

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.437.14, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 17 марта 2025 г. № 2025-02/04

О присуждении Лисову Андрею Анатольевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка и исследование системы электронного дифференциала для электроавтомобиля» по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» принята к защите 10 января 2025 г. (протокол заседания № 2025-02/01) диссертационным советом 24.2.437.14, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 454080, г. Челябинск, пр-т им. В.И. Ленина, 76; приказ о создании диссертационного совета – № 507/нк от 24.03.2023.

Соискатель Лисов Андрей Анатольевич, 5 января 1997 года рождения, в 2021 году окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». В настоящее время является аспирантом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и не осуществляет трудовую деятельность.

Диссертация выполнена на кафедре электропривода, мехатроники и электромеханики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор Возмилов Александр Григорьевич, профессор кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты:

1. Хакимьянов Марат Ильгизович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (ФГБОУ ВО «УГНТУ»), г. Уфа;

2. Чернышев Алексей Дмитриевич, кандидат технических наук, ведущий инженер конструкторского бюро электропривода общества с ограниченной ответственностью Научно-производственного предприятия "Резонанс" (ООО НПП "Резонанс"), г. Челябинск,

– дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти, в своём положительном отзыве, подписанном заведующим кафедрой «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Бобровским Александром Викторовичем и утверждённом к.т.н., доцентом Петерайтисом Сергеем Ханцасовичем, проректором по научно-инновационной деятельности, указала, что диссертационная работа Лисова Андрея Анатольевича является завершённой научно-квалификационной работой, в которой дано новое решение актуальной задачи разработки системы электронного дифференциала на основе нейронной сети, позволяющей повысить безопасность автомобильного транспорта на дорогах за счёт повышения эффективности управления электроприводом электроавтомобиля при осуществлении поворотов и манёвров. Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата наук согласно п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 №842) с изменениями постановления правительства РФ от 21 апреля 2016 г. №335 «О внесении изменений в положение присуждения учёных степеней», и ее автор заслуживает присуждения ученой степени

кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы».

Соискатель имеет 26 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 10 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы (для спец. 2.4.2), 2 работы в издании, индексируемом базой Scopus и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Наиболее значимые публикации по теме диссертации:

1. **Лисов, А.А.** Выбор тягового электродвигателя для арктического электротранспорта / А.А. Лисов, А.Г. Возмилов, Н.Ю. Кулева, А.И. Согрин, Р.А. Закиров, Р.Ю. Илимбетов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – №2. – С. 44-56. (11 с. / 13 с.)

2. **Лисов, А.А.** Акустическое обнаружение транспортных средств аварийных служб с использованием сверточных нейронных сетей / А. А. Лисов, А. З. Кулганатов, С. А. Панишев // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 95-107. – DOI 10.17816/transsyst20239195-107. (10 с. / 13 с.)

3. **Лисов, А.А.** Разработка системы электронного дифференциала для электромобилей на основе нейросети глубокого обучения / А.А. Лисов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2024. – Т. 10. – № 3. – С. 351–367.

4. **Лисов, А.А.** Выбор архитектуры нейронной сети для электронной дифференциальной системы электроавтомобиля / **А.А. Лисов**, А.Г. Возмилов, К.А. Гундарев // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 446-462. (14 с. / 17 с.).

5. Возмилов, А.Г. Разработка и моделирование пропорционально-интегрального регулятора для электронного дифференциала электротрактора сельскохозяйственного назначения / А.Г. Возмилов, В.Г. Урманов, **А.А. Лисов**, Р.Ю. Илимбетов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2022. – №2(62). – С. 119-124 (5 с. / 6 с.)

6. **Лисов, А. А.** Исследование влияния batch size на качество обучения нейронных сетей / А. А. Лисов, А. Г. Возмилов, В. Г. Урманов, С. А. Панишев // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2023. – Т. 19. – № 2. – С. 324-332. (7 с. / 9 с.)

7. Vozmilov, A. Study and Mathematical Modeling of an Adaptive Controller with a Self-Tuning System / A. Vozmilov, **A. Lisov**, V. Urmanov // 2023 International Conference on

Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2023. – P. 526-530. (3 с. / 5 с.). – DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139081.

8. **Lisov, A.A.** Development of an Electronic Differential System Based on Artificial Neural Networks for Electric Transport / A.A. Lisov, S.A. Panishev, K.A. Gundarev // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2024. – P. 192-196 (3 с. / 5 с.). – DOI: 10.1109/UralCon62137.2024.10718938

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти отзыв подписан к.т.н., доцентом, зав. кафедрой «Проектирование и эксплуатация автомобилей», Бобровским А.В., и утверждён проректором по научно-инновационной деятельности, к.т.н., доцентом С.Х. Петерайтисом. Замечания: 1. В работе разработана физическая модель автомобиля, однако описание математической модели системы электронного дифференциала может быть расширено. Было бы полезно привести более подробное описание уравнений и взаимосвязей, используемых для управления системой. 2. Архитектура нейронной сети описана достаточно полно, но можно было бы подробнее рассмотреть обоснование выбора конкретных гиперпараметров и слоёв сети, а также провести сравнение с альтернативными архитектурами, что помогло бы подчеркнуть рациональность выбора. 3. В разделе, касающемся сбора данных с датчиков, можно было бы дополнительно рассмотреть потенциальные погрешности измерений и влияние различных условий окружающей среды на точность получаемых данных. Это добавило бы глубины экспериментальной части работы. 4. В диссертации представлены технические и научные результаты, но было бы полезно дополнить исследование разделом, посвящённым экономической оценке предлагаемой системы, например, рассмотреть затраты на её внедрение и возможные преимущества в эксплуатации по сравнению с традиционными решениями. 5. В работе предлагаются перспективные решения для внедрения системы электронного дифференциала, однако можно было бы рассмотреть потенциальные риски при использовании предложенных решений в условиях реальной эксплуатации (например, отказ оборудования, сбой работы нейронной сети), а также предложить способы их минимизации.

2. Официальный оппонент – ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, отзыв подписан д.т.н., доцентом, заведующим кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий» М.И. Хакимьяновым. Замечания: 1. В диссертации автор рассматривает две компоновки электромобиля – полноприводную и заднеприводную. Но сейчас большинство автомобилей выполняется с передним приводом, почему не рассматривалась переднеприводная компоновка? 2. Автор строит математические модели нелинейной СЭД при углах поворота 10 и 30 градусов. Математическая модель должна быть универсальной, применимой для любого угла, неправильно делать новую модель для каждого угла поворота руля. 3. В работе отмечается, что при скорости выше 50 км/ч наблюдается снижение качества управления, что ограничивает применение системы на высоких скоростях. При этом не объясняются причины ухудшения. Скорость 50 км/ч является достаточно низкой, следовало бы проанализировать требования к быстродействию системы управления и мощности используемых контроллеров. 4. Для измерения ускорения и положения в пространстве автор использует специализированный датчик «MPU6050» в виде готового модуля с подключением к микроконтроллеру по интерфейсу I2C. Это последовательный интерфейс, достаточно медленный. Его использование не ухудшает динамические характеристики системы управления СЭД? 5. В диссертации указано, что время вычислений удалось снизить до 20 мс. Непонятно, это много или мало, достаточно ли этого? Не указано, какой микроконтроллер с какой тактовой частотой способен обеспечить такое время вычислений. 6. Имеется ряд замечаний к оформлению автореферата и диссертации. 6.1. На стр. 7 автореферата приводятся ссылки на конструктивные постоянные транспортных средств (L , K , d_r , r , l_r), которые не расшифровываются. 6.2. Рисунок 3 автореферата «Управляющий ШИМ-сигнал при соотношении плеч переменного резистора $1,5R / 1R$ » не несет никакой полезной информации. 6.3. Данные, приведенные в таблице 1 «Экспериментальные данные, полученные с датчиков модели электромобиля», следовало бы привести в общепринятых физических единицах, а не в кодах АЦП. 6.4. Рисунки 3.4 и 4.1 в диссертации одинаковы. 7. В диссертации на стр. 32 отмечается, что в системе не учитывается техническое состояние автомобиля (износ шин, весовые характеристики, люфты механизмов). Откуда может быть получена эта информация, возможно ли в принципе ее учитывать? 8. Непонятно, как тема гранта «Умник» связана с темой диссертации?

3. Официальный оппонент – ООО НПП «Резонанс», г. Челябинск, отзыв подписан к.т.н., ведущим инженером конструкторского бюро электропривода Чернышевым А.Д.

Замечания: 1. В первой главе на страницах 20–22 отмечено, что наиболее перспективным является компоновочное решение «мотор-колесо». Это решение представляется обоснованным, и в исследовании подробно описаны его преимущества. Вместе с тем возникает вопрос об экономическом обосновании такого типа решений для автотранспортных средств. 2. В таблице 1.1 приведены примеры решений на основе мотор-колёс, которые являются концептуальными. На основании имеющихся данных установлено, что два электропривода малой мощности зачастую дороже одного электропривода эквивалентной мощности. При этом остаётся неясным, проведён ли анализ рынка, подтверждающий обратное. Была бы полезна информация о проведённом анализе и его результатах, если таковой был выполнен. 3. Некоторые пункты таблицы 1.2 кажутся спорными: • «Большая масса механического дифференциала», есть предположение, что масса дифференциала даже в совокупности с КПП будет меньше, чем суммарная масса двух двигателей, двух инверторов, системы охлаждения, набора шлангов, силовых проводов и прочих элементов. • Надёжность конечного устройства зависит от надёжности отдельных узлов и компонентов. В СЭД этих компонентов значительно больше, чем в механическом дифференциале. Поэтому утверждение о том, что устройство с электронным дифференциалом будет более надёжным, требует дополнительного обоснования. • Стоимость двух электроприводов с контроллером, достаточным для работы нейронной сети, скорее всего, будет выше, чем стоимость механического дифференциала с блокировкой. 4. Из рисунка 2.8 не видно, как взаимодействуют органы управления водителя (оператора). Создаётся впечатление, что исследование в большей степени посвящено беспилотным транспортным средствам и не учитывает действия оператора (водителя). Кроме того, на рисунке 2.8, вероятно, отсутствует информационная линия между BMS батареи и МК, если только это не отдельный МК СЭД. 5. В четвёртой главе указано, что система электронного дифференциала будет работать совместно с гидравлической тормозной системой для реализации функций ABS, и основной будет именно гидравлическая тормозная система. Не правильнее ли будет осуществлять торможение в основном с помощью электродвигателей? Это положительно скажется на энергетической эффективности автотранспортного средства. Применяемые в электроприводах датчики положения значительно точнее датчиков скорости систем ABS. Это значит, что регулирование торможения будет выполняться более точно. Кроме того, при использовании электродвигателей торможение будет осуществляться без использования колодок и дисков, что снизит эксплуатационные расходы транспортного средства. 6. После

ознакомления со второй главой, появляются вопросы о вычислительных мощностях, которые потребуются на борту транспортного средства для работы довольно сложной нейронной сети. Хотелось бы понять, как это повлияет на конечную стоимость устройства. 7. Раздел, посвящённый оптимизации работы нейронных сетей на маломощных вычислительных устройствах, демонстрирует наличие способов снижения требований к вычислительным ресурсам. Однако требуется больше практических примеров и сравнений реализации разработанного алгоритма СЭД в условиях ограниченных вычислительных мощностей, например, на процессоре ARM Cortex. 8. Несмотря на то, что система «мотор-колесо» представляется дорогой для применения в автомобилестроении, она демонстрирует высокую эффективность при использовании в специальных транспортных средствах в формате мотор-двигателя. Было бы интересно оценить масштабируемость предложенных методов на более крупные транспортные средства. 9. Хотелось бы увидеть больше информации об адаптации рассматриваемой в работе СЭД к различным условиям. 10. В диссертации подробно рассмотрены специфические режимы работы системы электронного дифференциала: картинг и дрифт. Однако, хотелось бы увидеть, как СЭД функционирует не только в режиме поворота. 11. У многодвигательных систем тяговых приводов есть проблема коррекции скорости колёс не только при повороте транспортного средства. Для полноприводного варианта актуальна проблема галопирования, особенно на пневмошинах, а также отклонения от прямолинейного движения из-за погрешностей датчиков, калибровок и разброса параметров устройств. Интересно было бы ознакомиться с адаптивностью системы к экстремальным условиям: высоким и низким температурам, резко изменяющимся дорожным покрытиям. 12. Хотя работа в основном сосредоточена на точности и производительности нейронной сети для управления системой электронного дифференциала, однако, также следует рассмотреть вопросы влияния системы электронного дифференциала и выбранного метода оптимизации работы нейронной сети на конечную энергоэффективность транспортного средства. Кроме того, интересно было бы узнать о влиянии наличия системы электронного дифференциала на эксплуатационные затраты транспортного средства. Предполагается, что внедрение такой системы способно увеличить ресурс элементов тормозной системы, подвески и покрышек.

4. ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа отзыв подписан д.т.н., доцентом кафедры «Электротехника и электротехнологии» Янгировым И.Ф. Замечания: 1. По тексту автореферата не ясно, каким конкретным образом

разрабатывалась система управления физической моделью электроавтомобиля. 2. Из текста также не ясно каким образом в штатном режиме происходит работа связки ПК-микроконтроллер. 3. Хотелось бы больше разъяснений процесса подготовки при физической реализации сравнительного эксперимента систем электронного дифференциала при повороте.

5. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», г. Уфа, отзыв подписан д.т.н., профессором кафедры «Электрические машины и электрооборудование» Линенко А.В. Замечания: 1. Не отображён принцип интеграции ABS, ESP с электронным дифференциалом на основе нейронных сетей для управления автомобилем в реальном времени. 2. С какой модели автомобиля были взяты конструктивные постоянные, показанные на рисунке 4? Рисунок 4 не является математической моделью, а только отображает частный случай в среде Matlab/Simulink.

6. ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет», г. Ижевск, отзыв подписан д.т.н., профессором кафедры «Автоматизированный электропривод», Кондратьевой Н.П. Замечание: 1. В автореферате нет информации о моделях использованных: двигателей, контроллере, датчиков и иных вспомогательных элементов, их влиянии друг на друга.

7. ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, отзыв подписан членом-корреспондентом Российской Академии Естествознания, д.т.н., профессором кафедры «Кибернетические системы», Кузяковым О.Н. Замечания: 1. В тексте автореферата автором не разъяснено по какому интерфейсу происходит передача показаний датчиков от микроконтроллера к компьютеру и каком виде представлены эти данные. 2. В автореферате не указано, каким пунктам паспорта специальности соответствуют защищаемые научные положения. 3. Число сформулированных задач исследования не соответствуют числу полученных результатов в выводах работы.

8. ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т.Трубилина», г. Краснодар, отзыв подписан д.т.н., профессором, заведующим кафедрой «Электрические машины и электропривод» Оськиным С.В. и к.т.н., доцентом кафедры «Электрические машины и электропривод» Баракиным Н.С. Замечания: 1. По тексту автореферата не ясно, как учитывается гистерезис регулирования в системе управления. 2. Отсутствует оценка устойчивости системы регулирования.

9. ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева», г. Москва, отзыв подписан к.т.н., доцентом кафедры «Автоматизация и роботизация технологических процессов им. академика И.Ф. Бородина» Большиным Р.Г.

Замечания: 1. Автором получены экспериментальные данные, которые состоят из 217 отфильтрованных замеров, которые являются основой для датасета, однако обычно датасет имеет размерность намного выше, не отображается ли это на производительности и точности конечного результата? 2. В качестве сравнительного анализа систем электронного дифференциала при поворотах хотелось бы увидеть не только эксперименты на двух разных углах поворота, а функцию зависимости отклонения от идеальной траектории поворота при различной вариации этого угла. 3. Исследование влияния параметров и гиперпараметров на точность прогнозирования нейронной сети в тексте автореферата отображены недостаточно подробно.

10. ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда, отзыв подписан к.т.н., доцентом кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Смирновым П.И. Замечания: 1. Ограниченность анализа компоновок тягового электропривода. В автореферате рассматривается лишь две компоновки тягового электропривода, однако не представлены возможные альтернативы, такие как передний или центральный привод, которые могут иметь свои преимущества в зависимости от условий эксплуатации. Более широкий сравнительный анализ различных вариантов привода мог бы добавить глубину исследованию. 2. Влияние скорости на эффективность нелинейной системы. Указывается, что эффективность нелинейной системы снижается при скорости более 50 км/ч, однако в тексте не приводится более детального анализа, как скорость влияет на результат. Подробности о том, как именно изменяется эффективность в разных условиях, были бы полезны для более полного понимания ограничений этой системы. 3. Масштабируемость методики получения экспериментальных данных. Приведённое утверждение о лёгкости масштабирования методики и её автоматизации в реальных условиях звучит обнадеживающее, однако не хватает примеров или конкретных данных, подтверждающих эту способность в разных эксплуатационных сценариях. Это позволило бы лучше понять, к методика адаптируется к разнообразию параметров и условий.

11. ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, отзыв подписан к.т.н., доцентом кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Рандиным Д.Г. Замечания: 1. Не дана оценка эффективности предложенной структуры в сравнении с другими типами нелинейных систем управления: оптимальных, адаптивных и пр. 2. Не приведена расшифровка структуры основных функциональных блоков на рисунках 2 и 4, что затрудняет понимание моделируемых процессов.

12. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет», г. Оренбург, отзыв подписан д.т.н, профессором кафедры «Электротехнологии и электрооборудование» Петько В.Г. и преподавателем кафедры «Электротехнологии и электрооборудование» Самосюком В.В. Замечания: 1. Не указаны размерности физических величин, используемых в уравнениях, приведённых в первой главе автореферата. 2. В уравнении (4) сопротивление R_3 , скорее всего, должно быть возведено в квадрат. 3. На схеме, приведённой на рисунке 2, сопротивления изображены не по ГОСТ. 4. Из автореферата (например, стр. 15) не ясно о какой скорости линейной или угловой идёт речь. Нет и единиц измерения.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается публикациями авторов по заданной тематике. За последние 5 лет имеются публикации: доктор техн. наук, доцент Хакимьянов М.И. – 15 публикаций в изданиях из перечня ВАК, 4 публикации в изданиях, индексируемых в Scopus; канд. техн. наук Чернышев А.Д. – 4 публикации в изданиях из перечня ВАК, 1 публикация в изданиях, индексируемых в Scopus; ведущая организация – 48 публикаций в изданиях из перечня ВАК, 15 публикаций в изданиях, индексируемых в Scopus. Сотрудниками ведущей организации являются ученые и специалисты, научная деятельность которых проходит в области транспорта, электропривода и машинного обучения: к.т.н., доцент Бобровский А.В., к.т.н., доцент Воронов Д.Ю., д.т.н., профессор Егоров А.Г., к.т.н., доцент Смоленская Н.М. и др.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана модель системы электронного дифференциала электроавтомобиля на основе нейронной сети, учитывающая динамику движения, траекторию движения и стиль вождения для адаптивного управления скоростью электродвигателей;

разработана методика получения экспериментальных данных для обучения искусственной нейронной сети для управления электроприводом электроавтомобиля при поворотах и манёврах, основанная на идеальных кривых поворота и разработанной модели электромобиля;

предложена и обоснована модель системы электронного дифференциала на основе нейронных сетей для электроавтомобилей и беспилотных наземных транспортных средств, которая позволяет повысить безопасность движения за счёт более эффективного управления электроприводом при поворотах и манёврах.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана эффективность использования предложенной модели управления скоростью вращения тяговых приводов электроавтомобиля на основе нейронных сетей;

применительно к проблематике диссертации результативно использованы сведения из преобразовательной техники, методы экспериментального исследования, алгоритмы машинного обучения, правила разработки принципиальных схем и печатных плат, использованы сведения из цифровой техники (программирование микроконтроллеров, цифровая фильтрация и передача данных);

изложено обоснование выбора нейронной сети для модели системы электронного дифференциала электроавтомобиля;

проанализирована эффективность существующих моделей систем электронного дифференциала для управления тяговым электроприводом электроавтомобиля при движении на поворотах и манёврах;

изучено влияние параметров и гиперпараметров архитектуры нейронной сети глубокого обучения на конечную точность прогнозирования, и, следовательно, на эффективность управления тяговыми приводами электроавтомобиля.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана и внедрена методика обучения нейронной сети для предложенной модели системы электронного дифференциала, результаты применения которой используются в ООО «ДСТ Урал» для реализации управления тяговыми двигателями для колесного погрузчика с электрическим приводом (подтверждено актом внедрения);

разработано программное обеспечение, которое позволяет частично автоматизировать процесс получения экспериментальных данных с использованием системы «микроконтроллер – ПК» для обучения нейронной сети, а также ПО для реализации цифровых фильтров, исследования влияния параметров и гиперпараметров на конечную точность прогнозирования нейронной сети и её обучения в динамике на полученных ранее экспериментальных данных;

определена минимально необходимая архитектура нейронной сети для системы электронного дифференциала – нейронная сеть глубокого обучения и методика ее обучения на основе физической модели электроавтомобиля;

представленная в диссертации методика обучения нейронной сети для модели системы электронного дифференциала электроавтомобиля позволяет использовать ее для

транспорта различного вида и конфигураций тягового привода без значительных изменений управляющего кода и способа получения данных.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ были получены достаточные выборки эмпирических данных (217 строк данных, всего 2387 значения) при помощи модели электроавтомобиля;

использованы современные компьютерные программы для статистического анализа данных;

установлено, что эффективность управления скоростью тягового привода электроавтомобиля предложенным решением значительно выше по сравнению с существующими линейными и нелинейными вариантами реализации данной системы.

Личный вклад соискателя состоит в: постановке задач, разработанной методике, проведении экспериментов и обобщении результатов исследований. Все научные положения разработаны автором лично. Автор данной работы внес существенный вклад в разработку системы электронного дифференциала на основе искусственных нейронных сетей для электроавтомобилей. Он провел анализ существующих подходов и методов, выявил ключевые проблемы и решение задачи управления электроавтомобилем при поворотах и манёврах. Автор лично разрабатывал алгоритмы, программное обеспечение и проводил эксперименты.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. В чём особенность методологии, которую Вы использовали, в чём её новизна?
2. Поясните, пожалуйста, как именно система понимает, что мы хотим, например, повернуть на 90, 100, 110 градусов? Что будет делать система, если мы отходим от идеальной траектории?
3. Второе научное положение: физическая модель электроавтомобиля для получения экспериментальных данных, какому пункту паспорта научной специальности соответствует?

Соискатель Лисов А.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Особенность методики заключается в том, что ранее была предложена идея, что для управления электроавтомобилем с двумя и более колёсами, предположительно, можно использовать нейронные сети, но не существовало практических рекомендаций и методик, которые бы позволили бы добиться этого.

3. Соответствует первому пункту – физическое моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая системы электропривода.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 8 человек, из них 5 – докторов наук по научной специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы, участвовавших в заседании, из 11 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 8, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Коржов А

Григорьев

Коржов Антон Вениаминович

Григорьев Максим Анатольевич