

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

#### **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**

Тема диссертационной работы Орла Е.О. соответствует актуальной проблеме поиска эффективных технических решений, обеспечивающих создание экономичных автономных транспортных средств (ТС) с целью реализации возрастающего объема перевозок. Одним из перспективных направлений в рамках этой тенденции являются поиск альтернативных источников питания и разработка комбинированных энергоустановок, включающих в себя интенсивно внедряемые в промышленности и на транспорте электроприводы как постоянного, так и переменного тока.

Для управления автономным транспортным средством рассматривается комбинированная энергоустановка, состоящая из бесконтактного источника питания и бортового буферного накопителя энергии, применение которого значительно уменьшает броски тока, что в конечном итоге приведет к уменьшению потерь.

Значимый вклад в повышение энергоэффективности получен за счет применения алгоритмов машинного обучения при управлении тяговым электроприводом, в частности при синтезе регулятора момента и обеспечении возможности бездатчикового контроля переменных состояния.

Интерес представляет разработанная автором энергооптимальная система автономной навигации транспортного средства с применением элементов технического зрения. При этом, в качестве критериев оптимальности управления автономным ТС принимается минимальный расход электроэнергии и минимальная длина пути до финальной точки на безопасном расстоянии до объектов окружающей среды. Причем планирование движения транспортного средства выполняется с использованием метода искусственных полей потенциалов, а для обеспечения энергоэффективности объезда препятствия и обеспечения минимального потребления энергии от буферного накопителя энергии используется метод динамического программирования в ограниченной окрестности локального плана, вычисленного методом искусственных потенциальных полей.

#### **Структура и содержание работы**

**Во введении** обоснованы актуальность работы, её цель и задачи, новизна основных научных положений, представлены теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** рассмотрены существующие методы повышения энергетической эффективности автономных транспортных средств.

Представлен обзор способов бесконтактного подвода энергии, а также приведен анализ компоновок тяговой системы транспортных средств с целью выбора наиболее энергоэффективной.

**Во второй главе** обоснован выбор цикла движения для исследования показателей автономного электрического ТС и уделено внимание расчету основных характеристик исследуемого тягового электропривода (тягового двигателя и буферного накопителя энергии). Для расчета основных элементов тягового электропривода статистическими методами на основе выбранного цикла была разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ.

**В третьей главе** описан процесс синтеза системы управления тяговым электроприводом автономного транспортного средства с бесконтактным подводом энергии. Разработанные математические модели были верифицированы с помощью структурного и имитационного моделирования. Выполнено сопоставление энергетической эффективности управления электродвигателем с применением традиционных регуляторов и нейрорегуляторов, показано преимущество использования нейрорегулятора.

**В четвертой главе** описана методика разработки системы автономной навигации транспортного средства на основе использования элементов технического зрения. В основу подхода заложены алгоритмы динамического программирования и метод полей искусственных потенциалов. Представлены результаты тестирования разработанной навигационной системы.

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

В процессе выполнения диссертационного исследования 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 источника питания.
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.

Полученные в работе результаты были подтверждены путем структурного и имитационного моделирования исследуемой системы, а также в ходе проведенного экспериментального исследования. Данные результаты позволили сформулировать следующие основные положения, составляющие научную новизну исследования:

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 состояний 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.

### **Практическая ценность работы**

К основным практическим результатам диссертации следует отнести обоснование рекомендаций по построению систем тягового электропривода с комбинированными энергоустановками и доказательство перспективности их применения.

Внедрение рекомендаций и технических решений по системам тягового электропривода может быть полезным для специалистов, занимающихся разработкой автономного электротранспорта в части автоматизированного электропривода.

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

Выносимые на защиту положения научно обоснованы и полностью соответствуют содержанию диссертационной работы.

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

По теме диссертации опубликовано восемь научных работ, из которых четыре публикации в журналах из перечня ВАК РФ, одна публикация в журналах, индексируемых базой Scopus и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Апробация основных положений работы проходила на международных и всероссийских конференциях.

## Замечания по работе

1. Целью работы заявлено «повышение энергоэффективности тягового электропривода автономного транспортного средства...» Очевидно, бесконтактная передача электроэнергии на движущееся транспортное средство существенно влияет на эффективность использования первичной сетевой электроэнергии. В диссертации (подраздел 3.1) этому вопросу не уделено должного внимания.  
Цель работы достигается «за счёт внесения конструктивных изменений...», однако предметом исследования является «математическая модель бесконтактного подвода энергии, алгоритмы управления тяговым электроприводом...»?
2. На стр.28 в таблице 1.1 указано, что индукционный способ бесконтактной передачи энергии «не чувствителен к металлам». Хотелось бы получить пояснения.
3. Вывод 2 на стр.49: «Доказано преимущество применения нейросетевого управления...» основывается только на основании литературного обзора, причём применительно к различным объектам, не относящимся к транспорту.
4. Подразделы 2.3, 3.5 посвящены выбору аккумуляторного накопителя электроэнергии для тягового электропривода и исследованию его роли в электроприводе, однако анализ режимов собственно батареи аккумуляторов и расчёт её параметров не приводятся.  
Предположение о возможном уменьшении ёмкости накопителя, при использовании бесконтактного способа подзарядки аккумуляторов, логично, но это приведёт к снижению автономности электротранспортного средства, что не отражено в работе.
5. На стр. 95, на рисунке 3.22 имеется ошибка – вместо блока «понижающего трансформатора» должен быть DC/DC преобразователь.
6. В работе сделан вывод о применимости нейрорегулятора при моделировании на одном участке выбранного цикла движения. Проводились ли исследования на участках с другим профилем скорости?
7. В работе не обоснован выбор структуры целевой функции, используемой для обучения нейрорегулятора.
8. Разве не очевидным является вывод о повышении точности локализации с использованием нескольких камер глубины?

## Общая оценка работы

Изучение представленных соискателем материалов позволяет сделать следующие выводы. Диссертационная работа соответствует заявленному

паспорту специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы». Название диссертации, цель работы и основные научные задачи содержат ключевые слова из паспорта заявленной научной специальности. В результате исследований в диссертации представлены новые научно обоснованные технические решения и разработки, которые играют значительную роль в повышении энергоэффективности систем электропривода автономного транспорта.

Диссертационная работа обладает научной новизной и практической значимостью полученных результатов. Каждое из положений диссертации опубликовано в журнале из перечня ВАК.

Автореферат в достаточной мере раскрывает основное содержание работы.

### Заключение

На основании анализа диссертации и автореферата можно сделать вывод о соответствии работы Орла Егора Олеговича на тему «Повышение энергетической эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств» требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ.

Автор диссертационной работы Орел Егор Олегович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент,  
профессор, доктор технических наук,  
профессор отделения  
Электроэнергетики и Электротехники  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский Томский  
политехнический университет»

Б.В. Лукутин

Согласие на обработку персональных

Б.В. Лукутин

### Сведения об организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел: +7 (3822) 60-63-

Подпись Лукутина

Учёный секретарь И

Отзыв на работу  
01.12.2023  
Лу / Дядко МА /  
Е.А. Кулинич  
С отзывом ознакомлен  
01.12.2023  
Орел Е.О.