

На правах рукописи



Попов Никита Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ
ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА БЕЗРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТНОГО
СРЕДСТВА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск 2022 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Аносов Владимир Николаевич**,
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Букреев Виктор Григорьевич**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск), отделение электроэнергетики и электротехники, профессор;

Татевосян Андрей Александрович,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» (г. Омск), кафедра "Электрическая техника", доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Защита диссертации состоится «16» сентября 2022 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073 г. Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического и на сайте организации www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» июля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, канд. техн. наук, доцент



Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Вследствие усиления экологических требований к используемым транспортным средствам, повышения стоимости энергоресурсов, а также развития новых источников энергии, приобретает актуальность вопрос о первоочередных направлениях развития подвижного состава безрельсового электротранспорта.

К настоящему времени изготовлен ряд конструкций транспортных средств, использующих новые источники энергии в различных сочетаниях с тепловыми двигателями и контактной сетью. Перспективные транспортные энергетические установки должны иметь ресурс работы, близкий к сроку службы кузова транспортного средства, малый вес и стоимость, а также гибкость схем энергоустановок, позволяющую как применять их на подвижном составе различной вместимости, так и модернизировать энергоустановки по мере совершенствования источников энергии.

Основной проблемой электрических транспортных средств на сегодняшний день является малый запас автономного хода по сравнению с традиционными транспортными средствами на базе двигателей внутреннего сгорания. Проблема реализации автономного хода в настоящий момент так же актуальна для городского общественного электрического транспорта, такого как троллейбусы, трамваи и электробусы.

Ретроспективный анализ отражает рост интереса научных кругов к подобным вопросам, так как количество публикаций и научных трудов на тему повышения энергоэффективности электрического транспорта с каждым годом растет.

Существуют различные подходы к решению этой проблемы. Это и внедрение различного рода накопителей энергии, реализация гибридных энергоустановок, сочетающих в себе несколько различных источников энергии, а также реализация современных систем управления электрическим тяговым приводом постоянного и переменного тока.

Вопрос повышения энергоэффективности – это объемная задача, поскольку современные электрические транспортные средства представляют собой сложные технические системы. При рассмотрении вопросов повышения энергоэффективности нельзя рассматривать отдельную подсистему и ее внутренние процессы. Необходимо учитывать влияние подсистем друг на друга и функционирование всей системы в целом.

Большинство специалистов приходит к выводу о том, что именно небольшой запас хода транспортного средства и является главной проблемой безрельсового электротранспорта. Эта проблема решается внедрением современных типов накопителей энергии, реализацией гибридных систем, либо реализацией современных систем управления.

Степень разработанности темы исследования. Повышение энергоэффективности, экономия энергии и оптимальные алгоритмы управления – это вопросы, вызывающие интерес у большого количества ученых. В. Е. Розенфельд и М. П. Кутыловский внесли свой неоценимый вклад в разработку

теории тягового расчета. И. С. Ефремов совместно с Г. В. Косаревым занимались исследованием транспортных средств с комбинированной энергоустановкой, рассматривали оптимальные режимы движения таких систем. Средства и методы повышения энергоэффективности систем управления тяговым приводом – это тематики работ К. Г. Марквардта, В. П. Феоктистова, В. В. Шевченко, А. Ruffer и других. Помимо этого, большой объем работ был выполнен по теме автономного и гибридного транспорта. Большое количество трудов, касающихся систем с применением накопительных элементов, их внедрения в общую силовую установку, было опубликовано такими специалистами, как К. Л. Богданов, И. Н. Варакин, М. Zolot, К. J. Kelly, Т. Markel, А. Burke и другие. Последние 15 лет большую актуальность приобрели вопросы, касающиеся систем управления гибридной силовой установкой и их применение на безрельсовом электрическом транспорте. Стоит выделить труды К. Gokse, P. Bubna, S. Kermani, ZilinMa, М. А. Слепцова. В Новосибирском государственном техническом университете Н. И. Щуровым и В. И. Соповым выполнен ряд работ, касающихся вопросов энергосбережения на городском электрическом транспорте, в частности это трамваи и троллейбусы. Разработка энергоэффективного тягового привода безрельсового транспорта рассматривается в работах М.В. Ярославцева, А. А. Штанга и Е. А. Спиридонова В работах В. Н. Аносова и В. М. Кавешникова исследован тяговый электропривод переменного тока для автономных транспортных средств с комбинированной энергоустановкой.

Дальнейшее совершенствование систем тягового электропривода возможно за счет разработки и исследования новых алгоритмов управления. Разработка новых алгоритмов управления, исследование особенностей их использования в системе тягового электропривода является актуальной задачей, стоящей перед специалистами. Решение этой задачи приведет, в конечном итоге, к разработке и созданию энергоэффективного транспортного средства.

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности системы тягового электропривода безрельсового транспортного средства за счет рационального выбора компоновки тяговой системы и использования современных алгоритмов управления.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. Разработка рекомендаций по выбору варианта компоновки тяговой системы безрельсового транспортного средства для повышения её энергоэффективности.
2. Разработка системы электронного дифференциала для варианта компоновки с четырьмя мотор-колесами на базе бесколлекторных двигателей постоянного тока.
3. Синтез системы стабилизации линейной скорости безрельсового транспортного средства для бесколлекторных двигателей постоянного тока с применением алгоритма нечеткой логики.
4. Создание экспериментального стенда и интеграция разработанного алгоритма в физическую модель.

Объектом исследования является система тягового электропривода безрельсового транспортного средства с аккумуляторным источником питания.

Предметом исследования являются алгоритмы управления тяговым электроприводом с применением нечеткой логики для повышения энергоэффективности безрельсового транспортного средства.

Методы и средства выполнения исследования. В диссертационной работе использовались аналитические методы и сведения из теории электрических машин, преобразовательной техники, теории автоматического управления. Разработка имитационных моделей тяговой системы безрельсового транспортного средства выполнялась в компьютерной среде MATLAB/Simulink.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые получены следующие научные результаты:

1. Разработан алгоритм управления тяговым электроприводом, основанный на корректировке задающего воздействия за счет регулирования постоянной времени задатчика интенсивности с применением нечеткой логики.
2. Предложена методика оценки энергоэффективности безрельсового транспортного средства при движении по предложенному испытательному циклу в режиме стабилизации линейной скорости.
3. Разработана методика синтеза системы стабилизации линейной скорости безрельсового транспортного средства на основе алгоритмов нечеткой логики, реализующих функцию энергоэффективного управления.
4. Разработана система электронного дифференциала для варианта компоновки с четырьмя мотор-колесами на базе бесколлекторных двигателей постоянного тока.

Практическая значимость полученных результатов. Разработанные алгоритмы управления тяговым электроприводом и предложенная структура системы стабилизации линейной скорости в соответствии с условиями движения позволяют увеличить пробег безрельсового транспортного средства на 5%.

Созданная в программном пакете MATLAB/Simulink имитационная модель тяговой системы безрельсового транспортного средства позволила исследовать различные режимы движения и использовать их для оценки расхода электроэнергии. В дальнейшем может быть использована для количественных оценок расходования энергии на электрических транспортных средствах.

Реализован алгоритм расчета параметров регулирования задающего воздействия для оптимального разряда аккумуляторных батарей электромобиля в виде программного кода для электронно-вычислительной машины.

Разработанная в ходе выполнения исследования физическая модель тяговой системы транспортного средства позволяет оценить энергоэффективность по предложенной методике, а также корректность различных алгоритмов управления при проектировании тяговых систем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм управления системой электронного дифференциала для варианта компоновки с четырьмя мотор-колесами на базе бесколлекторных двигателей постоянного тока.
2. Алгоритмы управления тяговым электроприводом безрельсовых электрических транспортных средств на базе нечеткой логики для повышения энергоэффективности.

3. Имитационная модель тягового электропривода безрельсового транспортного средства, разработанная в стандартном программном пакете MATLAB / Simulink.

4. Результаты синтеза нечеткого регулятора системы стабилизации линейной скорости транспортного средства.

5. Результаты экспериментальных исследований движения транспортного средства на предложенном испытательном цикле с использованием физической модели тяговой системы.

Реализация результатов работы. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы приняты к применению в учебном процессе «Новосибирского государственного технического университета».

Результаты работы также были использованы при выполнении:

1. Гранта РФФИ «Аспиранты» №20-38-90187 от 15.09.2020.
2. Гранта РФФИ «Научное наставничество» №20-38-51007 «Разработка принципов построения и алгоритмов управления автономной гибридной энергоустановкой с искусственным интеллектом для выравнивания нагрузок тяговых подстанций РЖД» в 2020-2022 гг.

Обоснованность и достоверность результатов научного исследования определяется корректной постановкой задач, адекватностью принятых допущений, применением широко известных методов и средств численного моделирования, а также согласованием основных теоретических выводов с экспериментально полученными данными, как при имитационном моделировании, так и при натурных экспериментах.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. Заседаниях и научно-технических семинарах кафедры ЭАПУ в 2019, 2020, 2021 и 2022 годах.
2. Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях: «Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций севера России» Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция, Сургут 2020, 2021, 2022; «Proceedings of the 3 international youth conference on radio electronics», electrical and power engineering (REEPE), 2021; 15 Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», 2021 г; Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС), Чебоксары, 2019, 2020, 2021; International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020), Новосибирск, 2020; Научная платформа: дискуссия и полемика : сб. материалов международной науч.-практической конференции, Кемерово 2019, 2020; Дни науки НГТУ-2020; Aspire to Science : материалы международной научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Новосибирск, 2019; International multi-conference on industrial engineering and modern technologies (FarEastCon), Владивосток, 2019.

Публикации.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 16 научных работах, из них статей, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы

основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ) - 2, а также работ в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science - 3; свидетельств на программы для ЭВМ – 1.

Личный вклад автора. Результаты научных исследований, представленные в диссертационной работе, выполнены при непосредственном участии автора или под его руководством, которое заключалось в постановке задач, обосновании и выборе методов решения, а также в анализе полученных результатов. Полученные экспериментальные результаты, лично проводились автором работы, а также разработка методик испытаний, постановка задач для испытаний, анализ и интерпретация достигнутых результатов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 102 наименования и приложения. Основная часть изложена на 150 страницах, содержит 83 рисунков и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены научные проблемы, актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, изложены сведения о научной новизне и практической значимости, реализации и апробации работы.

В первой главе рассмотрены наиболее распространенные варианты компоновок тяговой системы электрических транспортных средств: с централизованным приводом; с централизованным приводом без сцепления; с централизованным приводом, подключенным к осевому дифференциалу; с мотор-колесами. Сделан выбор в пользу применения технологии мотор-колес.

Применение мотор-колес в тяговой системе полностью исключает такие механические узлы как сцепление, редуктор, дифференциал и полуоси, что уменьшает количество трущихся деталей и, в свою очередь, повышает надежность системы. Еще одним преимуществом мотор-колес является экономия места для размещения дополнительного оборудования, увеличения числа аккумуляторных батарей в системе накопления энергии или сохранения пространства для пассажиров. Независимое управление моментом и частотой вращения каждого колеса говорит о том, что мотор-колеса могут вращаться с разной частотой вращения и в разных направлениях, что значительно повышает динамику транспортного средства.

Анализ сказанного выше позволяет сделать вывод, что в составе мотор-колес могут применяться электрические двигатели, соответствующие следующим требованиям: высокий крутящий момент на низких скоростях; широкий диапазон регулирования скорости; высокий коэффициент удельной мощности.

Для достижения высоких динамических характеристик наиболее важным параметром является масса двигателя, поскольку уменьшение его массы влечет за собой уменьшение общей неподрессоренной массы безрельсового транспортного средства. Отсюда следует, что отношение коэффициента полезного действия двигателя к его массе является главным критерием его выбора.

В рамках диссертации анализ и сравнение различных типов электрических двигателей не является основной целью. Представленное исследование направлено на использование бесколлекторного двигателя постоянного тока в качестве тягового электромотора в составе мотор-колес. Такой выбор обусловлен высоким коэффициентом удельной мощности, низкой инерционностью ротора, высоким крутящим моментом на низких частотах вращения, высоким коэффициентом полезного действия за счет отсутствия обмоток в роторе, а также возможностью работы в широком скоростном диапазоне, в том числе в режиме ослабленного поля. По результатам тягового расчета выбран бесколлекторный двигатель постоянного тока с водяным охлаждением GoldenMotor НРМ10-20KW.

Проведен сравнительный анализ различных типов аккумуляторных батарей. На основании количественного и качественного сравнения различных типов тяговых источников тока, выбор в пользу литий-ионных аккумуляторных батарей обусловлен следующими показателями: высокие показатели удельных характеристик; высокие значения допустимых зарядных/разрядных токов; способность быстро заряжаться; большое количество циклов разряд-заряд; низкая скорость саморазряда; отсутствие «эффекта памяти».

Для выполнения оценки параметров аккумуляторной батареи, проанализированы серийно выпускаемые модели электромобилей. Необходимо обеспечить запас хода 150 километров, что соответствует среднему значению запаса хода для проанализированных в работе электрических транспортных средств. Анализ источников позволяет сделать вывод, что средний пробег автомобиля в день находится в промежутке от 50,8 до 65,2 километров. Значение электроемкости составляет 29,3 киловатт-часа. Согласно выполненному анализу, удельный показатель массы батареи составляет 8,263 килограмм на 1 киловатт-час емкости батареи. Соответственно, масса аккумуляторной батареи для полученного значения энергоемкости составляет 242 килограмма.

Функциональная схема тяговой системы безрельсового транспортного средства на базе четырех мотор-колес представлена на рисунке 1.

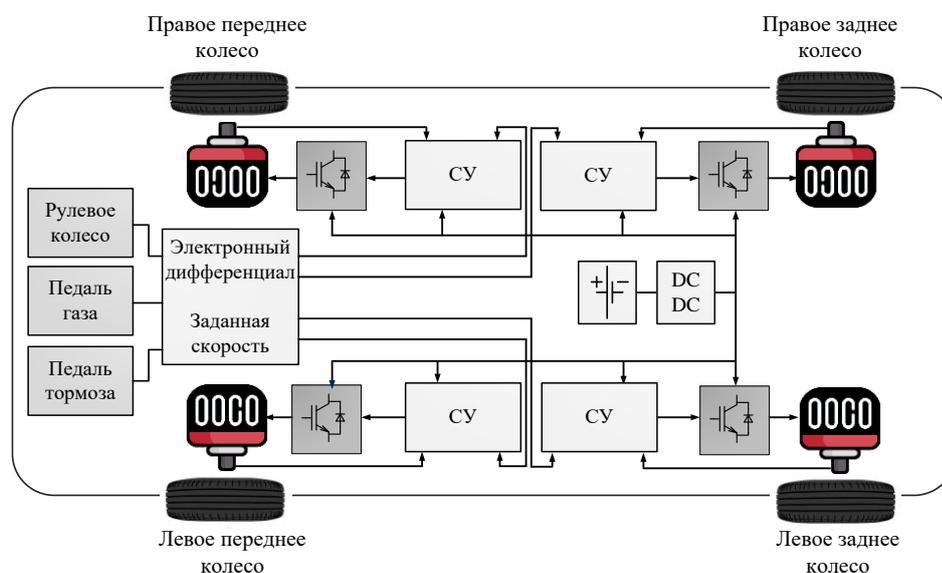


Рисунок 1 – Функциональная схема тяговой системы АЭТС на базе четырех мотор-колес

Во второй главе рассмотрен принцип Аккермана, который является основой алгоритма работы системы электронного дифференциала. На рисунке 2 представлена модель траектории движения транспортного средства при повороте налево, где L – длина колесной базы автомобиля, d – ширина колесной базы, v – линейная скорость автомобиля, v_R и v_L – линейные скорости правого и левого колес при повороте, R – радиус поворота, ω – угловая скорость поворота автомобиля.

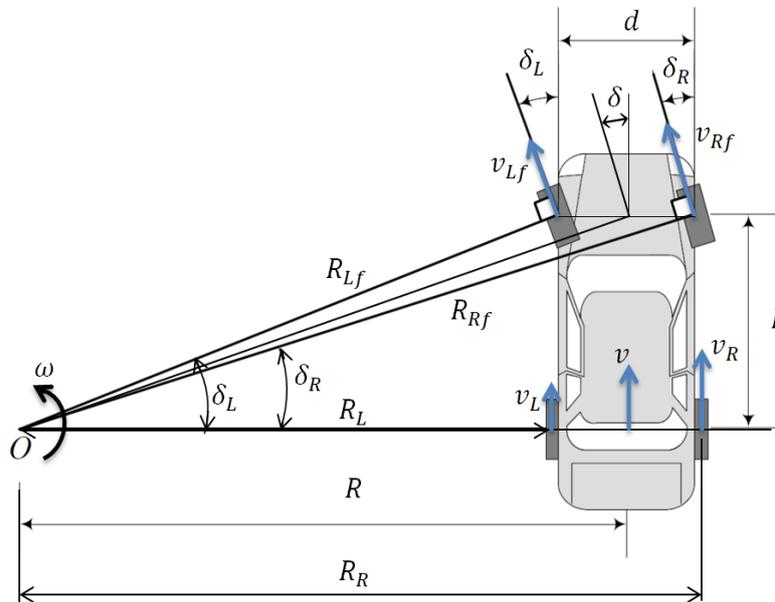


Рисунок 2 – Модель траектории движения

На основе математического описания получена имитационная модель электронного дифференциала для четырех мотор-колес. Подсистема двигателя включает в себя блок системы управления двигателем, а также математическую модель самого двигателя. Для обеспечения качества переходного процесса реализована трехконтурная система управления. Внешний контур регулирования – контур стабилизации линейной скорости транспортного средства на базе ПИД – регулятора. Следующим, подчиненным ему контуром, является контур стабилизации угловой частоты вращения мотор – колеса на базе ПИ – регулятора (или контур регулирования оборотов). Внутренний контур регулирования – это контур стабилизации напряжения звена постоянного тока (ЗПТ) на базе ПИ – регулятора напряжения (ПИ РН). Для каждого регулятора подобраны коэффициенты, обеспечивающие необходимую форму переходного процесса.

В качестве регулятора угловой частоты вращения и напряжения используется пропорционально-интегральный регулятор (ПИ – регулятор).

В данной модели предложен принцип построения систем управления с частотным разделением каналов управления, названный методом разделения частот. Принцип этого метода состоит в том, чтобы настроить скорость работы процессов в контуре регулирования в соответствии с частотой протекания реальных физических процессов в них.

Для контура регулирования напряжения выбирается нормированный полином, соответствующий стандартной линейной форме Бесселя, которая

характеризуется меньшим, чем стандартная линейная форма Баттерворта, перерегулированием, а также достаточно быстрым темпом переходных процессов относительно биномиальной формы. Для контура регулирования угловой частоты вращения также выбираем нормированный полином, соответствующий стандартной линейной форме Бесселя.

Далее, приравняв знаменатели передаточных функций замкнутых контуров регулирования к нормированным полиномам и определив коэффициенты нормированных полиномов, рассчитываются коэффициенты пропорциональной и интегральной частей регуляторов.

В качестве испытательного полигона для проверки работоспособности системы электронного дифференциала рассмотрим трассу Euroging. Переходные процессы по частоте вращения вала двигателя и по моменту на валу двигателя, представленные на рисунке 3 и 4, доказывают работоспособность разработанной модели.

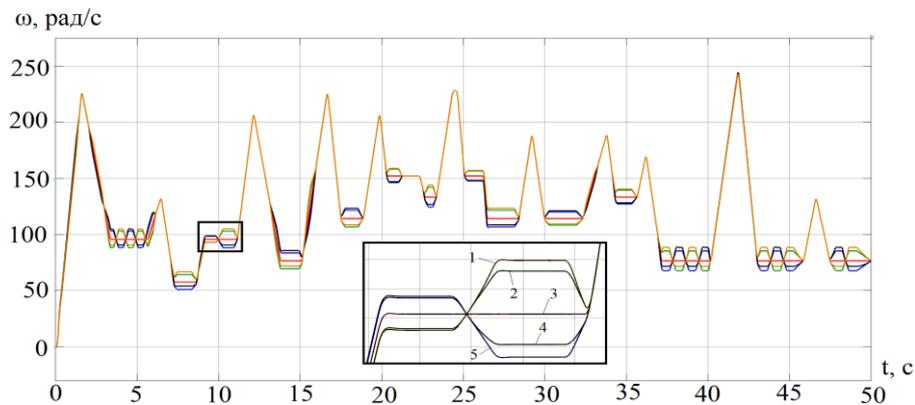


Рисунок 3 – Переходный процесс по частоте вращения вала двигателя (1 – левое переднее колесо; 2 – левое заднее колесо; 3 – средняя скорость автомобиля; 4 – правое заднее колесо; 5 – правое переднее колесо)

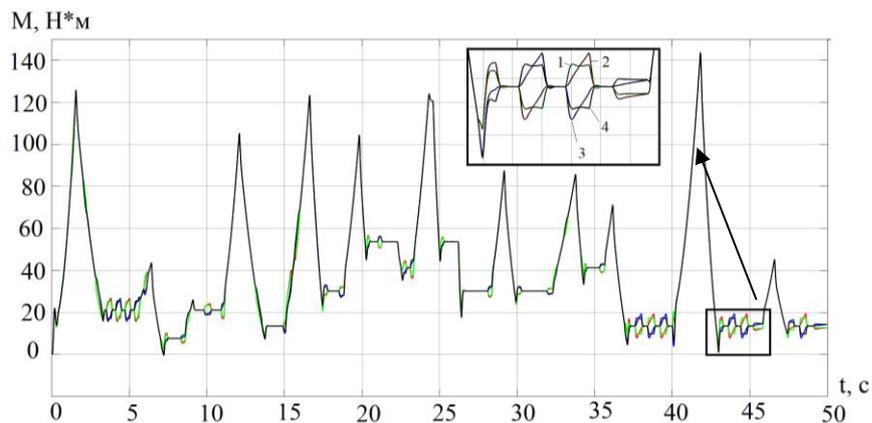


Рисунок 4 – Переходный процесс по моменту на валу двигателя (1 – правое заднее колесо; 2 – левое переднее колесо; 3 – левое заднее колесо; 4 – правое переднее колесо)

Преимущество применения электронного дифференциала по сравнению с механическим заключается в том, что при использовании электронного дифференциала разность скоростей на приводных колесах достигается за счет изменения сигналов задания скорости, когда в механическом дифференциале

изменение достигается за счет движения шестерней дифференциального блока, из-за чего, вследствие трения происходит снижение коэффициента полезного действия всего привода.

Сравнение проводилось на основании анализа графика энергий, затраченных двигателями при использовании механического и электронного дифференциала, а также КПД приводов при совершении маневров. Графики изменения КПД приводов при использовании механического и электронного дифференциала представлены на рисунке 5.

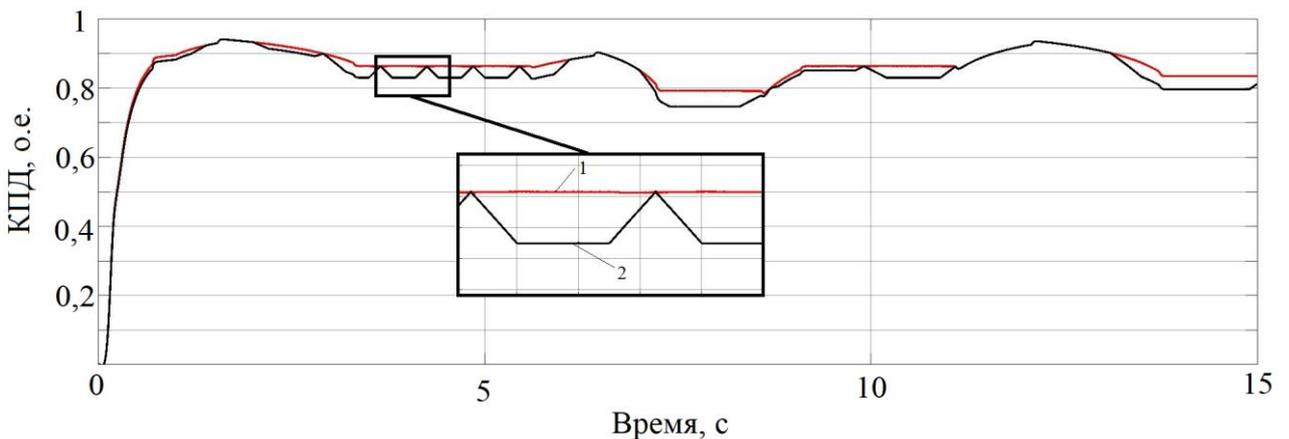


Рисунок 5 – Графики изменения КПД приводов при использовании механического (1) и электронного дифференциала (2)

Анализ переходного процесса, представленного на рисунке 5, позволяет доказать, что коэффициент полезного действия механического дифференциала обратно пропорционально зависит от угла поворота колес транспортного средства. При максимальных значениях угла поворота колес транспортного средства мгновенная разница в КПД между электронным и механическим дифференциалами достигала значения в 5,1%, что также свидетельствует об эффективности применения электронного дифференциала.

В третьей главе рассмотрена система стабилизации линейной скорости транспортного средства на базе ПИД – регулятора.

На рисунке 6 представлена функциональная схема алгоритма стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства с применением ПИД регулятора.

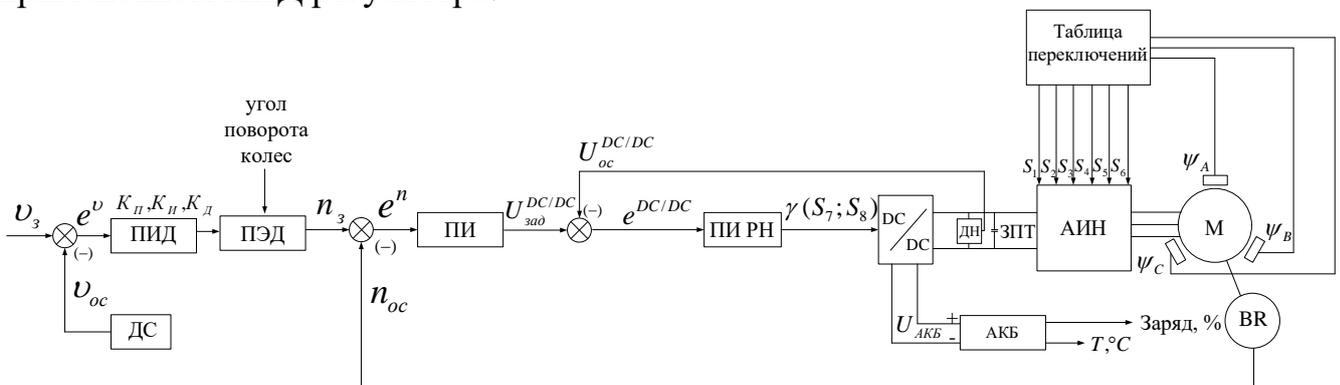


Рисунок 6 – Функциональная схема алгоритма стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства с применением ПИД регулятора

Питание всей системы осуществляется от блока аккумуляторной батареи АКБ, для согласования уровня напряжений звена постоянного тока и АКБ применяется DC-DC преобразователь. Блок АКБ включает в себя сборку аккумуляторов и систему управления. Система стабилизации скорости включает в себя три контура регулирования. Внешний контур регулирования – контур стабилизации линейной скорости транспортного средства на базе ПИД – регулятора.

В качестве сигнала задания понимается сигнал, формируемый водителем, поступающий с акселератора. Сигнал обратной связи – это сигнал с датчика линейной скорости транспортного средства. Следующим, подчиненным ему контуром, является контур стабилизации угловой частоты вращения мотор – колеса (или контур регулирования оборотов).

В качестве сигнала задания используется сигнал с выхода ПИД – регулятора, а сигнал обратной связи – это сигнал с датчика угловой частоты вращения - ВР. Внутренний контур регулирования – это контур стабилизации напряжения ЗПТ на базе ПИ – регулятора напряжения (ПИ РН).

В качестве сигнала задания выступает сигнал с выхода ПИ – регулятора угловой частоты вращения мотор – колеса, а в качестве сигнала обратной связи – сигнал с датчика напряжения ДН звена постоянного тока. Выходным сигналом регулятора ПИ РН является скважность γ , необходимая для формирования коммутационных функций S_7 и S_8 алгоритма переключения ключей DC-DC преобразователя.

Переключение ключей АИН выполняется за счет таблицы переключений в функции углового положения ротора бесколлекторного двигателя постоянного тока, при этом формируются коммутационные функции $S_1 - S_6$ на соответствующие ключи АИН.

Угловое положение ротора бесколлекторного двигателя постоянного тока оценивается при помощи трех датчиков Холла $H_1 - H_3$, установленных в каждой фазе двигателя и выполняющих измерение потокосцеплений ψ_A, ψ_B, ψ_C .

На основании комплекса подъемов малой крутизны полигона НАМИ, составлен испытательный цикл, который представляет собой изменение продольного профиля дорожного полотна.

Испытания проводились для трех значений линейной скорости – 40, 60 и 100 км/ч. Для каждой скорости проведено имитационное моделирование при четырех различных значениях заряда аккумуляторной батареи: 100, 75, 50 и 25%.

Ниже приведены переходные процессы по скорости, пройденной дистанции и остаточному заряду батареи для скорости 40 км/ч и заряду батареи 25% для системы с ПИД – регулятором.

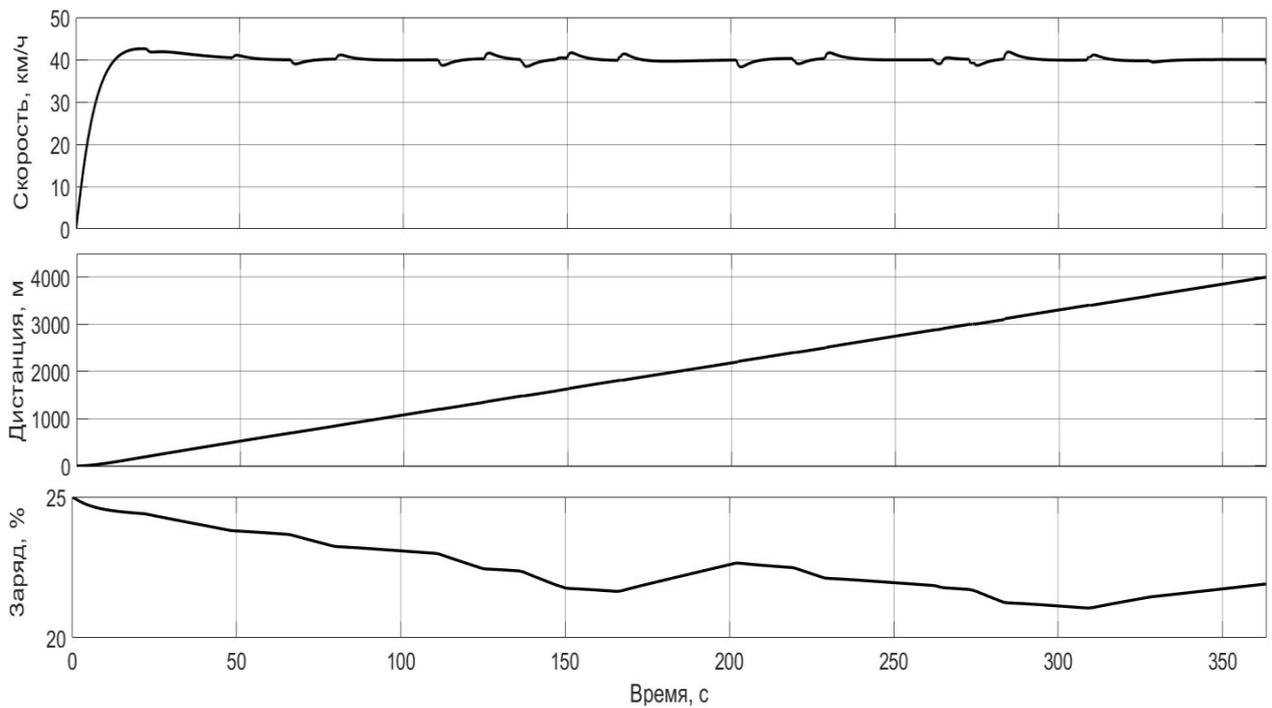


Рисунок 7 – Переходные процессы по скорости, пройденной дистанции и остаточному заряду батарей при прохождении цикла НАМИ системой управления на базе ПИД регулятора на скорости 40 км/ч и заряде батареи 25%

Функциональная схема алгоритма стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства с применением нечеткой логики представлена на рисунке 8.

Система управления с ПИД – регулятором, представленная на рисунке 6, дополнена задатчиком интенсивности ЗИ с настраиваемой постоянной времени $T_{ЗИ}^{БНЛ}$ и управляемым блоком нечеткой логики БНЛ. В системе возможны три режима работы: экономичный (ECO), нормальный (NORMAL) и динамичный (FAST).

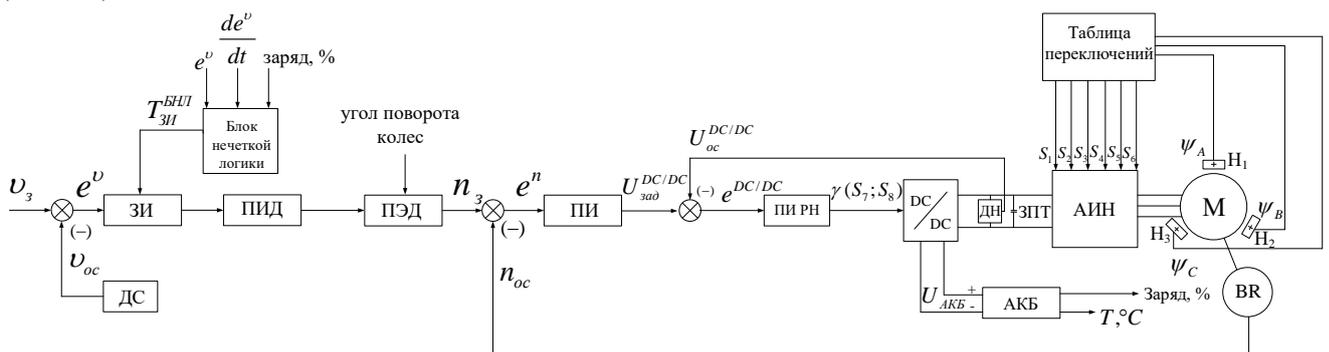


Рисунок 8 – Функциональная схема алгоритма стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства с применением нечеткой логики

Блок нечеткой логики БНЛ выполняет функцию управления режимами работы системы стабилизации линейной скорости безрельсового транспортного средства, воздействуя на постоянную времени задатчика интенсивности и автоматически переводя всю систему стабилизации линейной скорости в экономичный режим с целью увеличения запаса хода безрельсового транспортного

средства. Однако, блок нечеткой логики БНЛ сохраняет динамические характеристики автомобиля, при необходимости автоматически переводя систему управления безрельсового транспортного средства в нормальный или динамичный режим работы.

Входными сигналами для БНЛ являются сигнал e^v , $\frac{de^v}{dt}$ и заряд АКБ, значение которого поступает с системы управления АКБ. Выходной сигнал БНЛ – это постоянная времени задатчика интенсивности $T_{3И}^{БНЛ}$, вычисление которой производится алгоритмами БНЛ, оптимизированными на увеличение запаса хода безрельсового транспортного средства.

Система работает в режиме поддержания заданной линейной скорости движения безрельсового транспортного средства. При возникновении сигнала ошибки, связанного с изменением сигнала задания или линейной скорости электромобиля, запускается алгоритм стабилизации линейной скорости безрельсового транспортного средства с применением блока нечеткой логики БНЛ. В зависимости от текущих параметров движения и заряда АКБ определяется режим работы системы стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства.

Регулятор выполнен на базе модели Мамдани (метод активации–min) с тремя входами (Сигнал ошибки регулирования e^v , первая производная по ошибке регулирования $\frac{\Delta e^v}{\Delta t}$ и заряд АКБ SOC, %) и одним выходом (output). Метод агрегирования осуществляется операцией min-конъюнкции. Аккумуляция заключений правил реализована с помощью метода max-дизъюнкции. Каждая из входных переменных описывается тремя лингвистическими правилами. В структуре регулятора при этом присутствуют следующие термы, например для переменной e^v :

PH – positive high, «ошибка положительная высокая»;

M – minor, «незначительная»;

NH – negative high, «ошибка отрицательная высокая».

Правила формируются по принципу *если...и ..., то...* Форма функций принадлежности входных и выходной переменных может иметь различный вид. В данной работе при моделировании в программном пакете MATLAB/Simulink использовались треугольные функции принадлежности. Метод дефазификации – centroid (метод центра тяжести). Настройка выполнялась методом итерационного моделирования в два этапа: грубая настройка с помощью редактирования правил; тонкая настройка с помощью изменения параметров функций принадлежности. Критерием настройки является минимизация расхода энергии при движении транспортного средства по испытательному циклу. Целевая функция расхода энергии выглядит следующим образом:

$$J = \int_0^{t_{\text{пол}}} I^2 dt \rightarrow \min,$$

где $t_{\text{пол}}$ – время прохождения цикла; I – ток двигателя.

Оптимизация выполнялась в программном пакете MATLAB/Simulink.

Составлена база лингвистических правил нечеткого регулятора, настроены функции принадлежности, построены трехмерные поверхность отклика для разных форм функций принадлежности.

На рисунке 9 приведены переходные процессы по скорости, пройденной дистанции и остаточному заряду батарей для скорости 40 км/ч и заряду батареи 25% для системы с нечетким регулятором.

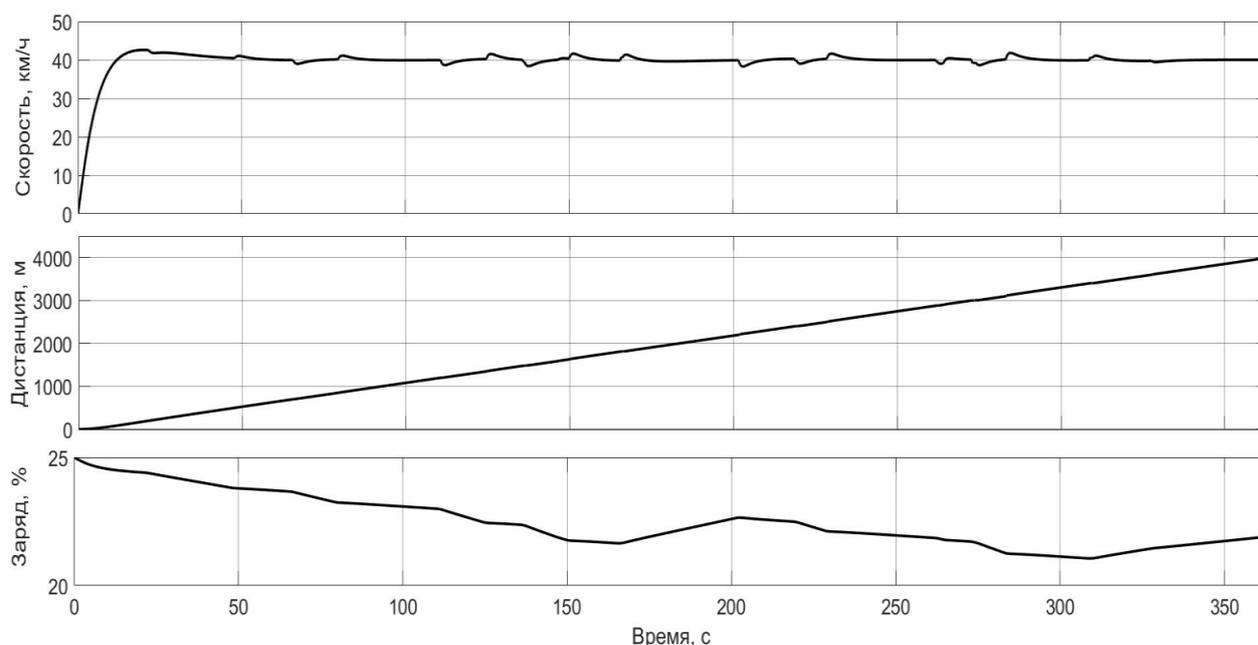


Рисунок 9 – Переходные процессы по скорости, пройденной дистанции и остаточному заряду батарей при прохождении цикла НАМИ системой управления на базе алгоритма нечеткой логики 40 км/ч и заряде батареи 25%

Результаты полного цикла испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты имитационного моделирования прохождения цикла при разных скоростях и зарядах аккумуляторной батареи на старте

Испытания на скорости 100 км/ч							
Заряд АКБ, %	Время ПИД, с	Время fuzzy, с	Остаточный заряд АКБ ПИД, %	Расход, %	Остаточный заряд АКБ fuzzy, %	Расход, %	Экономия, %
25	146,93	155,28	18,82	6,18	19,02	5,98	3,31
50	146,93	153,11	44,09	5,91	44,24	5,76	2,55
75	146,93	149,55	69,30	5,70	69,39	5,61	1,58
100	146,93	148,24	94,30	5,70	94,22	5,62	1,41

Испытания на скорости 60 км/ч							
Заряд АКБ, %	Время ПИД, с	Время fuzzy, с	Остаточный заряд АКБ ПИД, %	Расход, %	Остаточный заряд АКБ fuzzy, %	Расход, %	Экономия, %
25	243,14	251,24	21,22	3,78	21,42	3,58	5,29
50	243,14	247,11	46,16	3,84	46,35	3,65	4,94
75	243,14	246,58	71,06	3,94	71,21	3,79	3,88
100	243,14	246,11	96,06	3,94	96,14	3,86	2,14
Испытания на скорости 40 км/ч							
Заряд АКБ, %	Время ПИД, с	Время fuzzy, с	Остаточный заряд АКБ ПИД, %	Расход, %	Остаточный заряд АКБ fuzzy, %	Расход, %	Экономия, %
25	363,38	371,40	21,91	3,09	22,13	2,87	7,12
50	363,38	370,35	46,83	3,17	47,02	2,98	6,05
75	363,38	369,58	71,77	3,22	71,94	3,06	4,89
100	363,38	368,94	96,77	3,22	96,88	3,12	3,17

Анализ таблицы 1 позволяет сделать вывод, что для каждого из рассмотренных значений скорости максимальная экономия достигается при минимальном заряде аккумуляторной батареи. Расчет экономии заряда аккумуляторной батареи ΔS осуществляется по следующей формуле:

$$\Delta S = \frac{S_{fuzzy} - S_{PID}}{S_{PID}} \cdot 100\%,$$

где S_{fuzzy} – расход заряда аккумуляторной батареи для системы с нечетким регулятором; S_{PID} – расход заряда аккумуляторной батареи для системы с ПИД – регулятором.

Значение экономии энергии находится в диапазоне от 1,41 до 7,12%.

Стоит отметить, что движение транспортного средства является циклическим. В каждом его цикле есть начало движения (момент во времени и точка—в пространстве), его конец, когда скорости движения равны нулю, то есть транспортное средство и его груз до начала движения и после его окончания неподвижны.

Наиболее приближенным к реальному движению на городских дорогах общего пользования является цикл WLTC с наибольшим максимальным ускорением (до 1,66 м/с²) и наименьшим временем остановок – 13% от общего времени цикла. Высокая динамика способствует наибольшим энергозатратам на передвижение относительно других циклов. Испытания по циклу движения WLTC проводились по заранее известному сигналу задания линейной скорости транспортного средства для четырех стандартных значений заряда аккумуляторной батареи на старте: 25, 50, 75 и 100%.

Результаты испытаний по циклу движения WLTC приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты имитационного моделирования прохождения цикла WLTC при разных зарядах аккумуляторной батареи на старте

Заряд АКБ, %	Остаточный заряд АКБ ПИД, %	Затраченный заряд АКБ ПИД, %	Остаточный заряд АКБ fuzzy, %	Затраченный заряд АКБ fuzzy, %	Экономия, %
25	20,62	4,38	21,76	3,24	4,11
50	45,92	4,02	46,14	3,86	4,02
75	71,05	3,95	71,21	3,79	3,92
100	96,04	3,96	96,19	3,81	3,90

Анализ таблицы 2 позволяет сделать вывод, что для каждого из рассмотренных значений заряда аккумуляторной батареи на старте максимальная экономия достигается при 25%. Значение экономии энергии находится в диапазоне от 3,9 до 4,11%.

В четвертой главе представлена функциональная схема испытательного стенда, приведен обзор оборудования и его параметры.

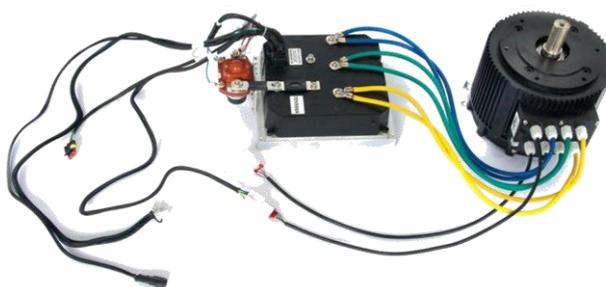


Рисунок 10 – Часть испытательного стенда

На программируемом источнике постоянного тока формируется нагрузка, аналогичная предложенному испытательному циклу. Программное обеспечение Motor Control System формирует множество архивов данных – значение угловой частоты вращения, пересчитанной в линейную скорость, и значение заряда в определенные моменты времени. По этим данным построены зависимости остаточного заряда аккумуляторной батареи и линейной скорости от времени.

Таблица 3 – Качественное сравнение результатов моделирования и эксперимента

Испытания на скорости 100 км/ч			
Экономия модели, %	Экономия эксперимента, %	Абсолютная ошибка Δ , %	Относительная ошибка ξ , %
3,31	2,90	0,41	12,38
2,55	2,22	0,32	12,55
1,58	1,38	0,20	12,66
1,41	1,25	0,16	11,34

Испытания на скорости 60 км/ч			
Экономия модели, %	Экономия эксперимента, %	Абсолютная ошибка Δ , %	Относительная ошибка ξ , %
5,29	4,98	0,31	5,80
4,94	4,67	0,27	5,47
3,88	3,62	0,26	6,70
2,14	2,01	0,13	6,07
Испытания на скорости 40 км/ч			
Экономия модели, %	Экономия эксперимента, %	Абсолютная ошибка Δ , %	Относительная ошибка ξ , %
7,12	6,89	0,21	2,95
6,05	5,91	0,14	2,31
4,89	4,70	0,12	2,45
3,17	3,06	0,11	3,47

Анализ таблиц 2 и 3 позволяет сделать вывод, что значения, полученные в ходе эксперимента, соответствуют результатам моделирования с достаточной степенью точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее существенные результаты исследований в диссертационной работе заключаются в следующем:

1. Разработаны рекомендации по выбору варианта компоновки тяговой системы безрельсового транспортного средства для повышения её энергоэффективности.
2. Разработана система электронного дифференциала для варианта компоновки с четырьмя мотор-колесами на базе бесколлекторных двигателей постоянного тока.
3. Осуществлен синтез системы стабилизации линейной скорости безрельсового транспортного средства для бесколлекторных двигателей постоянного тока с применением алгоритма нечеткой логики с оптимизацией энергопотребления при движении по испытательному циклу НАМИ и циклу движения WLTC.
4. Создан экспериментальный стенд и осуществлена интеграция разработанного алгоритма в физическую модель.

Имитационное моделирование прохождения испытательного полигона Euroving демонстрирует, что экономия энергии от применения электронного дифференциала по сравнению с механическим составила 1,46 %, мгновенная разница в значениях КПД достигала величины 5,1 %. Величина экономии заряда для цикла НАМИ находится в диапазоне от 1,41 до 7,12%, для цикла движения WLTC в диапазоне от 3,9 до 4,11%. Данные эксперимента подтверждают, что

применение нечеткого алгоритма позволяет повысить энергетическую эффективность транспортного средства.

Рассмотренные подходы могут применяться при проектировании различных типов электрических транспортных средств, предназначенных для эксплуатации в городском, загородном и смешанном циклах движения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях, рецензируемых ВАК:

1. Попов Н.С. Способы обеспечения безопасности движения автономного электрического транспортного средства = Methods of ensuring safety of autonomous electric vehicles / В. Н. Аносов, Е. О. Орел, Н. С. Попов// Вопросы электротехнологии. – 2021. – № 4 (33). – С. 65–73.
2. Попов Н.С. Сигнально-адаптивная система управления асинхронным электроприводом/ Кучер Е.С., Блинов А.А., Сидоров Г.С., Попов Н.С.// Электротехника. 2022.– №5. –С. 24-29.

Публикации в Web of Science/Scopus:

3. Popov N. S. Study of processes that cause degradation of lithium-ion batteries / N. S. Popov, V. I. Anibroev, M. E. Mosin // Proceedings of the 3 international youth conference on radio electronics, electrical and power engineering (REEPE), 11–13 March 2021. – Moscow : IEEE, 2021. – Art. 52 (4 p.). - DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388037.
4. Development of autonomous traction system of electric vehicle with electronic differential and fuzzy control system / N. S. Popov, V. N. Anosov, M. E. Vilberger, E. A. Domakhin, V. I. Anibroev, I. I. Singizin // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. – Vol. 1661 : International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020), Novosibirsk, 6-8 Apr. 2020. - Art. 012108 (6 p.). - DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012108.
5. Kucher E. S. Synthesis of vector control systems by localization method / E. S. Kucher, N. S. Popov, T. V. Gryzunova // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - Vol. 1333 - Art. 042017 (6 p.). - DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042017.

Прочие публикации:

6. Попов Н.С. Изучение процессов, вызывающих деградацию литий-ионных аккумуляторов / М. Е. Вильбергер, Н. С. Попов, М. Е. Мосин, В. И. Аниброев // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций севера России : сб. ст. 2 Всерос. с междунар. участием науч.-практ. конф., Сургут, 22–23 апр. 2021 г. – Москва : Знание-М, 2021. – С. 228-235.
7. Попов Н.С. Обоснование применения мотор-колес в тяговой системе электромобиля / Н. Ю. Ляпин, Н. С. Попов, В. И. Аниброев. Г. М. Симаков. - // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. 15 Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, С. 161–163., 6–10 дек. 2021 г.
8. Попов Н.С. Современные подходы к увеличению запаса хода автономного электрического транспортного средства / А. А. Красносельский, В. И. Аниброев, Н. С. Попов, В. Н. Аносов // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. 15 Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 6–10 дек. 2021 г. : в 10 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. – Ч. 5. – С. 152–154.

9. Попов Н.С. Увеличение запаса хода автономного транспортного средства за счет применения алгоритмов нечеткой логики / Н. С. Попов, В. Н. Аносов, М. Е. Вильбергер, Е. А. Домахин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС–2021) : мат. 14 Всерос. науч.-техн. конф., Чебоксары, 2021. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 93–95.
10. Н. С. Попов. Исследование процессов, вызывающих деградацию аккумуляторных батарей / В. И. Аниброев, М. Е. Мосин, Н. С. Попов // Научная платформа: дискуссия и полемика : сб. мат. междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 30 окт. 2020 г. – Кемерово : ЗапСибНЦ, 2020. – С. 39–41.
11. Попов Н.С. Обоснование компоновки тяговой системы автономного электрического транспортного средства/ В. И. Аниброев, И. И. Сингизин, Н. С. Попов // Науч. форум: тенденции развития науки и общества : сб. мат. междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 29 фев. 2020 г. – Кемерово : ЗапСибНЦ, 2020. – С. 82–83.
12. Попов Н.С. Разработка энергоэффективного тягового привода автономного безрельсового транспортного средства / В. И. Аниброев, Е. А. Домахин, Н. С. Попов // Дни науки НГТУ-2020, посвященные 70-летию НГТУ : материалы науч. студен. конф. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. - С. 3-4.
13. Попов Н.С. Управление батареями в системе накопления энергии автономного электрического транспортного средства / В. И. Аниброев, И. И. Сингизин, Н. Ю. Ляпин, Н. С. Попов // Дни науки НГТУ-2020, посвященные 70-летию НГТУ : мат. науч. студ. конф. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. - С. 7-9.
14. Попов Н.С. Обоснование компоновки тяговой системы автономного электрического транспортного средства / Н. С. Попов, В. И. Аниброев, В. Н. Аносов // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 2–6 дек. 2019 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – Ч. 5. – С. 206-208.
15. Попов Н.С. Повышение энергоэффективности безрельсового транспорта за счет реализации оптимальных алгоритмов управления / Н. С. Попов, В. Н. Аносов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2019) : материалы 13 Всерос. науч.-тех. конф., Чебоксары, 7 июня 2019 г. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 43–44.

Свидетельство на программу для ЭВМ:

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022617250 Российская Федерация. Программа расчета параметров регулирования задающего воздействия для оптимального разряда аккумуляторных батарей электромобиля. / В.Н. Аносов, Н.С. Попов; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». - № 2022616754; заявл. 19.04.2022; опубл. 19.04.2022. – 1 с.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ №1153. Подписано в печать 04.07.2022 г