

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента

доктора технических наук Шеленка Евгения Анатольевича

на диссертацию Мельниченко Маркела Андреевича

«Разработка интеллектуальных моделей и алгоритмов повышения эффективности функционирования роботизированных технологических процессов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ»)

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время наблюдается повышенный интерес производственных предприятий к автоматизированным решениям на основе промышленных роботов. Хорошо известно, что применение промышленных робототехнических комплексов позволяет значительно увеличить производительность технологических участков, повысить качество изготавливаемой продукции, обезопасить труд и снизить затраты на производство. Однако массовая роботизация производства как правило сопровождается повышением энергоэнергетических затрат, что в свою очередь ведет к необходимости решения проблем повышения энергетической эффективности роботизированных технологических процессов.

Одним из перспективных путей решения подобных задач является интеграция технологий искусственного интеллекта (интеллектуальных методов, моделей и алгоритмов) в системы управления роботизированными комплексами. Данные решение позволяют модернизировать технологический процесс в соответствии с определенной системой критериев за счет определения оптимальных параметров, влияющих на производительность и энергетическую эффективность. При этом, разработка прикладных программных средств, реализующих алгоритмы оптимизации, позволяет инженерам-операторам роботизированных комплексов выполнять оптимизационные мероприятия с минимальными затратами.

Таким образом, тема диссертационного исследования является весьма актуальной для современной науки и промышленности.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 126 наименований и 20 приложений, изложенных на 209 страницах машинописного текста, включая 65 рисунков в 15 таблиц.

Во *введении* обоснована актуальность работы, поставлена цель, определены задачи и сформулирована научная новизна исследования, отмечена

практическая значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту, представлено подтверждение достоверности результатов диссертационной работы за счет использования современных и широко апробированных методов исследования.

В *первой главе* представлена общая характеристика и области применения промышленных роботов, разработана классификация роботизированных технологических процессов, согласно которой автор разделяет технологические процессы с участием роботов по признаку преобладания длинноходных и короткоходных перемещений в составе роботизированной операции, а также проведено исследование существующих способов повышения эффективности функционирования роботизированных технологических процессов.

Во *второй главе* разработана новая нейро-нечеткая имитационная модель энергопотребления промышленного робота-манипулятора, которую автор синтезирует на основе экспериментальных данных, полученных с использованием манипулятора KUKA KR10 R1100 sixx. Представленный подход позволяет упростить синтез модели и снизить трудоемкость формирования детализированного цифрового двойника по техническим данным, которые в большинстве случаев закрыты для пользователя.

В *третьей главе* автор, основываясь на представленной в первой главе классификации, решает задачу оптимизации роботизированного технологического процесса с преобладанием длинноходных перемещений по двум критериям: максимизации производительности и минимизации энергетических затрат на проведение роботизированной операции укладки грузов. В результате применения разработанного метода оптимизации определены оптимальные параметры технологического процесса, удовлетворяющие требуемым критериям.

В *четвертой главе* решена оптимизационная задача для класса роботизированных технологических процессов с преобладанием короткоходных перемещений на примере роботизированной механообработки. Согласно разработанным методу и алгоритму оптимизации определена точка позиционирования заготовки в рабочей зоне робота, для которой характерно наименьшее значение потребляемой роботом энергии при реализации его перемещений.

В *заключении* представлены основные выводы по диссертационной работе и научно-обоснованные рекомендации по повышению эффективности функционирования роботизированных технологических процессов.

Полученные автором выводы подтверждают успешное решение задач и достижение цели диссертационной работы.

### **Новизна, значимость и достоверность результатов диссертации**

**Научная новизна** рассматриваемой работы заключается в следующем:

1. Сформирована методика идентификации нелинейной зависимости энергопотребления и затрат времени промышленного робота от форм траекторий перемещения центральной точки инструмента, позволяющая существенно упростить процедуру оптимизации роботизированного технологического

ского процесса.

2. Разработана нейро-нечеткая имитационная модель энергопотребления промышленного робота-манипулятора на основе экспериментальных и синтетических данных, востребованная при разработке и апробации алгоритмов снижения энергопотребления промышленного робота

3. Предложена технология синтеза нейро-нечеткой имитационной модели энергопотребления промышленного робота, обеспечивающая высокую скорость синтеза в условиях частичного/полного отсутствия информации о технических характеристиках промышленного робота.

4. Разработан метод синтеза нейросетевой имитационной модели энергопотребления промышленных роботов, выполняющих дифференцированные технологические операции двух видов: с преобладанием длинноходных и с преобладанием короткоходных траекторных перемещений для формирования оптимальных алгоритмов управления роботизированным технологическим процессом.

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

**Практическая значимость** заключается в использовании полученных результатов при решении задач оптимизации роботизированных технологических процессов за счет интеллектуализации промышленных систем с целью увеличения производительности и сокращения издержек на производство. Имеются акты о внедрении и использовании.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**, подтверждаются использованием в работе методов идентификации, анализа и синтеза, компьютерного моделирования, методов теории автоматического управления элементов искусственного интеллекта, а также результатами аналитических и экспериментальных исследований, их сравнительным анализом.

Работа имеет высокую степень апробации. Основные результаты исследований докладывались автором и обсуждались на 10 научных конференциях, в том числе международных.

Материалы диссертации достаточно полно изложены в 35 научных статьях, из которых 12 проиндексированы в наукометрической базе Scopus, 9 в журналах, рекомендованных ВАК, 14 – РИНЦ. Также по результатам исследований зарегистрированы 12 программ для ЭВМ и подана одна заявка на патент.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты диссертационной работы Мельниченко М.А. могут быть использованы: в промышленности при проектировании новых и модерниза-

ции существующих роботизированных технологических процессов; в учебном процессе при подготовке специалистов инженерных направлений, а также для продолжения исследований в данном направлении.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Исследования проведены только для шестиосевых роботоманипуляторов. Возникает вопрос применимости разработанных интеллектуальных методов, моделей и алгоритмов к роботизированным технологическим процессам с применением манипуляторов, имеющих иное число степеней подвижности, а также других типов роботов, например, порталных.

2. Ряд синтезированных в работе эталонных моделей интегрирован в общую схему расчета энергопотребления промышленного робота. Синтез моделей сопровождается графическим материалом, иллюстрирующим их переходные процессы. При этом автор не выполнил оценку адекватности предложенных моделей. В связи с этим, не ясно, насколько точно эталонная модель отражает реальные переходные процессы системы управления электрическими приводами промышленного робота.

3. В диссертации рассмотрен роботизированный технологический процесс укладки грузов конкретным промышленным роботом фирмы KUKA с показателем грузоподъемности 10 кг. Масса перемещаемого груза равна 1 кг (стр. 93). В рамках данного технологического процесса с данными параметрами задача оптимизации успешно решена, однако отсутствуют исследования зависимости энергопотребления промышленного робота при переносе груза максимально допустимой массы.

4. На стр. 86 (рис. 35) приведены комплексы траекторий перемещения груза, составленные из типовых команд языка программирования Kuka robot language. При этом в работе отсутствует обоснование выбора формы траектории перемещения, в связи с чем, возникает закономерный вопрос: почему нельзя переместить груз по другой траектории, характеризующейся, например, меньшим количеством программных команд перемещения? Данный вопрос имеет особое значение, поскольку разрабатываемый автором подход к повышению энергетической эффективности основан на выборе оптимальных параметров траектории перемещения центральной точки инструмента промышленного робота (в том числе и формы траектории).

Указанные замечания не снижают значимости полученных автором работы результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования.

### **Заключение**

Диссертационная работа Мельниченко Маркела Андреевича «Разработка интеллектуальных моделей и алгоритмов повышения эффективности функционирования роботизированных технологических процессов» является завершенной научно-квалификационной работой, содержит новые научные знания, является практически полезной и решает актуальные задачи. Резуль-

таты исследования достоверны, а выводы и заключения обоснованы.

Актуальность, научная новизна и практическая значимость представленной к защите диссертационной работы соответствует критериям п.п. 9–14 действующего Положения о порядке присуждения ученых степеней, а также соответствует паспорту специальности 2.3.3.

На основании вышеизложенного считаю, что автор диссертации Мельниченко Маркел Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (технические науки).

Официальный оппонент:  
профессор высшей школы кибернетики  
и цифровых технологий  
федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Тихоокеанский государственный  
университет»,  
доктор технических наук

Шеленок Евгений Анатольевич  
«14» октября 2024 г.

Наименование организации:  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет»  
Адрес: 680035, Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136  
Сайт организации: <https://pnu.edu.ru/>  
Электронная почта: [mail@pnu.edu.ru](mailto:mail@pnu.edu.ru)  
Телефон: (4212) 97-97-00

Подпись *Шеленок Е. А.*  
Заверяю специалист по персоналу отдела кадр



*Дубина С. В. 14.10.2024*