

На правах рукописи

Handwritten signature in blue ink, consisting of stylized initials and a surname, positioned above a horizontal line.

Лисов Андрей Анатольевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО  
ДИФФЕРЕНЦИАЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОАВТОМОБИЛЯ**

Специальность 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электропривод, мехатроника и электромеханика».

**Научный руководитель –**

**Возмилов Александр Григорьевич**, Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

**Официальные оппоненты:**

**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;

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

**Ведущая организация –**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет» г. Тольятти.

Защита состоится 17 марта 2025 г., в 12:00 часов, на заседании диссертационного совета 24.2.437.14 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 909.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243714/lisov-andrey-anatolevich>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: (351) 272-30-30, E-mail: [grigorevma@susu.ru](mailto:grigorevma@susu.ru)

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.437.14  
д-р техн. наук, профессор



М.А. Григорьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы и степень ее разработанности.** В настоящее время во всём мире наблюдается активный переход от использования транспорта, оснащённого двигателями внутреннего сгорания (ДВС), к электротранспорту. В Российской Федерации данное направление подкреплено нормативно-правовыми актами, такими как распоряжение №2290-р от 23 августа 2021 года, касающееся концепции развития производства и использования электрического автомобильного транспорта до 2030 года, а также распоряжением от 28 декабря 2022 года №4261-р, утверждающим Стратегию развития автомобильной промышленности до 2035 года по производству электроавтомобилей.

Как и в автомобилях с ДВС, в электромобилях тяговый двигатель выполняет ключевую функцию, обеспечивая движение транспортного средства. В настоящее время, ведущие производители электроавтомобилей в качестве электропривода используют 2 и более тяговых электродвигателей. Для управления скоростью вращения электродвигателей используется специализированный алгоритм – система электронного дифференциала.

В настоящее время существуют линейные и нелинейные варианты реализации системы электронного дифференциала (СЭД), предложенные следующими авторами: Lee J.S, Yildirim M., Aggarwal A., Котина Д.А., Мосина М.Е., Бутенко В.Н., которые имеют ряд недостатков. Недостатком линейной системы электронного дифференциала является отсутствие учёта ряда факторов, влияющих на управление электроавтомобилем при поворотах (конструктивных особенностей транспортного средства и текущей скорости движения). Нелинейная система электронного дифференциала показывает более высокую эффективность управления по сравнению с линейной системой, поскольку учитывает не только угол поворота, но и скорость электроавтомобиля, а также его конструктивные особенности, однако при повышенных скоростях движения выше 50 км/ч эффективность управления ухудшается, особенно при движении автомобиля на поворотах и манёврах, т.к. не учитываются продольные и поперечные силы, силы инерции и взаимодействие колёс с дорогой, влияние внешних погодных условий (влажность, температура, обледенение и наличие осадков), а также стиля вождения.

Высокая степень сложности и количество взаимодействующих факторов затрудняют практическую реализацию модели управления автомобилем традиционными методами, которая бы учитывала все перечисленные факторы. Поэтому более рациональным подходом решением данной задачи является использование метода «от практики» на основе искусственных нейронных сетей. В связи с этим, разработка системы электронного дифференциала на основе нейронной сети является актуальной.

**Целью** диссертационной работы является разработка системы электронного дифференциала для управления электроавтомобилем при поворотах и манёврах на основе искусственных нейронных сетей.

**Задачи исследования:**

1. На основе анализа научно-технической литературы определить рациональную компоновку тягового электропривода электроавтомобиля.

2. Провести анализ эффективности существующих систем электронного дифференциала для управления тяговым электроприводом электроавтомобиля при поворотах и манёврах.

3. Обосновать выбор нейронной сети для управления системой электронного дифференциала электроавтомобиля.

4. Разработать физическую модель электрического автомобиля для получения экспериментальных данных, необходимых для обучения нейронной сети.

5. Разработать методику получения экспериментальных данных на основе разработанной физической модели электроавтомобиля для обучения нейронной сети.

6. Выбрать архитектуру и обучить нейронную сеть для разработанной системы электронного дифференциала на основе полученных экспериментальных данных.

**Объектом исследования** являются процессы протекающие в системе управления тяговым электроприводом электроавтомобиля на основе системы электронного дифференциала при поворотах и манёврах.

**Предметом исследования** является система электронного дифференциала, основанная на искусственных нейронных сетях, для управления скоростью тяговых электродвигателей электроавтомобиля.

**Научная новизна и практическая значимость** состоит в том, что:

1. Разработан способ управления электроприводом электроавтомобиля при поворотах и манёврах, основанный на системе электронного дифференциала и нейронных сетях, позволяющий повысить эффективность управления транспортом.

2. Разработана методика получения экспериментальных данных для обучения искусственной нейронной сети, для управления электроприводом электроавтомобиля при поворотах и манёврах.

3. Использование системы электронного дифференциала на основе нейронных сетей для электроавтомобилей и беспилотных наземных транспортных средств позволяет повысить безопасность транспорта на дорогах.

4. Разработанную систему электронного дифференциала (СЭД) для электропривода электроавтомобиля возможно адаптировать к различным дорожным условиям и стилю вождения в реальном времени, обеспечивая эффективное управление скоростью автомобиля.

**Методология и методы исследования.**

В диссертационной работе использовались аналитические методы и сведения из теории электрических машин, преобразовательной техники и

теории автоматического управления, методы экспериментального исследования. Были применены алгоритмы машинного обучения, правила разработки принципиальных схем и печатных плат, использованы сведения из цифровой техники (программирование микроконтроллеров, цифровая фильтрация и передача данных).

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Результаты анализа эффективности существующих систем управления тяговым электроприводом электроавтомобиля при поворотах и манёврах.

2. Физическая модель электроавтомобиля для получения экспериментальных данных необходимых для обучения нейронной сети.

3. Методика получения экспериментальных данных, необходимых для обучения искусственной нейронной сети на основе идеальных кривых поворота и разработанной физической модели электроавтомобиля.

4. Способ управления электроприводом электроавтомобиля при поворотах и манёврах, основанный на системе электронного дифференциала и нейронных сетях, для варианта компоновки с двумя электродвигателями сзади.

5. Результаты сравнения эффективности существующих способов управления скоростью электропривода электроавтомобиля с разработанной системой электронного дифференциала на основе нейронной сети.

#### **Степень достоверности результатов работы**

Степень достоверности разработанной системы электронного дифференциала на основе искусственных нейронных сетей для электроавтомобилей подтверждается результатами проведенных исследований и экспериментов. Использование методов анализа данных, включая статистические и алгоритмические подходы, обеспечивает надежность и точность полученных результатов. Проведенные эксперименты и тесты подтверждают функциональность и применимость системы в реальных условиях. Таким образом, на основании проведенных исследований и экспериментов можно утверждать, что разработанная система электронного дифференциала на основе нейронных сетей готова к практическому применению в современных электроавтомобилях.

#### **Реализация и внедрение результатов:**

1. В 2022 г. Получен грант от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонда содействия инновациям), «УМНИК» (рег. № 18080ГУ/2022) по тематике: «Разработка систем компьютерного зрения для распознавания дефектов на поверхности горячего листопроката».

2. Разработана и изготовлена экспериментальная модель электрического автомобиля с двумя независимыми двигателями сзади, с помощью которой получены результаты экспериментальной проверки предложенных идей, подтверждающие теоретические положения.

3. Результаты диссертационной работы используются и внедрены в производственной деятельности ООО «ДСТ-Урал».

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 10 научных работ, из которых 6 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, Scopus – 2, а также 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 143 наименований и 6 приложений. Основная часть изложена на 102 страницах, содержит 57 рисунков и 9 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** рассмотрены: актуальность темы, цель, задачи и методы исследования, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования.

**В первой главе** представлен анализ научно-технической литературы по развитию современных тенденциях в автомобильной отрасли. Обзор показал, основные тенденции в автомобильной индустрии направлены на ускоренное развитие технологий и производство электротранспорта.

Проведён анализ компоновок тяговых электродвигателей в электроавтомобиле, который показал, что в настоящее время наиболее рациональной компоновкой являются схемы с использованием 2 и 4 независимых двигателей.

Применение нескольких независимых тяговых электродвигателей в электроавтомобилях требует использования специального устройства – системы электронного дифференциала.

### **Линейная система управления электроприводом электроавтомобиля при повороте.**

В основе функционирования линейной системы, схема которой показана на рисунке 1, лежит измерение угла поворота руля с помощью переменного резистора, который выполняет роль датчика поворота. С данного резистора формируется задающее значение сигнала рассогласования между электродвигателями, который поступает на блок управления. Блок управления состоит из операционных усилителей, обеспечивающих обработку и усиление сигнала рассогласования, необходимого для передачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы. На выходе блока управления формируются два независимых сигнала скорости, которые поступают на два силовых преобразователя, каждый из которых регулирует скорость вращения соответствующего электродвигателя, что позволяет создать разницу в скоростях вращения колес ( $M_1$ ,  $M_2$ ), необходимую для выполнения манёвров.

На основе анализа данной схемы (рисунок 1) можно заключить, что линейная схема системы электронного дифференциала отличается относительной простотой конструкции. Недостатком данной схемы является отсутствие учёта ряда факторов при поворотах электроавтомобиля

(конструктивных особенностей транспортного средства, текущей скорости движения).

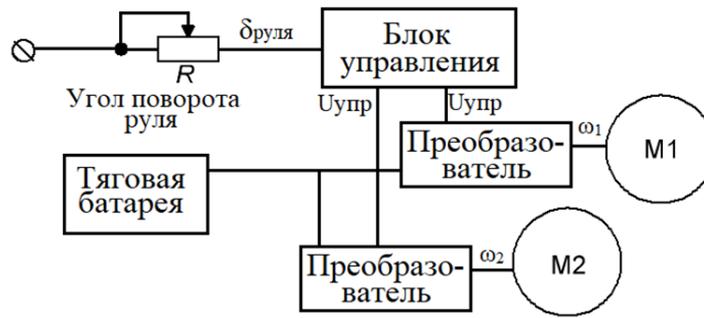


Рисунок 1 – Линейная схема системы электронного дифференциала

### Нелинейная система управления электроприводом

Структурная схема работы нелинейной системы электронного дифференциала представлена на рисунке 2. Принцип работы системы в целом аналогичен работе линейной системы, описанной ранее. Однако, в данном случае ещё учитывается измерение скорости автомобиля и ряд конструктивных постоянных транспортного средства ( $L, K, dr, r, lr$ ). В качестве управляющего элемента используется микроконтроллер, заменяющий блок управления. Это обусловлено тем, что расчёт величины скорости выполняется с использованием математического аппарата, согласно формулам (1–5). После вычисления, соответствующие значения скорости вращения привода, данные значения передаются на силовые преобразователи, а затем на тяговые электродвигатели ( $M1, M2$ ), что обеспечивает более точное управление движением автомобиля по сравнению с линейной системой.

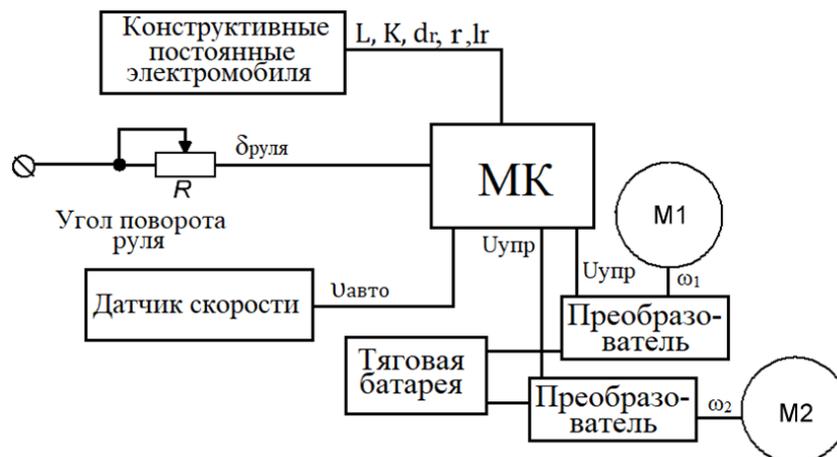


Рисунок 2 – Структурная схема нелинейной системы электронного дифференциала

Внутренний угол поворота переднего колеса определяется по формуле (1).

$$\delta_1 = \arctan \left[ \frac{L \cdot \tan(\delta)}{L - \left(\frac{K}{2} \cdot \tan(\delta)\right)} \right], \quad (1)$$

где  $L$  – длина колесной базы автомобиля;

$K$  – расстояние между левым и правым шкворнем;

$\delta$  – угол поворота руля.

Внешний угол поворота переднего колеса определяется по формуле (2).

$$\delta_2 = \arctan \left[ \frac{L \cdot \tan(\delta)}{L + \left(\frac{K}{2} \cdot \tan(\delta)\right)} \right] \quad (2)$$

Для оценки скорости радиусы поворота передних внутренних и внешних колес, задних внутренних и внешних колес могут быть соответственно выражены как:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = \frac{L}{\sin(\delta_1)}; \\ R_2 = \frac{L}{\sin(\delta_2)}; \\ R_3 = \frac{L}{\tan(\delta)} - \frac{d_r}{2}; \\ R_4 = \frac{L}{\tan(\delta)} + \frac{d_r}{2}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $d_r$  – расстояние между задними колесами.

Радиус центра тяжести электромобиля.

$$R_{cg} = \sqrt{R_3 + \left(\frac{d_r}{2}\right)^2 + l_r^2}, \quad (4)$$

где  $l_r$  – расстояние между задним колесом и центром тяжести.

Тогда, угловые скорости передних внутренних и внешних колес и задних внутренних и внешних колес могут быть соответственно выражены следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_1 = \frac{v \cdot R_1}{R_{cg} \cdot r}; \\ \omega_2 = \frac{v \cdot R_2}{R_{cg} \cdot r}; \\ \omega_3 = \frac{v \cdot R_3}{R_{cg} \cdot r}; \\ \omega_4 = \frac{v \cdot R_4}{R_{cg} \cdot r}, \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $r$  – радиус колеса;

$v$  – скорость электромобиля.

Анализ выражений (1–5) показывает, что данная модель электронного дифференциала не учитывает следующие параметры: динамические характеристики автомобиля, влияние внешних погодных условий, состояние шин, стиль вождения и др.

**Во второй главе** представлены математические модели линейной и нелинейной систем управления электроприводом, реализованные в среде Matlab/Simulink.

### Линейная СЭД

Математическая модель линейной СЭД в среде MatLab/Simulink приведена на рисунке 2, результат вычисления управляющего ШИМ-сигнала при соотношении плеч переменного резистора  $1,5R / 1R$ , приведён на рисунке 3.

На основе полученных результатов в первой главе и моделирования в среде MatLab/Simulink можно сделать следующие выводы:

*Преимущества системы:*

1. Простота реализации.

*Недостатки системы:*

1. Снижение качества управления электроприводом на малых и высоких скоростях, а также небольших углах поворота автомобиля.

2. Не учитываются конструктивные особенности автомобиля, включая распределение массы и геометрию колесной базы.

3. Не учитываются динамические факторы при движении электромобиля (силы инерции, аэродинамическое сопротивление и т.д.).

4. Отсутствие учёта внешних условий эксплуатации, влияющих на качество управления (погодные и дорожные факторы).

5. Отсутствие возможности адаптации под различные стили вождения и динамические режимы эксплуатации (спортивный или экономичный).

6. Не учитывается техническое состояние автомобиля (износ шин, весовые характеристики, люфты механизмов).

7. Отсутствие возможности интеграции с системами безопасности и помощи водителю (ABS, ESP и круиз-контроль).

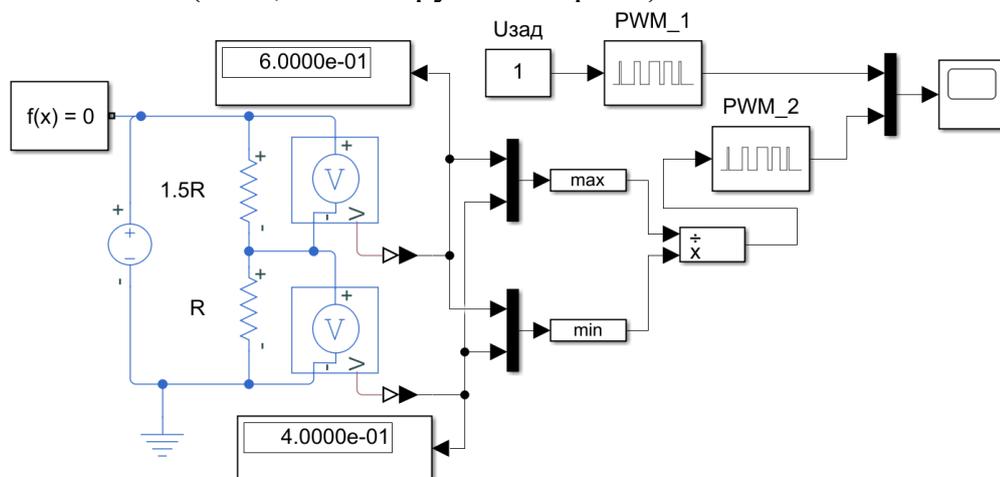


Рисунок 2 – Математическая модель линейной СЭД

### Нелинейная СЭД

Математическая модель нелинейной СЭД в среде MatLab/Simulink и результат расчёта скорости вращения 2-х задних колёс при угле поворота  $10^0$  приведен на рисунке 4, где  $\omega_{авт}$  – это значение скорости вращения колёс при движении прямо, взятое в качестве сравнительного образца;  $\omega_3, \omega_4$  – скорость вращения заднего левого и правого колёс соответственно;  $V_{авт}$  – значение линейной скорости движения автомобиля;  $L, d_r, l_r, r$  – конструктивные постоянные автомобиля.

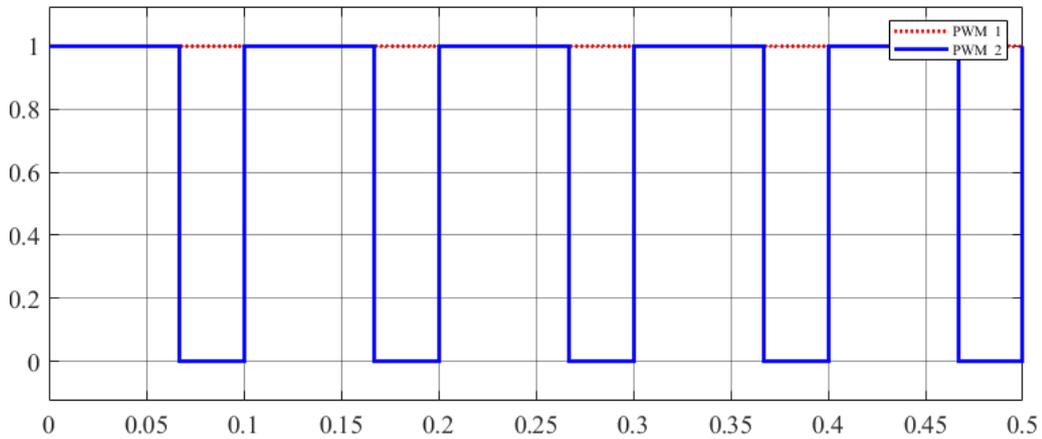


Рисунок 3 – Управляющий ШИМ-сигнал при соотношении плеч переменного резистора  $1,5R / 1R$

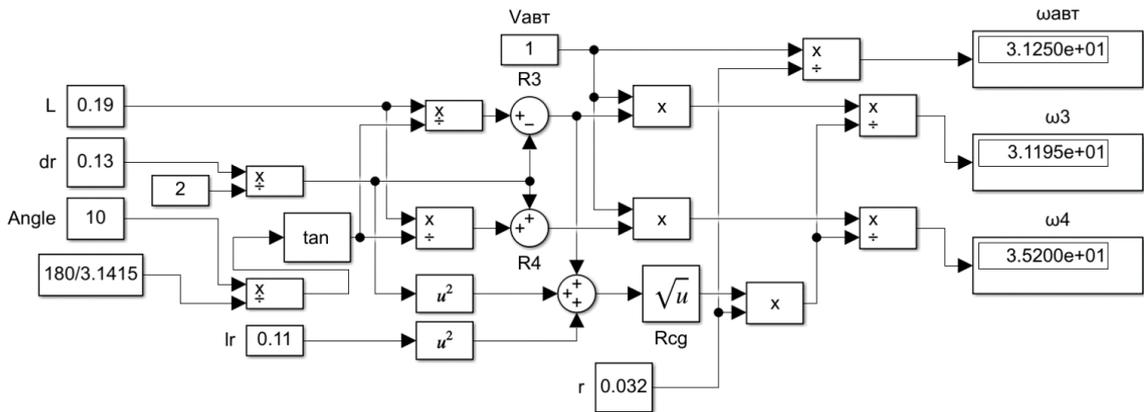


Рисунок 4 – Математическая модель нелинейной СЭД при угле поворота  $10^0$

На основе полученных результатов в первой главе и моделирования в среде MatLab/Simulink можно выделить следующие выводы:

*Преимущества системы:*

1. Относительная простота реализации.
2. Частичный учёт конструктивных особенностей автомобиля.
3. Возможность применения системы в полноприводных транспортных средствах.

*Недостатки системы:*

1. При скорости выше 50 км/ч наблюдается снижение качества управления, что ограничивает применение системы на высоких скоростях.
2. Отсутствие учёта внешних условий эксплуатации, влияющих на качество управления (погодные и дорожные факторы).

3. Отсутствие возможности адаптации под различные стили вождения и динамические режимы эксплуатации (спортивный или экономичный).

4. Не учитывается техническое состояние автомобиля (износ шин, весовые характеристики, люфты механизмов).

5. Отсутствие возможности интеграции с системами безопасности и помощи водителю (ABS, ESP и круиз-контроль).

**Рассмотрено влияние дополнительных сил и факторов** на характер движения транспорта при поворотах и манёврах на повышенных скоростях.

В частности, для более полного описания поведения автомобиля при поворотах и манёврах требуется учесть продольные и поперечные силы, силы инерции и взаимодействие колёс с дорогой.

На поведение автомобиля при прохождении поворотов также оказывают влияние внешние условия, включая погодные факторы, такие как влажность, температура, обледенение и наличие осадков. Изменения в погодных условиях могут существенно снизить коэффициент сцепления шин с дорогой, увеличивая риск заноса и ухудшая управляемость.

Высокая степень сложности и количество взаимодействующих факторов затрудняют практическую реализацию модели, которая бы учитывала все ранее перечисленные факторы. В связи с этим более рациональным подходом является использование метода «от практики» на основе искусственных нейронных сетей. В этом случае применение нейронных сетей, обученных на экспериментальных данных, полученных на основе реальных испытаний, способны эффективно управлять скоростью электропривода электроавтомобиля, обеспечивая его устойчивость и управляемость при выполнении поворотов и манёвров с учётом соответствующих факторов.

Разработана структурная схема системы электронного дифференциала для 2-х независимых двигателей сзади, показанная на рисунке 5. Работа СЭД заключается в следующем: НС получает значение скорости вращения задних левого и правого колёс ( $V1$ ,  $V2$ ), а также общей скорости движения электроавтомобиля ( $V^*$ ) с установленных датчиков скорости и угла поворота руля ( $\delta$ ). Система также может получать иные внутренние параметры: ускорение автомобиля, данные с гироскопа, сигналы от тормозной системы, температуру тяговых двигателей и прочее, а также внешние параметры: температуру окружающей среды, влажность воздуха, расстояние до ближайшего препятствия и т.д.

*Общие СЭД на основе НС с линейной и нелинейной системами:*

- $V^*$  – общая скорость движения электроавтомобиля
- $\delta$  – угол поворота руля.
- Расчёт параметров  $V1$ ,  $V2$  – скорости вращения левого и правого задних колёс, соответственно.

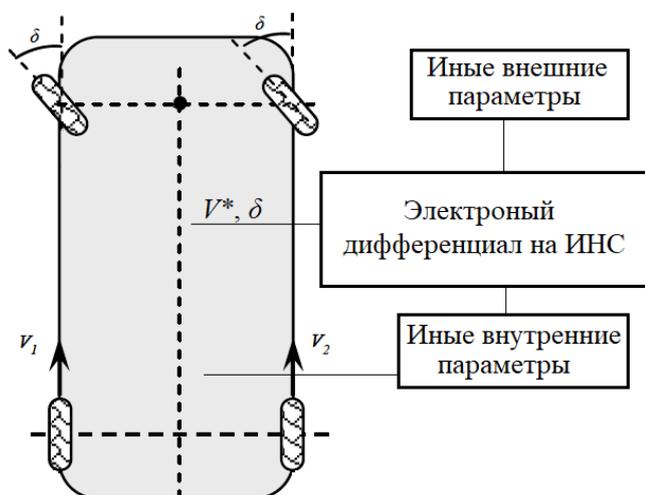


Рисунок 5 – Структурная схема СЭД на основе нейронной сети  
*Отличия СЭД на основе НС от линейной и нелинейной систем:*

1. В учёте внутренних параметров электроавтомобиля.
2. В учёте внешних параметров электроавтомобиля.
3. Возможности интеграции системы в различные конфигурации компоновки тяговых электродвигателей, в технологии беспилотного наземного транспортного средства и вспомогательные системы управления автомобилем.

**Глава 3 посвящена процессу разработки, проектирования и изготовления физической модели электроавтомобиля для получения экспериментальных данных, необходимых для обучения НС, включающая: разработку функциональной и принципиальной схемы тягового электропривода электроавтомобиля, выбор компонентной базы для разработки печатной платы, а также разработку управляющего ПО для модели.**

На рисунке 6 представлена функциональная схема управления моделью электроавтомобиля с использованием системы электронного дифференциала на основе нейронной сети. Работа данной системы заключается в следующем. Микроконтроллер считывает показания с различных датчиков: скорости двигателей, угла поворота рулевых тяг, гироскопа, акселерометра и датчика температуры. Данные с датчиков отправляются на персональный компьютер (ПК), где нейронная сеть обрабатывает информацию и формирует предсказание (задание) скорости вращения колёс. Значение данного задания возвращается на микроконтроллер, который управляет скоростью вращения тяговых двигателей ( $M1$  и  $M2$ ) посредством силовых преобразователей, что обеспечивает эффективную работу системы управления движением электроавтомобиля при совершении поворотов и манёвров.

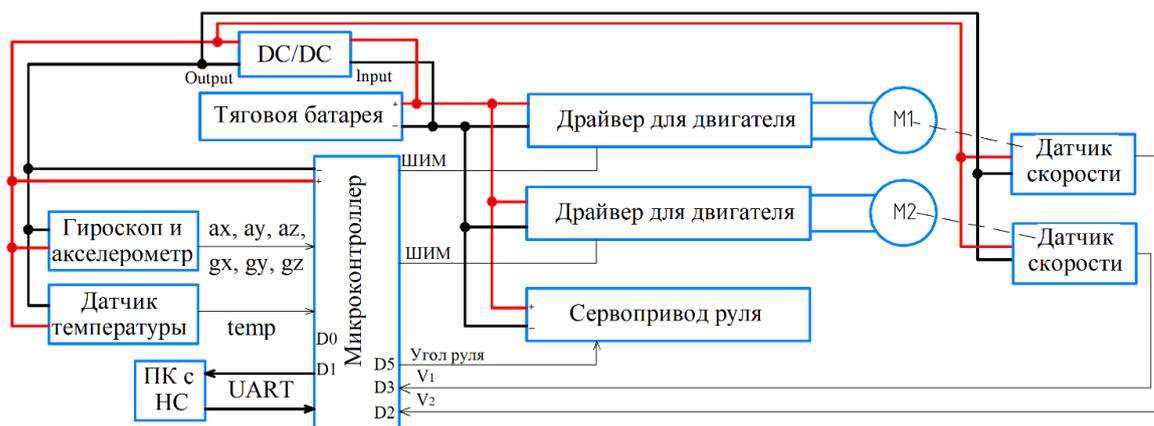


Рисунок 6 – Функциональная схема физической модели электромобиля

Разработана методико-программная часть, содержащая в себе: разработку методики способа получения экспериментальных данных, анализ рекомендаций для создания набора обучающих данных, выбор типа наиболее подходящей нейронной сети для реализации СЭД и разработку программного обеспечения для обучения НС.

**Разработана методика обучения нейронной сети на основе карт идеальных поворотов**, учитывающая величину отклонения от идеальной траектории и показания установленных на модели электромобиля датчиков в момент движения. Предложенный метод легко масштабируется, поддается автоматизации и не требует коррекций при изменении количества измеряемых параметров. Важно отметить, что идеальная траектория задается разработчиком и может основываться как на реальных переходных кривых, применяемых при проектировании дорог общего пользования, так и на специфических траекториях, характерных для гоночного или специализированного транспорта.

Способ вычисления отклонения при повороте модели от идеальной траектории для обучения нейронной сети электронного дифференциала показан на рисунке 7. Принцип состоит в том, чтобы заранее расчертить на карте поворотов идеальные траектории (красная линия на рисунке 7), к которым нужно стремиться при управлении тяговыми электродвигателями при помощи НС. При проведении экспериментов на тяговые электродвигатели подаются различные вариации скорости вращения, чтобы получить иную траекторию движения (синяя линия на рисунке 7), данные с датчиков и самое главное величину отклонения от идеальной траектории в градусах. Именно эти данные после и структуризации будут использованы для обучения НС.

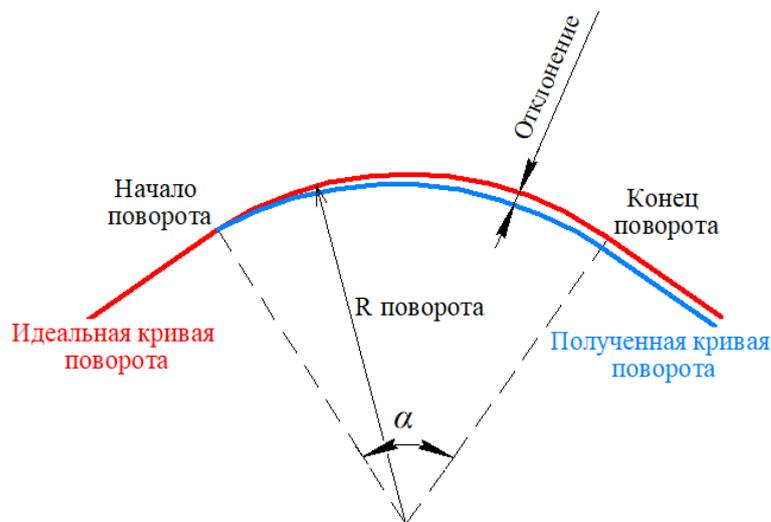


Рисунок 7 – Принцип вычисления отклонения модели от идеальной траектории поворота для обучения НС

В рамках данной работы использовался фреймворк «TensorFlow» и его API «Keras», архитектура разработанной сети представлена на рисунке 8. На рисунке 8 входной слой (input layer) состоит из ряда независимых переменных:  $X_0$  – угол поворота сервопривода (тяг руля, град),  $X_1$  – скорость движения модели электромобиля,  $X_2, X_3, X_4$  – угловое ускорение по оси «x», «y» и «z» соответственно,  $X_5, X_6, X_7$  – ускорение свободного падения по оси «x», «y» и «z» соответственно,  $X_8$  – температура окружающей среды,  $X_9$  – отклонение от идеальной траектории. Далее идут несколько промежуточных полносвязанных слоёв нейронной сети глубокого обучения с указанным количеством узлов, слой dropout (предназначен для уменьшения переобучения сети), а после, на выходе (output layer) находятся 2 зависимые переменные:  $Y_0$  – скорость вращения первого электродвигателя и  $Y_1$  – скорость вращения второго электродвигателя.

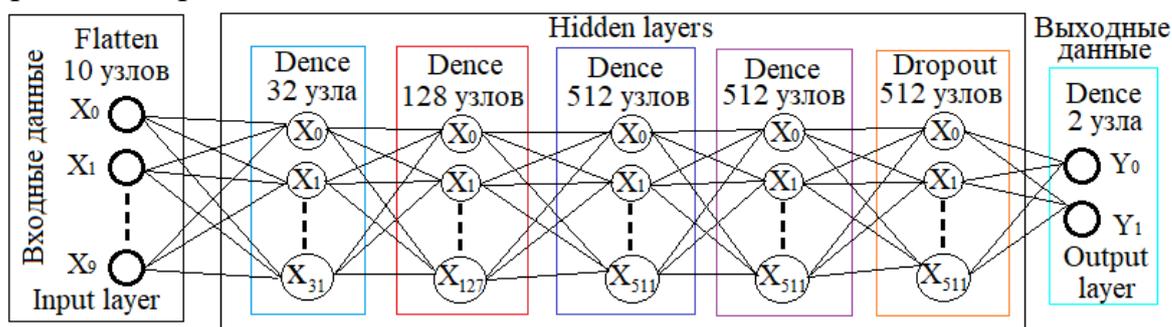


Рисунок 8 – Архитектура разработанной нейронной сети глубокого обучения

Упрощённо математическое описание разработанной архитектуры можно представить в виде.

$$f(X_0, X_1 \dots X_9) = \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

**В главе 4 представлены результаты получения экспериментальных данных при помощи физической модели электромобиля. Как упоминалось**

ранее, методика получения данных для нейронной сети подразумевает наличие специальной карты идеальных кривых поворота. Данная карта была выполнена на листах масштабной-координатной миллиметровой бумаги для упрощения расчётов отклонений. Модель электромобиля (рисунок 9) перемещается по этому полю, рисуя пройденную траекторию с помощью ручки со стираемыми чернилами.

Полученные экспериментальные данные частично отображены в таблице 1, которая состоит из 217 отфильтрованных значений, которые являются основой для датасета. Важно отметить, что для лучшей работы все данные были смасштабированы в диапазон  $[-1;1]$  для более корректного вычисления градиентов ошибки отклонения от истинного значения функции.

В таблице 1, «V1» – скорость вращения первого электродвигателя (заднего левого от 0 до 255); «V2» – скорость вращения второго электродвигателя (заднего правого от 0 до 255); *AngleServo* – угол поворота сервопривода (тяг руля, град); «V» – скорость движения модели электромобиля (от 0 до 255, что соответствует от 0 до 100%); «ax, ay, az» – угловое ускорение по оси «x», «y» и «z» соответственно (от -32678 до 32678, что соответствует диапазону от -250 град/с до 250 град/с); «gx, gy, gz» – ускорение свободного падения (от -32678 до 32678, что соответствует диапазону от -2g до 2g) и температуру «temp».

**Исследовано влияние параметров и гиперпараметров на точность прогнозирования нейронной сети, разработанной для системы электронного дифференциала.**

При настройке архитектуры НС были выбраны следующие параметры: размер пакета (batch size) = 16; метод градиентного спуска для оптимизации нейросети – «AdaMax», количество эпох = 65 и функция потерь – «MSE» (Mean Squared Error) как наиболее оптимальная комбинация, исходя из результатов проведённых экспериментов.

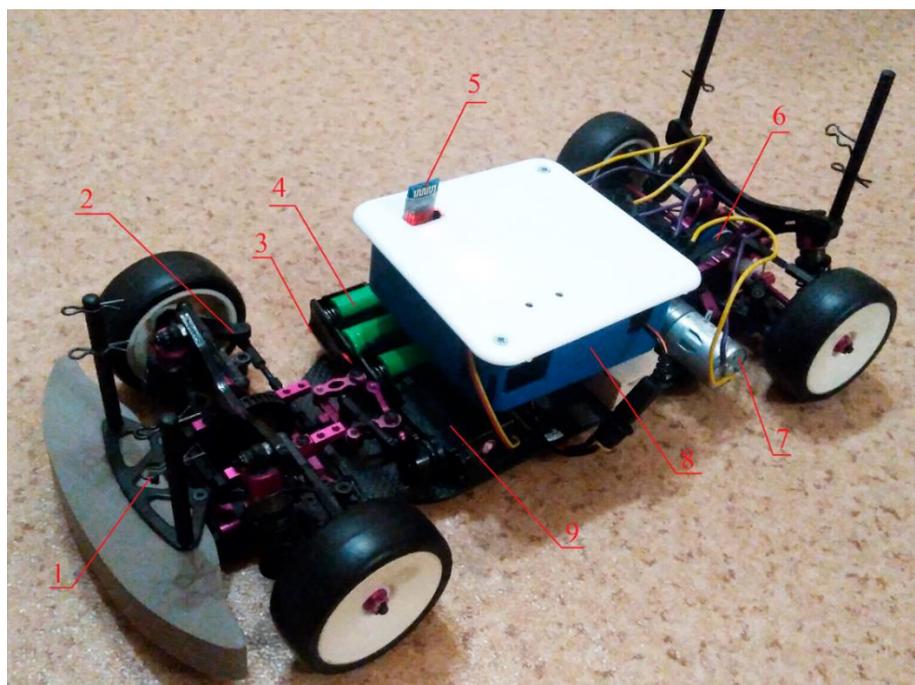


Рисунок 9 – Общий вид модели электромобиля, где: 1 – Отверстие для ручки; 2 – Передние тяги поворота колёс; 3 – BMS тяговой батареи; 4 – Тяговая батарея; 5 – Bluetooth-модуль для связи с ПК; 6 – Механизм передачи тягового момента; 7 – Тяговые двигатели; 8 – Корпус системы управления с макетной платой внутри; 9 – Сервопривод для поворота рулевых тяг.

Таблица 1 – Экспериментальные данные, полученные с датчиков модели электромобиля.

$V1$	$V2$	$AngleS_{ervo}$	$V$	$ax$	$ay$	$az$	$gx$	$gy$	$gz$	$temp$	Отклонение, град
197	197	92	197	4064	-1688	14333	-515	-515	-515	-1746	0
195	195	92	195	1305	-258	-258	-258	-258	-1	-1744	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
209	200	108	205	-900	18048	-2640	63	-1	-1	-1529	-0,3

**Проведено тестирование разработанной системы электронного дифференциала** как при помощи вычислительных тестов, так и на практике.

Среднее время на вычисление текущего задания скорости тягового электропривода составило  $0,0213 \pm 5\%$  секунд при задании отдельными массивами (пакетами) с каждым новым вызовом функции предсказания. С единоразовым вывозом функции предсказания для тестовой выборки из 22 пакетов время составило  $0,0372 \pm 5\%$  секунды.

Результат работы нейронной сети для системы электронного дифференциала с проверкой точности прогнозирования на тестовой выборке (не участвовала в процессе обучения модели НС) для скорости  $V1$  и  $V2$ , приведены на рисунках 10, 11. Более наглядно точность предсказания модели нейронной сети, на нескольких примерах, тестовой выборки можно увидеть в таблице 2.

Как видно из рисунков 10, 11 НС стремится к своим образцовым значениям и иногда достигает их (1-й пакет для  $V1$ , 9-й пакет для  $V1$ , 14-й пакет для  $V2$ , 19-й пакет для  $V2$ ). При этом НС часто отражает отношения скоростей между собой (разница в абсолютном выражении между  $V1$  и  $V2$ ). Полученные результаты позволяют утверждать, что разработанная система электронного дифференциала работоспособна и её можно рекомендовать к практической реализации в качестве отдельного дополнительного устройства или в составе электротехнического комплекса электроавтомобиля.

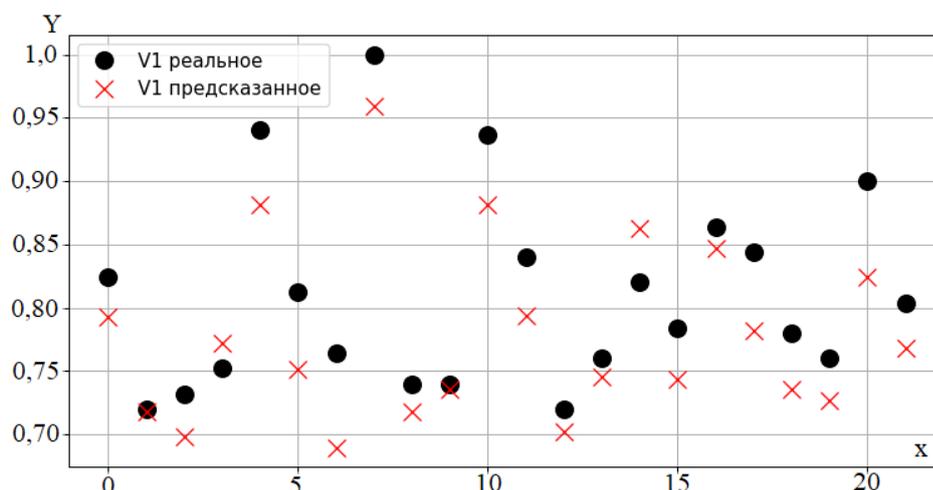


Рисунок 10 – Графики прогноза V1 модели нейронной сети на тестовой выборке

Кроме проверки системы электронного дифференциала на основе нейронной сети с использованием вычислительных методов, был проведён дополнительный сравнительный натурный эксперимент, направленный на оценку эффективности управления моделью электромобиля с существующими линейными и нелинейными системами.

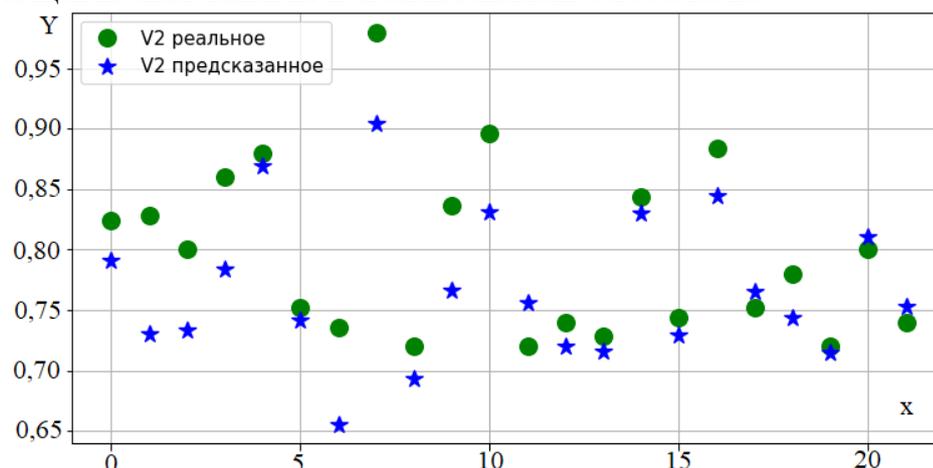


Рисунок 11 – Графики прогноза V2 модели нейронной сети на тестовой выборке

Результаты сравнительного анализа систем электронного дифференциала при поворотах сервопривода на углы  $100^{\circ}$  и  $120^{\circ}$  при варьировании скорости от минимальной (30%), средней (50%) и максимальной (100%) представлены на рисунке 12. Значения отклонений для тестируемых систем при соответствующих скоростях вращения колёс представлены на рисунках 13 и 14. Результаты эксперимента показали следующее:

1. Система электронного дифференциала на основе нейронной сети демонстрирует лучшую адаптивность к изменяющимся условиям и конструктивным особенностям модели электромобиля.

2. В случае, если данные с датчиков близки или совпадают с информацией, использованной при обучении модели, электромобиль следует по идеальной траектории, в противном случае наблюдается незначительное «рысканье» в районе идеальной траектории.

3. Увеличение скорости и угла поворота ведёт к большему отклонению от идеальной траектории для линейных и нелинейных систем управления.

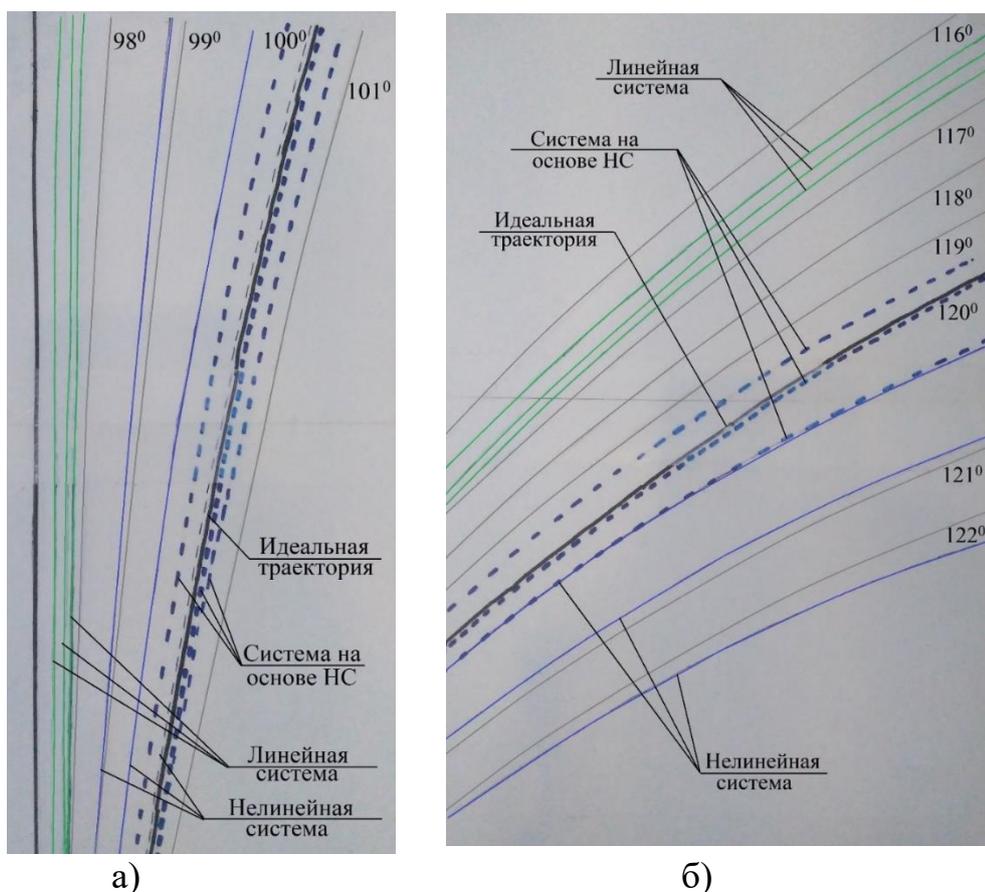


Рисунок 12 – Результаты сравнительного эксперимента систем электронного дифференциала при повороте а)  $100^{\circ}$ , б)  $120^{\circ}$

### Основные результаты и выводы

1. На основе анализа научно-технической литературы определена рациональная компоновка тягового электропривода электроавтомобиля – два независимых двигателя сзади и полноприводная система с 4-мя двигателями, т.к. данные компоновки являются наиболее рациональными с точки зрения эффективности управления и относительной дешевизны.

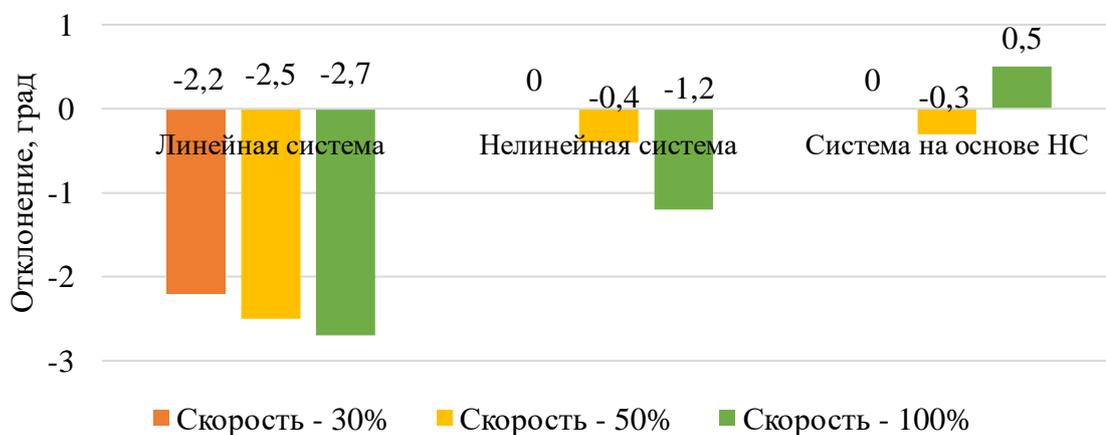


Рисунок 13 – Отклонения от идеальной траектории при повороте на  $100^{\circ}$

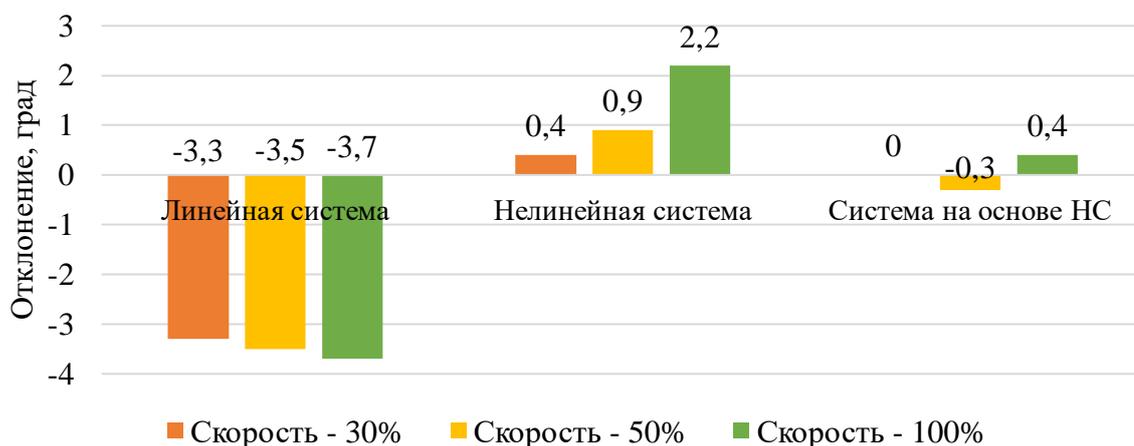


Рисунок 14 – Отклонения от идеальной траектории при повороте на  $120^{\circ}$

2. Анализ эффективности существующих систем электронного дифференциала для управления тяговым электроприводом электроавтомобиля при движении на поворотах и манёврах показал, что линейная система электронного дифференциала из-за отсутствия учёта в данной системе конструктивных особенностей транспортного средства, скорости движения и других факторов является неэффективной. Нелинейная система, в отличие от линейной, учитывает эти факторы, но при движении электроавтомобиля на скоростях более 50 км/ч эффективность управления снижается.

3. Обоснован выбор нейронной сети для системы электронного дифференциала для управления электроприводом электроавтомобиля.

4. Разработана физическая модель электрического автомобиля, позволяющая получать экспериментальные данные, необходимые для последующего обучения нейронной сети.

5. Разработана методика получения экспериментальных данных необходимых для обучения нейронной сети, учитывающей отклонение от идеальной кривой поворота. Предложенный метод легко масштабируется, поддается автоматизации и не требует дополнительных действий при изменении количества измеряемых параметров.

6. Выбрана нейронная сеть глубокого обучения для системы электронного дифференциала для управления электроавтомобилем. В результате обучения НС СЭД были получены: точность прогнозирования задающего значения скорости вращения тяговых электродвигателей равная 86,36% и скорость расчёта прогнозов  $23 \pm 5\%$  мс.

7. Сравнение линейной и нелинейной СЭД с СЭД на основе НС показало отклонение от идеальной траектории поворота на 0,4 градуса, что значительно лучше по сравнению с линейной (3,7 градуса) и нелинейной (2,2 градуса).

8. Использование системы электронного дифференциала на основе нейронных сетей для электроавтомобилей и беспилотных наземных транспортных средств позволяет повысить безопасность транспорта на дорогах.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

## ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **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.

2. **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.

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.

### Публикации в других изданиях

1. **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.

2. **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.

### Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611351 Российская Федерация. Нейронная сеть для обучения электронной дифференциальной системы на экспериментальных данных: № 2024611351: заявл. 25.12.2023; опубл. 19.01.2024 / **А. А. Лисов.**

Лисов Андрей Анатольевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО  
ДИФФЕРЕНЦИАЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОАВТОМОБИЛЯ**

Специальность 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский Центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать \_\_\_\_ .01.2025. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая

Усл. печ. л.0,93. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_ .

---

Отпечатано в типографии Издательского Центра ЮУрГУ  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.