в декартовой системе с учетом ограничений рассматриваемого технологического процесса (препятствий и т.д.), сокращающих объём полезной рабочей зоны;

2) проведение измерений энергопотребления на исполнение в каждой области рабочей зоны эталонного набора технологических операций (обработки условной детали) с регистрацией координат исследуемых областей и значений энергопотребления на проведение данного набора технологических операций с помощью разработанного трехфазного измерительного устройства по формуле

$$E = \sum_{t=0}^T (P_1 + P_2 + P_3) \cdot \Delta t = \sum_{t=0}^T (U_1 I_1 + U_2 I_2 + U_3 I_3) \cdot \Delta t ;$$

3) обучение НС с использованием обучающей выборки, полученной в результате проведения эксперимента по измерению энергопотребления. При этом входными данными для обучения являются координаты локальных баз областей дискретного пространства (X, Y, Z), а выходными – значения энергопотребления (E) на обработку детали в исследуемой области рабочей зоны.

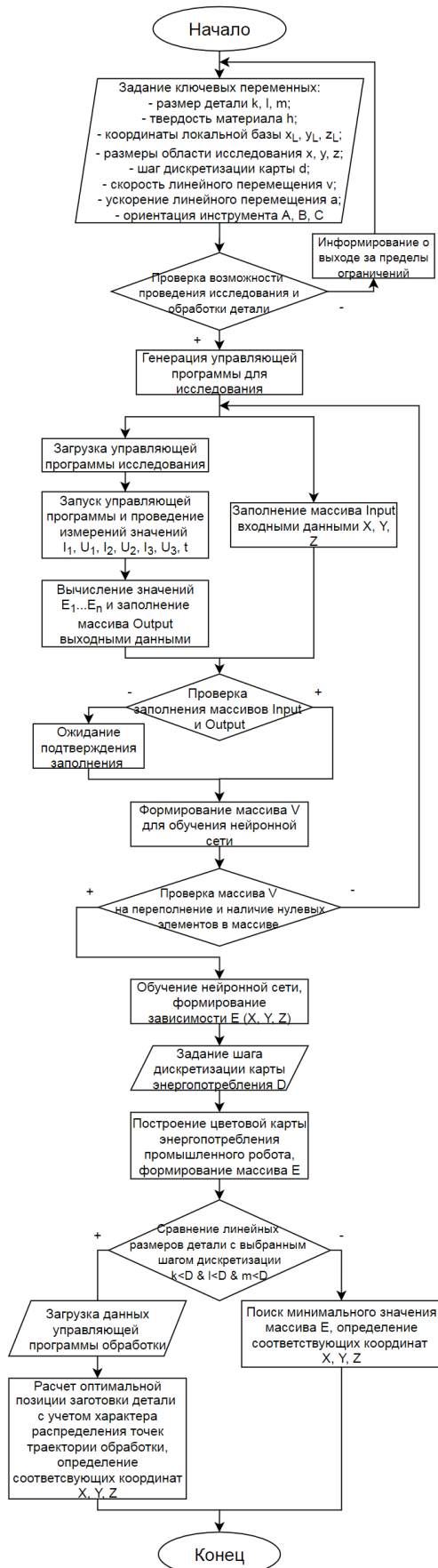


Рисунок 16 – Блок-схема алгоритма поиска энергоэффективного положения заготовки в рабочей зоне ПР

4) расчет оптимального по энергопотреблению положения обрабатываемой заготовки детали в рабочей зоне ПР с использованием полученной НС путем последовательного перебора областей рабочей зоны, руководствуясь следующим функционалом качества: $E = f(X, Y, Z, t); E \rightarrow \min; t = \text{const}$, где E – значение энергии, необходимой для обработки условной детали; X, Y, Z – координаты области рабочей зоны ПР.

Укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации представлена на рисунке 16. Разработанный алгоритм оптимизации РТП механической обработки подразумевает задание исходных данных, определяемых характеристиками: 1) ПР (размеры области доступного рабочего пространства (R_p , мм)); 2) Обрабатываемой детали (габаритные размеры ($k \times l \times m$, мм)), твердость материала (h , кгс/мм²); 3) рабочей зоны ПР (координаты локальной базы (x_L, y_L, z_L , мм)), координаты граничных точек исследуемой рабочей зоны ПР (x, y, z , мм)). При этом в качестве ограничений работы алгоритма используется фиксированное значение ориентации инструмента, линейной скорости и линейного ускорения на протяжении всего процесса оптимизации.

Функционал разработанного программного обеспечения реализуется в следующем порядке: после задания исходных данных и проверки возможности проведения исследования и обработки детали происходит генерация управляющей программы для исследования областей рабочей зоны ПР, а также массива входных данных (Input) для обучения НС. Согласно сформированной управляющей программе в каждой области разделенной рабочей зоны ПР выполняется набор эталонных технологических операций при измерении энергетических затрат (E) на работу в каждой области, определяемой координатами X, Y, Z . Полученные данные об энергопотреблении записываются в массив

Output целевых данных для обучения НС. Входные и целевые данные передаются в итоговый массив обучающей выборки (V), который, в свою очередь проходит проверку на переполнение и наличие нулевых элементов.

Массив V используется для синтеза НС, аппроксимирующей зависимость $E(X, Y, Z)$, которая может быть интерпретирована в виде цветовой карты энергопотребления с заданным шагом дискретизации (D). По результатам сравнения габаритных размеров детали и заданного шага дискретизации осуществляется поиск оптимальной позиции заготовки детали в рабочей зоне ПР с/без учета данных управляющей программы обработки детали.

Для визуализации оптимизационного решения использована трехмерная цветовая карта зон энергопотребления (рисунок 17), построенная с использованием обученной НС, где каждая точка трехмерного массива координат соответствует областям рабочей зоны ПР и имеет цветовую маркировку, отражающую значение энергопотребления на обработку детали в соответствующей области.

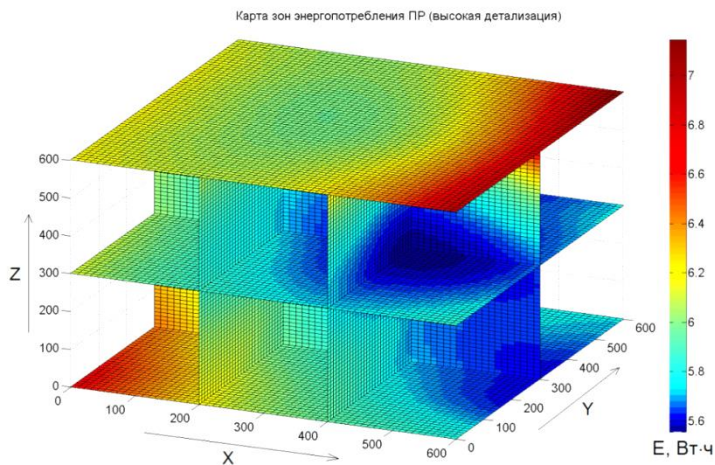


Рисунок 17 – 3D Карта зон энергопотребления ПР

Поскольку управляющие алгоритмы ПР обеспечивают высокую степень повторяемости траекторий, карта статична во времени. Это позволяет использовать полученные серии измерений в качестве эталонной экспертной выборки внутри единого технологического процесса, т.е. до момента изменения значений глобальных переменных состояния РТК (массы инструмента, угла наклона инструмента, массы оснастки), обуславливающих необходимость повторного запуска процесса измерения и переобучения нейронной сети. С целью подтверждения результативности разработанных оптимизационных решений проведена серия экспериментов по измерению энергетических затрат на перемещение ЦТИ по траектории обработки детали в трех различных позициях рабочей зоны ПР: 1) позиция с максимальным энергопотреблением (рассчитанная по алгоритму); 2) позиция с минимальным энергопотреблением (рассчитанная по алгоритму); 3) позиция, выбранная оператором РТК на основе профессионального опыта (без использования алгоритма). В качестве ограничений эксперимента были заданы значения линейной скорости ЦТИ $v=2$ м/с и линейного ускорения ЦТИ $a=2$ м/с². Количественная оценка энергетических затрат на обработку приведена на рисунке 18. Таким образом, сокращение энергетических затрат на проведение РТП в рассматриваемом случае возможно до величины $\Delta E = 8.63\%$.

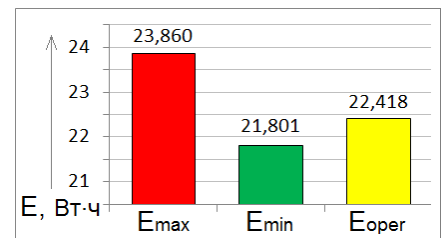


Рисунок 18 – Результаты эксперимента

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа, посвященная решению актуальной научно-технической задачи – повышению эффективности функционирования РТП по критериям максимизации производительности и минимизации энергопотребления путем разработки интеллектуальных моделей и алгоритмов оптимизации за счет применения методологии нейронных сетей и нечеткой логики, представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1) Анализ опыта внедрения роботизированных производств на отечественных и зарубежных предприятиях определил проблематику задачи прикладной промышленной роботизации – отсутствие унифицированного инструментария для решения оптимизационных задач, направленных на снижение суммарных энергетических затрат и повышения производительности РТП. При этом установлено, что существенный потенциал энергосбережения заложен в организационно-технологической компоненте роботизированного процесса.

2) Аналитический обзор современных подходов и средств оптимизации показал целесообразность повышения эффективности функционирования РТП за счет применения интеллектуальных методов, моделей и алгоритмов формирования высокопроизводительных и энергоэффективных траекторий перемещения ПР в рамках комплекса дифференцированных технологических операций.

3) В условиях существующих ограничений рассматриваемых задач, согласно результатам идентификации объекта исследования установлено, что зависимость энергопотребления и времени исполнения роботизированной операции от формы пространственного траекторного перемещения ЦТИ ПР имеет нелинейный характер и может быть описана путем применения интеллектуальных инструментов, таких как нейронные сети и нечеткая логика. Как следствие, решение представленных в работе оптимизационных задач расширяет границы применимости указанных интеллектуальных инструментов.

4) Предложенные в работе системы мониторинга энергопотребления ПР и динамических параметров СУЭП ПР на базе AVR микроконтроллера, включающие датчики переменного тока, переменного напряжения и шестигранный датчик гироскоп и акселерометр способны обеспечить достаточный объем данных для формирования обучающей и тестовой выборок НИМ и ННИМ, отражающих процессы энергопотребления СУЭП ПР без вмешательства во внутренние структуры системы управления. В результате автоматизированной обработки данных эксперимента по измерению угловой скорости вращения каждой оси ПР определена максимальная относительная погрешность расчетного угла положения от заданного $\delta = 6.069\%$. При этом среднее значение погрешности составляет 2.5% .

5) Разработанная ННИМ энергопотребления ПР, востребованная при разработке и апробации алгоритмов оптимизации, позволяет при наличии обобщенных координат точек начала и конца траекторного перемещения

провести расчет энергетических затрат на его исполнение и может быть синтезирована как на основе теоретических данных (при наличии исчерпывающей информации о характеристиках используемых мехатронных модулей), так и на основе экспериментальных данных, полученных с реального промышленного-робота-манипулятора (в условиях отсутствия подробных технических характеристик мехатронных модулей) при поддержке разработанного и зарегистрированного программного обеспечения. Предложенный подход обеспечивает высокую скорость синтеза модели в условиях частично/полного отсутствия подробных технических характеристик ПР.

6) Предложенная математическая модель и автоматизированные алгоритмы ее синтеза позволили с минимальными временными, информационными и интеллектуальными затратами настроить НИМ энергопотребления для каждого класса РТП с учетом его специфики и реализовать метод поиска оптимальных параметров функционирования РТП. При этом в качестве основных параметров функционирования РТП рассмотрены: конфигурация комплекса траекторий перемещения ЦТИ ПР, потребляемая электрическая энергия, время исполнения операции, точка позиционирования вспомогательного/оснащающего оборудования, инструмента, заготовки детали.

7) В результате реализации разработанных алгоритмов решения оптимизационных задач для экземпляра класса РТП с преобладанием длинноходных перемещений определены интервалы возможных значений затрат:

- энергии $[E_{\min 1}; E_{\max 1}] = [0.803; 1.094]$ (Вт·ч) – для отдельно взятого перемещения, $[E_{\min 2}; E_{\max 2}] = [22.35; 24.69]$ (Вт·ч) – для комплекса перемещений;
- времени $[t_{\min 1}; t_{\max 1}] = [6.721; 8.905]$ (с) – для отдельно взятого перемещения, $[t_{\min 2}; t_{\max 2}] = [181.01; 205.67]$ (с) – для комплекса перемещений;

Для экземпляра класса РТП с преобладанием короткоходных перемещений определен интервал возможных значений энергопотребления на обработку заготовки детали в рабочей зоне ПР, характеризуемый значениями $[E_{\min}; E_{\max}] = [5.524; 7.178]$ (Вт·ч). Как следствие, технико-экономический анализ результатов использования разработанных методов, моделей и алгоритмов оптимизации РТП продемонстрировал потенциал сокращения энергетических затрат на проведение роботизированных операций (до 9.5% для класса длинноходных перемещений и до 23% для класса короткоходных перемещений), а также возможного увеличения производительности (до 12% для класса длинноходных перемещений).

Таким образом, представленные выводы подтверждают достижение цели диссертационного исследования и позволяют сформировать ряд научно-обоснованных рекомендаций по совершенствованию РТП на промышленных предприятиях с целью достижения высоких показателей производительности и энергетической эффективности РТК без изменения технологического задания и ухудшения качества конечного продукта. При этом максимальный положительный эффект от оптимизации может быть достигнут в условиях предприятий массово оснащенных роботизированной техникой.

Список опубликованных работ по теме диссертации:

Публикации в журналах, включенных в текущий перечень ВАК

1. Мельниченко, М.А. Исследование особенностей применения метода функциональной декомпозиции при разработке имитационных моделей цифрового двойника роботизированного процесса / М.А. Горькавый, В.П. Егорова, А.И. Горькавый, М.А. Мельниченко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 3 (59). С. 27-34.

2. Мельниченко, М.А. Разработка архитектуры системы управления роботизированным производственным процессом на базе технологии цифрового двойника / М.А. Горькавый, В.П. Егорова, В.А. Соловьев, А.И. Горькавый, М.А. Мельниченко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 1 (65). С. 40-46.

3. Мельниченко, М.А. Оптимизация роботизированного технологического процесса на базе нейросетевой имитационной модели энергопотребления / М.А. Горькавый, А.И. Горькавый, М.А. Мельниченко // Изв. вузов. Электромеханика. 2023. Т. 66. № 2. С. 85-95.

4. Мельниченко, М.А. Автоматизация расчёта кинематики шестиосевого промышленного робота и моделирование его траекторных перемещений / М.А. Горькавый, А.И. Горькавый, М.А. Мельниченко, В.П. Егорова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 7 (71). С. 40-49.

5. Мельниченко, М.А. Синтез нечеткой модели энергопотребления промышленного робота на базе гибридных систем управления электрическим приводом / М.А. Горькавый, М.А. Мельниченко, А.И. Горькавый, А.С. Гудим // Изв. вузов. Электромеханика. 2024. Т. 67. №2. С. 45-55.

Публикации в журналах, входящих в Web of science или Scopus

1. Melnichenko, M.A. Improving the functioning of the cybernetic control system of the mechatronic module of the robotic complex / A.I. Gorkavyu, M.A. Gorkavyu, M.A. Melnichenko, A.V. Berkh // Lecture Notes in Networks and Systems, 2021.

2. Мельниченко, М.А. Внедрение интеллектуальных роботизированных систем в производственные процессы судостроительного предприятия / М.А. Горькавый, А.И. Горькавый, А.С. Гудим, М.А. Мельниченко, В.П. Егорова // Морские интеллектуальные технологии, 2021.

3. Melnichenko, M.A. Hybrid approach to synthesis of electromechanical block control system of mechatronic module / A.I. Gorkavyu, M.A. Gorkavyu, M.A. Melnichenko, A.A. Kuznetsov // AIP Conference Proceedings 2700, 2023.

4. Melnichenko, M.A. Automated method based on a neural network model for searching energy-efficient complex movement trajectories of industrial robot in a differentiated technological process / M.A. Gorkavyu, A.I. Gorkavyu, V.P. Egorova, M.A. Melnichenko // Frontiers in Energy Research, 2023.

5. Melnichenko, M.A. Automated synthesis of neural network energy consumption models of industrial robots as part of robotic technological complexes / M.A. Melnichenko, M.A. Gorkavyu, Y.S. Ivanov, A.I. Gorkavyu // Digital transformation in industry: trends, management, strategies, 2024.

Зарегистрированные патенты и программы для ЭВМ

1. Программа синтеза нейросетевой имитационной модели энергопотребления и оптимизации комплекса траекторий перемещений робота манипу-

лятора в ограниченном пространстве задач технологического процесса позиционирования Горькавый М. А., Горькавый А. И., Егорова В. П., Мельниченко М. А., Грабарь Д. М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022668069, 04.10.2022 Заявка № 2022666799 от 12.09.2022.

2. Программа для автоматизированного расчета прямой задачи кинематики общепромышленных и коллаборативных роботов КУКА Горькавый М.А., Мельниченко М.А., Горькавый А.И., Грабарь Д.М., Гудим А.С., Иванов Ю.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023667029, 09.08.2023. Заявка № 2023666318 от 26.07.2023

3. Программа поиска энергоэффективного положения заготовки детали внутри рабочей зоны робота-манипулятора, входящего в состав роботизированного технологического комплекса механической обработки Горькавый М.А., Мельниченко М.А., Иванов Ю.С., Грабарь Д.М., Горькавый А.И., Гудим А.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023667029, 09.08.2023. Заявка № 2023666318 от 26.07.2023

4. Способ оптимизации положения обрабатываемой заготовки для сокращения энергозатрат промышленного робота в технологическом процессе механообработки Горькавый М.А., Мельниченко М.А., Гудим А.С. (заявка на патент № 2024105025);

Личный вклад автора в работах, написанных в соавторстве, заключается в следующем: обзор и анализ существующих методов повышения эффективности функционирования РТП на производстве; разработка измерительных устройств для проведения экспериментов по измерению энергопотребления и динамических параметров ПР, исполнение одиночных траекторных перемещений и проверку энергетической эффективности областей рабочей зоны ПР; разработка нейросетевых и нейро-нечётких имитационных моделей энергопотребления ПР в составе РТК; разработка и верификация алгоритмов оптимизации траекторных перемещений ПР по критериям минимизации энергопотребления и времени на исполнение роботизированных операций; автоматизация синтеза имитационных моделей с помощью разработанного программного обеспечения, включающего графический интерфейс пользователя.