

УТВЕРЖДАЮ:  
Проректор по научной работе  
федерального государственного  
автономного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский

Председателю диссертационного  
совета 24.2.347.07, д.т.н.,  
профессору Брованову С.В.

630073, г. Новосибирск, пр-т  
К.Маркса, 20

## **ОТЗЫВ**

**ведущей организации**

**на диссертационную работу Орла Егора Олеговича**

на тему: «Повышение энергетической эффективности систем тягового  
электропривода автономных транспортных средств»  
по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»,  
на соискание учёной степени кандидата технических наук

### **Актуальность темы исследования**

Быстрый темп развития электрического транспорта, увеличение стоимости энергоресурсов и ужесточение экологических требований к транспортным средствам, а также появление новых источников энергии повышают актуальность задачи эффективной эксплуатации такого транспорта и развития инфраструктуры зарядных устройств.

Одним из перспективных методов подвода энергии является питание от кабеля, заложенного в дорожном покрытии. Исследования по этой теме недостаточно освещены в литературных источниках, поэтому проведенное диссертационное исследование является актуальным.

Повышение энергоэффективности системы тягового электропривода, как на транспортном средстве, так и в системе внешнего электроснабжения можно обеспечить за счет использования энергосберегающих алгоритмов управления. В работе исследуется эффективность алгоритмов машинного обучения для управления тяговыми электроприводами и обеспечения возможности бездатчикового контроля переменных состояния. Технологии искусственного интеллекта сегодня являются одним из трендов в развитии автономных транспортных средств.

Еще одна перспективная задача для повышения энергоэффективности автономного электрического транспорта решается на уровне применения систем верхнеуровневого управления, которая отвечает, в частности, за планирование траектории движения. Предложенная в диссертации методика по построению одновременно безопасной и энергоэффективной траектории движения является актуальной в свете все большего распространения беспилотных транспортных средств.

### **Структура и содержание работы**

**Во введении** определены актуальность темы, цель и задачи исследования. Приведены основные положения, выносимые на защиту, изложены сведения о научной новизне, практической значимости и апробации работы.

**В первой главе** проведен анализ существующих средств и методов повышения энергетической эффективности автономных транспортных средств. Проведены обзор способов бесконтактного подвода энергии и анализ возможных компоновок тяговой системы транспортных средств.

**Вторая глава** посвящена расчёту основных характеристик тягового электропривода. Описаны выбор стандартного цикла движения, алгоритм расчета характеристик тягового двигателя и буферного накопителя энергии статистическими методами на основе выбранного цикла. Для расчета основных элементов тягового электропривода была разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ.

**Третья глава** посвящена синтезу системы управления тяговым электроприводом специального транспортного средства с бесконтактным подводом энергии, а также моделированию синтезированной системы и верификации разработанных математических моделей. Проведено сравнение энергоэффективности управления тяговым электроприводом с использованием классических регуляторов и нейрорегуляторов. Показана эффективность использования нейрорегулятора.

**В четвертой главе** описана методика разработки энергооптимальной системы автономной навигации транспортного средства на основе использования элементов технического зрения, а также алгоритмов динамического программирования и метода полей искусственных потенциалов. Описаны результаты экспериментального исследования разработанной системы навигации в одной из фирм г. Новосибирска.

### **Научная новизна, достоверность выводов, сформулированных в научно-квалификационной работе**

В диссертационной работе заявлены следующие пункты научной новизны:

1. Составлено математическое описание источника бесконтактной передачи энергии как элемента системы управления тяговым электроприводом, позволяющее анализировать динамические свойства транспортного средства при изменении параметров источника питания.

2. Предложена методика оценки переменных состояния тягового электропривода с использованием искусственных нейронных сетей, что облегчает расчет и построение бездатчиковой системы управления.

3. Синтезированы регуляторы переменных состояния тягового электропривода методом обучения искусственных нейронных сетей с подкреплением, обеспечивающие энергоэффективное управление транспортным средством.

4. Предложена методика расчёта безопасной и энергоэффективной траектории ТС при объезде препятствия, использование которой, в конечном итоге, обеспечит безаварийную эксплуатацию электротранспорта.

В ходе проведенных исследований автором были получены следующие результаты:

1. Рекомендована компоновка системы тягового электропривода на основании выбранного цикла движения транспортного средства, позволяющая повысить энергоэффективность ТС.

2. Выбраны тяговый двигатель и буферный накопитель энергии на основании статистических методов расчета. Алгоритм расчета зарегистрирован в качестве объекта интеллектуальной собственности.

3. Предложено математическое описание источника бесконтактного подвода энергии как элемента системы автоматического управления, позволяющее анализировать динамические характеристики транспортного средства при изменении параметров ИП.

4. Разработан наблюдатель для оценки момента тягового электропривода на основе искусственных нейронных сетей, который использован для построения бездатчиковой системы управления.

5. Синтезирован нейрорегулятор момента тягового электропривода с применением методики обучения нейронных сетей с подкреплением, в результате применения которого энергопотребление сократилось на 25,8%.

6. Разработана система управления автономной навигацией ТС, соответствующая критериям безопасности и энергоэффективности для обеспечения безаварийной эксплуатации транспортного средства.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается структурным и имитационным моделированием исследуемой системы, а также проведенными экспериментальными исследованиями.

Совокупность полученных теоретических и практических результатов создает предпосылки для повышения энергоэффективности автономных электрических транспортных средств с бесконтактным подводом энергии и, как следствие, расширения области их применения и внедрения.

### **Практическая ценность работы**

Полученное математическое описание источника бесконтактного подвода энергии как объекта управления может быть использовано специалистами при проведении научных исследований и практической реализации тяговых электроприводов.

Использование искусственных нейронных сетей для наблюдения и регулирования переменных состояния тягового электропривода открывает возможность для повышения энергетической эффективности систем тягового электропривода.

Предложенные методы энергоэффективной автономной навигации транспортных средств могут способствовать расширению сфер применения электротранспорта с бесконтактным подводом энергии.

Полученные в работе алгоритмы и методы могут быть использованы предприятиями, специализирующимися на разработке автономного электротранспорта.

### **Соответствие положений, выносимых на защиту, материалам диссертации**

На основании анализа содержания диссертационной работы, ее научной новизны и практической ценности можно сделать вывод о полном соответствии содержания диссертационного исследования и вынесенных на защиту положений. Положения научно обоснованы и вносят вклад в решение задач повышения энергоэффективности автономных транспортных средств.

### **Публикации и апробация положений диссертации**

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 8 научных работах, среди которых: публикаций в журналах из перечня ВАК РФ – 4; публикаций в журналах, индексируемых базой Scopus – 1; свидетельств о регистрации программы для ЭВМ – 1. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях.

### **Замечания по работе**

1. В работе не приведены допущения, принятые при линеаризации структурной схемы для синтеза регуляторов электропривода классическими методами.

2. Следовало бы подробнее описать математический аппарат, лежащий в основе использованных алгоритмов машинного обучения.

3. Отсутствуют количественные показатели результатов эксперимента по подтверждению применимости метода полей искусственных потенциалов.

4. Не представлено обоснование, почему синтез регуляторов производился методом СПР, а не были использованы другие методы.

5. Спорным представляется утверждение о том, что случайный процесс изменения мощности имеет нормальный закон распределения.

6. В работе сравниваются САУ тягового электропривода транспортных средств, питаемые от внешнего источника, с БНС и без БНС насколько это применимо для автономных транспортных средств.

7. На рис. 3.22 имеется опечатка «понижающий трансформатор» должно быть «понижающий преобразователь».

## Общая оценка работы

Диссертация и автореферат свидетельствуют о комплексном подходе к решению важной проблемы повышения энергетической эффективности транспортных средств, что является безусловным достоинством представленной работы. Предложенные пути решения поставленных в работе задач свидетельствуют о достаточно высокой компетентности автора.

В целом, автореферат написан грамотно и лаконично, показывает научную состоятельность диссертационной работы и обоснованность выдвижения автора на соискание ученой степени кандидата технических наук.

## Заключение

Научно-квалификационная работа Орла Егора Олеговича на тему «Повышение энергетической эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств» представляет собой законченную работу, выполненную на актуальную тему. Полученные в работе результаты имеют большое значение для науки и практики в области современного регулируемого электропривода.

Учитывая вышесказанное, можно считать, что Орел Егор Олегович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы.

Заключение принято на заседании кафедры «Электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", протокол № 14/23 от 14 ноября 2023 г.

Кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
доцент кафедры «Электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
Кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
зав. кафедрой «Электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

В.А. Глушенков

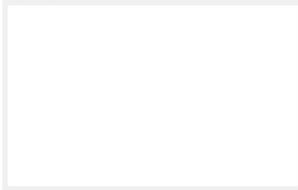
М.Ю. Румянцев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования "Национальный исследовательский университет  
"МЭИ"

Почтовый адрес: 111250, Россия, г. Москва, ВН.ТЕР.Г.  
МУНИЦИПАЛЬНЫЙ ОКРУГ ЛЕФОРТОВО, УЛ КРАСНОКАЗАРМЕННАЯ,  
Д.14, СТР.1.

Тел. +7 495 362-70-01, E-mail: universe@mpei.ac.ru

Я, Драгунов Виктор Карпович утвердивший отзыв ведущей  
организации, даю согласие на включение своих персональных данных в  
документы, связанные с защитой диссертации Орла Егора Олеговича, и их  
дальнейшую обработку.

  
В. К. Драгунов

*Отзыв получен 04. декабря 2023, - му / Дядков М.А.*

*С отзывом ознакомлен  
04.12.2023*

 / Орел Е.О. /