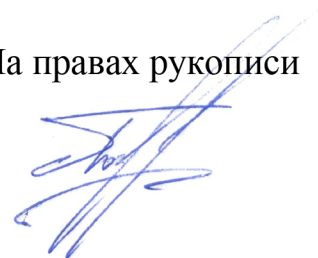


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ПОПОВ НИКИТА СЕРГЕЕВИЧ

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

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор Аносов Владимир Николаевич

Новосибирск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОМПОНОВКИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	12
1.1 Анализ существующих вариантов компоновок тяговой системы безрельсового транспортного средства	12
1.2 Расчет параметров тяговой системы безрельсового транспортного средства.....	21
1.3 Основные эксплуатационные характеристики и типы аккумуляторных батарей.....	25
1.3.1 Свинцово кислотный аккумулятор	27
1.3.2 Никель-кадмиевые аккумуляторные батареи	29
1.3.3 Никель-металлогидридные аккумуляторные батареи	30
1.3.4 Литий-ионные аккумуляторные батареи.....	30
1.3.5 Суперконденсаторы	32
1.3.6 Сравнительный анализ источников тока.....	33
1.4 Определение емкости тяговой аккумуляторной батареи	35
1.5 Разработка функциональной схемы тяговой системы безрельсового транспортного средства.....	38
Выводы по главе 1.....	40
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛА БЕЗРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА.....	42
2.1 Математическое описание электронного дифференциала	42
2.2 Имитационное моделирование электронного дифференциала.....	48
2.3 Сравнение энергоэффективности механического и электронного дифференциалов.....	54
Выводы по главе 2.....	57
ГЛАВА 3 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА	59
3.1 Система стабилизации линейной скорости транспортного средства на базе ПИД – регулятора	59
3.2 Испытательный цикл	74
3.3 Анализ режимов движения транспортного средства на основе стандартизированных циклов движения	78

3.4 Имитационное моделирование режимов работы безрельсового транспортного средства в программном пакете MATLAB/Simulink	85
3.4.1 Моделирование системы стабилизации линейной скорости транспортного средства на базе ПИД – регулятора	85
3.4.2 Применение алгоритмов нечеткой логики в системах электрического транспорта	88
3.4.3 Моделирование системы стабилизации линейной скорости транспортного средства на базе алгоритма нечеткой логики	97
Выводы по главе 3.....	113
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	115
4.1 Описание функциональной схемы испытательного стенда системы тягового электропривода безрельсового транспортного средства	115
4.2 Практическая реализация источника питания и нечеткого регулятора	120
4.3 Обработка результатов эксперимента	127
Выводы по главе 4.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КАНДИДАТСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ И ДОКУМЕНТЫ АВТОРСКОГО ПРАВА	149

ВВЕДЕНИЕ

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, т.к. 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 [1, 2] внесли свой неоценимый вклад в разработку теории тягового расчета. И. С. Ефремов совместно с Г. В. Косаревым [3, 4] 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 [5-7]. 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 [8-11]. 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, Р. Vubna, S.

Kermani, ZilinMa, М. А. Слепцова [12-14]. В Новосибирском государственном техническом университете Н. И. Щуровым и В. И. Соповым выполнены 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 [15-21].

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.

Публикации и 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.

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.

ГЛАВА 1 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОМПОНОВКИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1 Анализ существующих вариантов компоновок тяговой системы безрельсового транспортного средства

В последние годы электрические безрельсовые транспортные средства являются одной из самых быстроразвивающихся технологий. Их применение может стать решением проблемы эффективного использования энергии и снижения ущерба окружающей среде, который наносится двигателями внутреннего сгорания. В настоящее время конструирование электромобилей вышло на значительно новый уровень, однако относительно высокая стоимость и ограниченность запаса автономного хода остаются главными проблемами. Увеличение автономного хода электрических транспортных средств, в настоящее время, достигается разными способами. Один из наиболее распространенных – это интеграция дополнительных аккумуляторных батарей в силовую схему транспортной установки. Недостатками этого метода являются удорожание транспортного средства и увеличение массогабаритных показателей. Другой метод – это реализация современных систем управления силовой схемой транспортного средства, так называемый аппаратный метод. Его недостатками служит сложность реализации и внедрение дополнительного оборудования в электрическую часть транспортного средства [22].

Инженерами и учеными постоянно совершенствуются технологии изготовления электрических машин, аккумуляторных батарей и полупроводниковых элементов для создания энергоэффективных вариантов компоновки тяговой системы электрических безрельсовых транспортных средств. Массовый выпуск электромобилей мировыми лидерами в области автомобилестроения позволил снизить рыночную стоимость таких транспортных средств, по сравнению со штучными экземплярами, что также делает электромобили не только приемлемым вариантом для покупателей, но

и отличной альтернативой автомобилям с двигателем внутреннего сгорания. Самым большим преимуществом электромобилей является то, что их применение обеспечивает нулевой уровень выбросов, делая его экологически чистым. По сравнению с обычными транспортными средствами электромобиль отличается высокой энергоэффективностью. Именно по этой причине многие автомобильные компании сосредоточены на производстве гибридных автомобилей и электромобилей. Такие решения получают государственную поддержку во многих странах, курс развития которых направлен на стимулирование развития «зеленой» энергетики. Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 23 августа 2021 г. № 2290-р [23] такого же вектора придерживается и наша страна. В распоряжении говорится «о мерах стимулирования деятельности в автомобильной промышленности и мерах, направленных на выход на новые формирующиеся рынки продукции, сочетающих полезный эффект своего функционального назначения с обеспечением безопасных и благоприятных условий для здоровья человека и окружающей среды ("зеленой"), или на сохранение и расширение существующих сегментов рынка за счет обеспечения глобальной конкурентоспособности российских товаров и услуг по уровню их энерго- и углеродоемкости». Помимо этого, рассмотрены «целевые показатели по производству электрического автомобильного транспорта и развитию зарядной инфраструктуры на период до 2030 года», а также утвержден «план мероприятий ("дорожная карта") по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2024 года».

Помимо городских транспортных систем и автомобилей общего пользования, электротранспорт находит своё применение и в качестве транспортных комплексов производственных помещений. Все большую популярность по всему миру приобретают электрокары и погрузчики,

особенно в закрытых складских помещениях, где применение классического транспорта с ДВС невозможно.

Большинство автономных электрических транспортных средств проектируются посредством нескольких основных узлов: электрический двигатель, система накопления энергии, преобразовательная техника. Именно они обеспечивают требуемую динамику транспортного средства и высокую автономность. В зависимости от того, в каком месте установлен электрический двигатель, выделяют компоновку транспортного средства с централизованным приводом и распределенным приводом, который состоит из нескольких электродвигателей [24].

Электротранспорт с централизованным приводом, тяговая система которого представлена на рисунке 1.1, схож по компоновке с классическим транспортным средством с двигателем внутреннего сгорания. Такая система реализуется путем незначительных изменений в компоновке классического транспортного средства. Эти изменения заключаются в заменах двигателя внутреннего сгорания на электрический двигатель и бензобака на систему накопления электроэнергии.

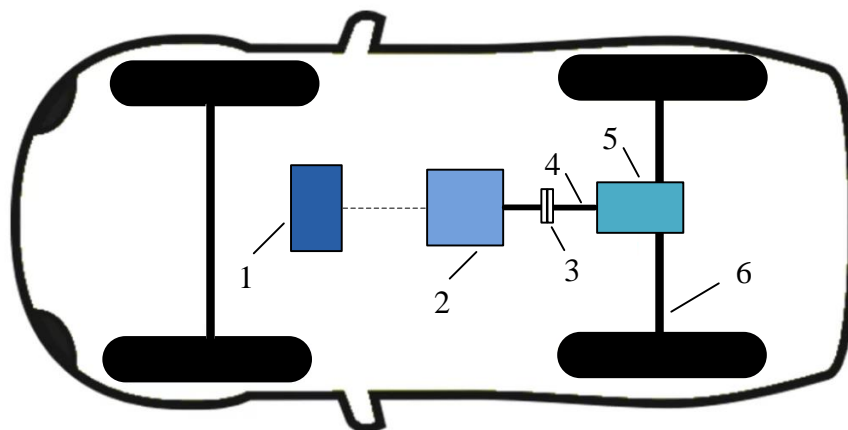


Рисунок 1.1 – Расположение тяговой системы в автономном электрическом транспортном средстве с централизованным приводом (1 – система накопления энергии; 2 – электрический двигатель; 3 – сцепление; 4 – редуктор; 5 – дифференциал)

Трансмиссия электромобиля с такой реализацией тяговой системы имеет 2-3 переключения передач, сцепление играет роль отключения мощности и уменьшения удара при переключении передач. Система с централизованным электроприводом в такой реализации сохраняет в своем составе большое количество механических узлов, таких как редуктор, дифференциал, карданный вал, что увеличивает массу транспортного средства, а это, в свою очередь, приводит к нерациональному расходу электрической энергии.

Представленная выше система с централизованным приводом может быть улучшена посредством устранения сцепления, и заменой его на редуктор с фиксированным передаточным числом, который соединен с электродвигателем. Такое решение, представленное на рисунке 1.2, в свою очередь, приводит к незначительному уменьшению массы транспортного средства.

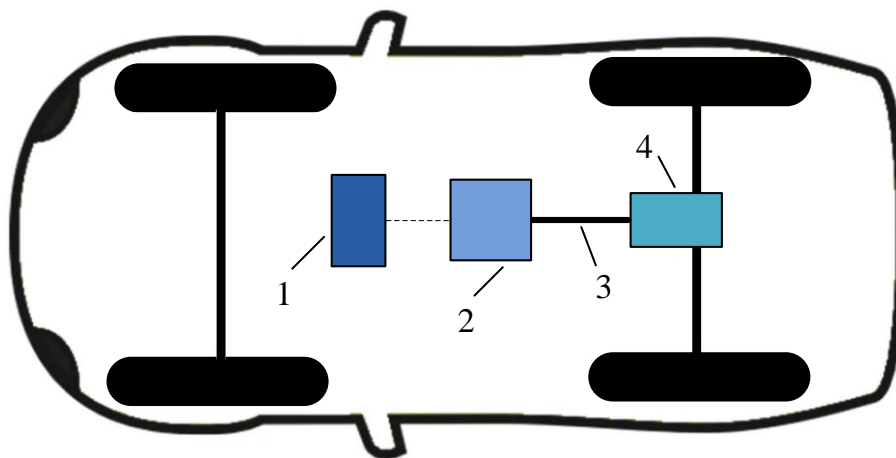


Рисунок 1.2 – Расположение тяговой системы в автономном электрическом транспортном средстве с централизованным приводом без сцепления (1 – система накопления энергии; 2 – электрический двигатель; 3 – редуктор с фиксированным передаточным числом; 4 – дифференциал)

Такая конструкция позволяет улучшить характеристики автономного транспортного средства, но все ещё содержит достаточно много механических

узлов, что сохраняет главный недостаток системы с централизованным приводом.

Подключение электрического двигателя непосредственно к осевому дифференциалу, как показано на рисунке 1.3, позволяет избавиться от редуктора, что снижает общую массу конструкции транспортного средства. Также, при такой компоновке появляется возможность реализации системы с распределенным приводом при подключении второго электродвигателя на другую ось. Такой вариант реализации тяговой системы требует подбора тихоходного тягового электродвигателя, вследствие чего появляется проблема обеспечения запаса мощности для осуществления быстрого старта.

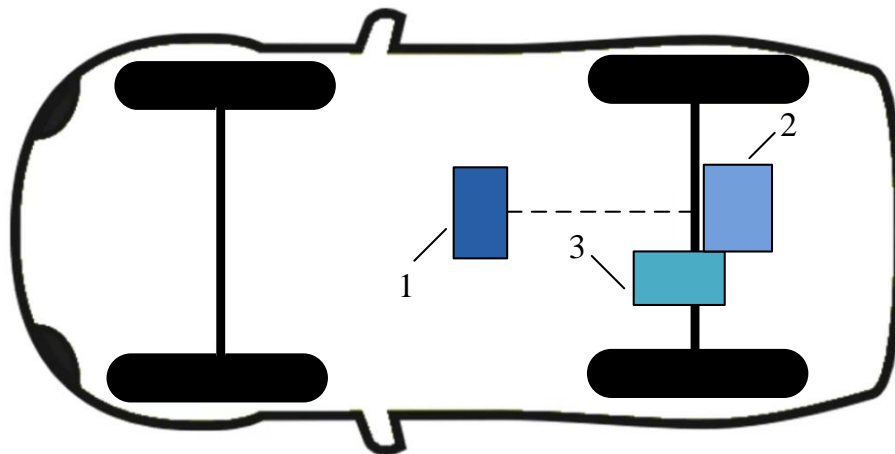


Рисунок 1.3 – Расположение тяговой системы в автономном электрическом транспортном средстве с централизованным приводом, подключенным к осевому дифференциалу (1 – система накопления энергии; 2 – электрический двигатель; 3 – дифференциал)

Как было сказано ранее, реализация тяговой системы транспортного средства с распределенным приводом предполагает наличие нескольких электрических двигателей. Мощность передается на соответствующее колесо за счет интеграции нескольких двигателей вблизи колеса или обода, что значительно сокращает цепь передачи энергии. Одним из вариантов реализации такой тяговой системы является система с мотор-колесами, при

которой электрический двигатель непосредственно встроен в колесо. Помимо электродвигателя, мотор-колеса оснащаются тормозной системой и системой подвесок.

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.

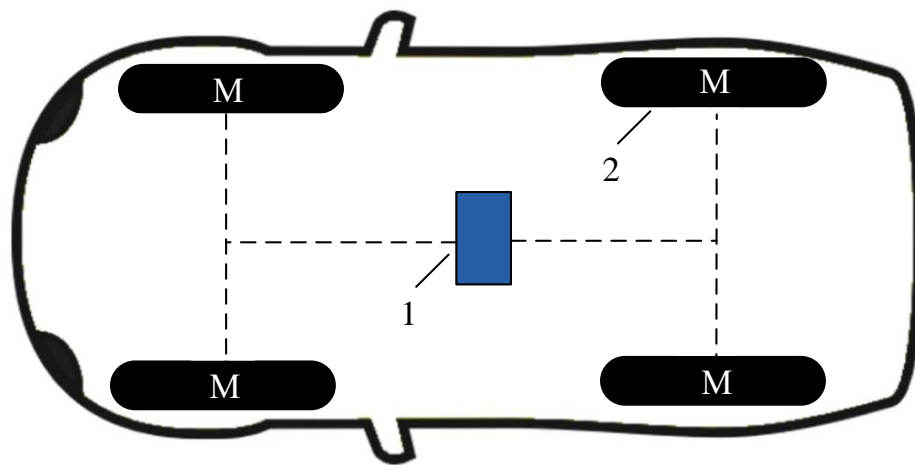


Рисунок 1.4 – Расположение тяговой системы в автономном электрическом транспортном средстве с мотор-колесами (1 – система накопления энергии; 2 – мотор-колесо)

На данный момент автомобили с мотор-колёсами разрабатываются многими производителями [25, 26], в том числе для условий бездорожья [27]. К недостатку такой системы стоит отнести большую неподрессоренную массу, которая повышает износ подвески и передает на кузов больше вибраций [28].

В работе будет рассмотрена система с распределенным приводом на базе четыре мотор-колес. Реализация оптимальной системы управления всеми двигателями одновременно позволит повысить энергоэффективность установки.

Для исключения передаточных механизмов в устройстве мотор–колес применяется прямое соединение вала электрического двигателя непосредственно с колесом. В таком случае, номинальные параметры режимов движения транспортного средства могут обеспечить электродвигатели с постоянными магнитами и осевым магнитным потоком. Однако, производство электродвигателей с постоянными магнитами и осевым магнитным потоком является более дорогостоящим в сравнении со стандартной конструкцией электродвигателя с радиальным магнитным потоком [29].

Использование многоступенчатой механической трансмиссии также позволяет добиться необходимых динамических показателей системы в пределах номинальных параметров электрического двигателя. Но стоит отметить, что процесс разработки, эксплуатации и технического обслуживания таких механизмов также является трудоёмким и ресурсозатратным вследствие наличия большого количества механических узлов.

Конструкция мотор-колеса подразумевает использование передаточного механизма с одной ступенью и не имеет возможности изменения передаточного числа. Такое решение является наиболее эффективным, поскольку конечная стоимость и эксплуатационные затраты значительно ниже в сравнении с представленными выше конструкциями. Упрощение механической части конструкции влечет за собой необходимость расширения диапазона регулирования электрического двигателя в несколько раз, для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик. Расширение диапазона регулирования возможно за счет ослабления поля.

Характеристики транспортного средства должны удовлетворять следующим критериям [30, 31, 32]:

1. обеспечение требуемого ускорения;
2. способность к преодолению спусков и подъемов: уклон, который транспортное средство может преодолеть с определенной скоростью;
3. максимальная скорость, которую может развить транспортное средство при постоянной мощности.

Выходные характеристики, требуемые для тягового двигателя, показаны на рисунке 1.5. [33, 34].

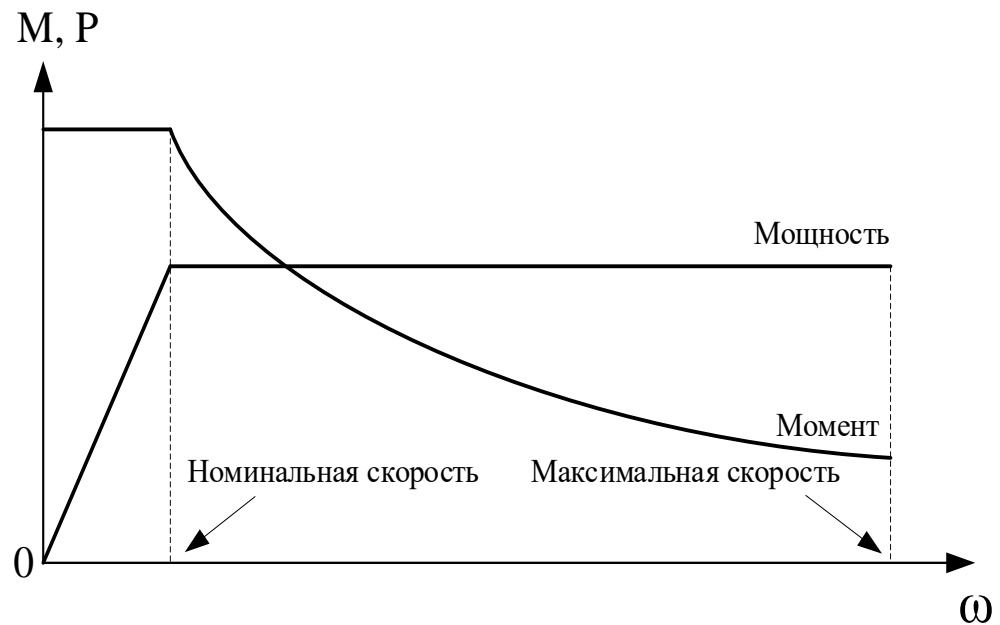


Рисунок 1.5 – Выходные характеристики тягового двигателя

Из характеристик крутящего момента и скорости можно заметить, что тяговый двигатель должен создавать высокий крутящий момент при пуске и ускорении, а также вырабатывать высокую мощность для дальнейшей работы.[35]

На рисунке 1.6 показана характеристика крутящего момента и скорости тягового двигателя.

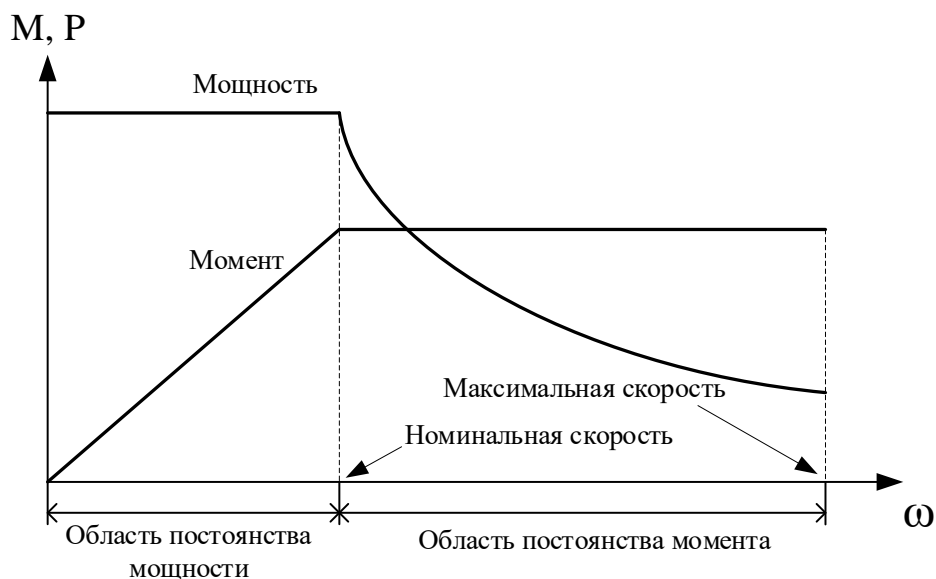


Рисунок 1.6 – Характеристика крутящего момента и скорости тягового двигателя

При нормальных условиях эксплуатации тяговый двигатель обеспечивает постоянный крутящий момент в диапазоне от нуля до номинальной частоты вращения. При номинальной частоте вращения двигатель достигает предельной номинальной мощности. Как только он достигает значения номинальной скорости, крутящий момент уменьшится пропорционально его скорости. Работа двигателя от номинальной скорости до максимальной называется областью постоянства мощности. Область постоянства мощности зависит от типа двигателя и методов его управления.

Анализ сказанного выше позволяет сделать вывод, что в составе мотор-колес могут применяться электрические двигатели, соответствующие следующим требованиям:

1. высокий крутящий момент на низких скоростях;
2. широкий диапазон регулирования скорости;
3. 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.

Электрические двигатели, которые соответствуют всем вышеперечисленным требованиям:

1. асинхронный электродвигатель [36, 37];
2. синхронный двигатель с постоянными магнитами [38, 39];
3. бесщеточный двигатель постоянного тока [40, 41];
4. вентильный реактивный электродвигатель [42].

В рамках диссертации анализ и сравнение различных типов электрических двигателей не является основной целью. Представленное исследование направлено на применение бесщеточного двигателя постоянного тока в качестве тягового электродвигателя в составе мотор-колес, что обосновывается в [43]. 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 [44].

1.2 Расчет параметров тяговой системы безрельсового транспортного средства

Для расчетных исследований в качестве базового ТС использованы параметры легкового электромобиля полной массой 921 кг. Масса транспортного средства выбрана исходя из анализа массогабаритных показателей серийно выпускаемых электромобилей. Тяговый расчет состоит из уравнений для расчета сил, препятствующих движению электромобиля, и силы тяги, преодолевающей эти сопротивления [45]. Рассмотрим уравнение движения транспортного средства при перемещении под определенным углом

к горизонту, учитывая силы, действующие на автомобиль. На рисунке 1.7 изображены силы, действующие на транспортное средство.

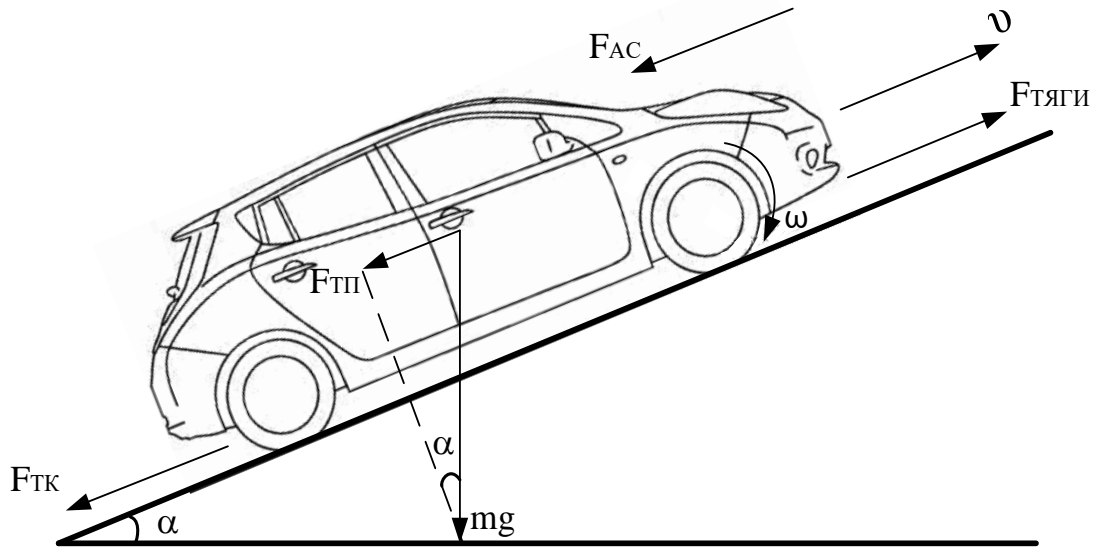


Рисунок 1.7 – Силы, действующие на транспортное средство при движении по наклонной поверхности

$$\sum F = ma, \quad (1.1)$$

$$F_{тяги} = F_{TK} + F_{AC} + F_{ТП} + m \frac{dv}{dt}, \quad (1.2)$$

где $F_{тяги}$ – сила тяги на ведущих колесах;

F_{TK} – сила трения-качения;

F_{AC} – сила аэродинамического сопротивления;

$F_{ТП}$ – проекция силы тяжести;

α - угол наклона дорожного покрытия относительно горизонта;

ω - угловая частота вращения колеса.

Расписав значение каждой из действующих сил, уравнение приобретает следующий вид:

$$F_{тяги} = \mu_{TK} mg \cos \alpha + \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 + mg \sin \alpha + m \frac{dv}{dt}, \quad (1.3)$$

где $A = 2,6 \text{ м}^2$ – фронтальная площадь машины

$C_d = 0,3$ – аэродинамический коэффициент сопротивления воздуха;

$\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха;

$r = 0,32 \text{ м}$ – радиус колеса с резиной;

$m = 921 \text{ кг}$; масса автомобиля;

$\mu_{\text{ТК}} = 0,01$ – коэффициент трения- качения.

Момент сопротивления, действующий на колесо автомобиля определяется следующим образом:

$$M_{\text{К}} = F_{\text{ТЯГИ}} r. \quad (1.4)$$

Требуемый момент на валу электродвигателя определяется согласно уравнению:

$$M_{\text{Тр}} = \frac{M_{\text{К}}}{n_{\text{дв}} \eta_{\text{МТ}} i_{\text{КП}} i_{\text{ГП}}}; \quad (1.5)$$

где $n_{\text{дв}} = 4$ – количество приводных двигателей;

$\eta_{\text{МТ}}$ – коэффициент полезного действия механической трансмиссии;

$i_{\text{КП}}$ – передаточное число коробки передач;

$i_{\text{ГП}}$ – передаточное число главной передачи.

Для варианта компоновки с мотор-колесами $\eta_{\text{МТ}}$, $i_{\text{КП}}$, $i_{\text{ГП}}$ равны единице.

Для расчета частоты вращения двигателя используется уравнение:

$$n = \frac{60v i_{\text{КП}} i_{\text{ГП}}}{2\pi r}; \quad (1.6)$$

Требуемая мощность электродвигателя определяется произведением требуемого момента и частоты вращения:

$$P_{\text{Тр}} = \frac{M_{\text{Тр}} n}{9,55}; \quad (1.7)$$

Электродвигатель выбирается из условия обеспечения требуемой мощности:

$$P_{\text{дв}} \geq P_{\text{Тр}}. \quad (1.8)$$

В таблице 1.1 приведены данные, полученные в результате тягового расчета электропривода транспортного средства, которые используются для выбора электродвигателя.

Таблица 1.1 – Данные, полученные в результате тягового расчета электропривода безрельсового транспортного средства

Параметр	Значение
Сила тяги на ведущих колесах, $F_{\text{тяги}}$	2291,1 Н
Момент сопротивления, действующего на колеса автомобиля, $M_{\text{к}}$	733,15 Н·м
Требуемый момент на валу электродвигателя, $M_{\text{тр}}$	183,15 Н·м
Частота вращения двигателя, n	827,03 об/мин
Требуемая мощность электродвигателя, $P_{\text{тр}}$	14071,1 Вт

Тяговый расчет проводится при условии, что транспортное средство демонстрирует динамику разгона от 0 до 100 км/ч за 13 секунд, соответственно ускорение транспортного средства соответствует значению 2,1 м/с². Такие динамические характеристики соответствуют усредненным показателям серийно выпускаемых электромобилей [45].

По результатам тягового расчета выбран бесколлекторный двигатель постоянного тока с водяным охлаждением GoldenMotor НРМ10-20KW, параметры которого приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристики двигателя GoldenMotor НРМ10-20KW

Характеристика	Значение
Напряжение	48 В
Номинальная мощность	20 кВт
Номинальный момент	100 Н·м
Пиковый момент	200 Н·м

Характеристика	Значение
Частота вращения	0-4500 об/мин (настраиваемая)
Корпус	Алюминиевый
Длина (высота)	170 мм
Диаметр	206 мм
Масса	17 кг
КПД	91 %
Размер шпоночного паза	6.4мм(Ш)х45мм(Д)х21.7мм(Д:25.4мм)

Выбор электродвигателя по требуемой мощности, согласно условию, (1.8) является предварительным и для окончательного выбора необходимо проверить двигатель по условию обеспечения максимального момента и проводить дальнейшие уточнения при экспериментальных исследованиях или математическом моделировании.

1.3 Основные эксплуатационные характеристики и типы аккумуляторных батарей

С годами наблюдается активный рост сфер применения аккумуляторных батарей. На то, в какой сфере применения будет пригоден элемент питания, сильно влияют технические характеристики аккумулятора. Наиболее важными характеристиками являются: емкость, номинальное напряжение батареи, глубина разряда, диапазон рабочих температур, скорость саморазряда, максимальный ток разряда/заряда, габариты и масса.

Стоит обратить внимание, что все приведенные в технической документации характеристики батарей представлены для рабочего диапазона температур от 20 до 25 °С. При повышении или понижении температуры окружающей среды, в которой эксплуатируется аккумуляторная батарея, показатели изменяются, как правило, уменьшаются.

Принято, что мерой для оценки работоспособности аккумуляторной батареи является значение ее емкости при разряде в номинальном режиме. Таким образом, процесс деградации батареи характеризуется снижением ее емкости. Данный параметр измеряется в ампер-часах и показывает какое количество электрической энергии может хранить в себе аккумуляторная батарея. Количество ампер-часов – это время, в течение которого аккумулятор работоспособен при силе тока 1 А [46]. При увеличении значений токов разряда, как правило, емкость аккумуляторной батареи уменьшается.

Значение номинального напряжения – ключевой параметр, по которому происходит выбор аккумуляторной батареи. На сегодняшний день распространено серийное производство аккумуляторных батарей со следующим значением напряжения, В: 1,2; 2,4; 6 и 12. Для получения более высокого напряжения (24, 48, 96 В и т.д.) используют последовательное соединение нескольких аккумуляторных ячеек с более низким значением напряжения.

С помощью простого измерения уровня напряжения между клеммами аккумуляторной батареи можно оценить уровень заряда и степень износа батареи.

Глубина разряда – это та величина напряжения, до уровня которой аккумулятор можно разрядить без ущерба для его дальнейшей работоспособности. Каждый производитель аккумуляторных батарей в технической документации указывает свой уровень разряда батареи, который называется рекомендованной глубиной разряда [47]. Существует ещё допустимая глубина разряда, но это уже критический параметр. Разряд ниже этого предела может привести к необратимым процессам, которые приведут к нарушению работоспособности аккумуляторной батареи.

При указании производителем основных характеристик в технической документации происходит привязка к идеальному рабочему диапазону температур, в котором будет эксплуатироваться аккумуляторная батарея. Это

связано непосредственно со скоростью прохождения химических реакций внутри аккумуляторной ячейки. Ниже температура – медленнее скорость реакций, быстрее накопитель разряжается. При нагреве – наоборот скорость разрядки снижается.

Саморазряд – явление, которое характерно для любого накопителя энергии. Данный параметр показывает степень самопроизвольной потери емкости в процессе простоя после полного заряда. Характеристика саморазряда указывается в процентном соотношении за определенный промежуток времени [48].

На уровень саморазряда оказывает влияние температура окружающей среды. При ее повышении скорость саморазряда будет увеличиваться.

Токи заряда и разряда любой аккумуляторной батареи измеряются относительно ее емкости. Обычно для аккумуляторов максимальный ток заряда не должен превышать от 0,2 до 0,3С. Превышение зарядного тока ведет к сокращению срока службы аккумуляторов [49].

В зависимости от емкости аккумуляторной батареи размеры и масса изменяются, за редким исключением могут быть изменения размера при одинаковой емкости.

Масса аккумулятора является дополнительным параметром источника питания. При выборе батареи необходимо обращать внимание на ее массу. Большее значение массы говорит о том, что пластины, взаимодействующие с кислотой, толще и батарея обеспечит больший циклический ресурс и срок службы.

1.3.1 Свинцово кислотный аккумулятор

Исторически сложилось, что свинцово-кислотный тип источника тока является первым перезаряжаемым аккумулятором. вследствие чего, именно такие аккумуляторные батареи стали первыми в применении в коммерческих целях. Современные разработки аккумуляторов с таким типом химии подверглись значительным изменениям. Изменения коснулись электролита,

который был заменен пропитанным сепаратором или гелеобразным электролитом и корпуса аккумулятора, который стал герметичным и не нуждающимся в периодическом добавлении электролита. В качестве меры предосторожности в конструкции герметичных аккумуляторов предусмотрены предохранительные клапаны, которые служат для стравливания излишек давления [50].

В сравнении с другими типами химических источников тока, свинцово-кислотные аккумуляторные батареи имеют самую низкую плотность энергии, но самую высокую емкость. В связи с этим, их применение ограничено теми областями, где требуется большая мощность, но не играют определяющей роли масса и габариты источника энергии. По большей части, это источники бесперебойного питания и биомедицинское оборудование.

Большим плюсом этого типа химического источника тока является очень маленький саморазряд. Также, стоит отметить еще одно достоинство – отсутствие эффекта памяти, это означает, что тренировочных циклов производить не требуется.

Недостатками этого типа химического источника тока являются нагрузочные характеристики. Свинцово-кислотные аккумуляторы не переносят больших токов нагрузки и глубокого разряда. При эксплуатации в экстремальных режимах, быстро наступает деградация батареи, которая выражается в снижении производительности и дальнейшей потере емкости, что приводит к необходимости замены источника тока.

Также, на срок службы свинцово-кислотных аккумуляторов сильно влияет диапазон рабочих температур. Оптимальным является эксплуатация аккумулятора при температуре воздуха 25 °С, каждые дополнительные 8 °С окружающей среды сокращают срок службы аккумулятора вдвое.

В обслуживании свинцово-кислотные аккумуляторы требуют соблюдения режимов заряда и правильного хранения. Быстрый заряд для этого типа химии не является желательным. Заряжать необходимо малым током в

течение 8-16 часов. Хранить свинцово-кислотные аккумуляторы необходимо в заряженном состоянии.

1.3.2 Никель-кадмиевые аккумуляторные батареи

Наряду со свинцово-кислотными, технология разработки никель-кадмиевых аккумуляторов являются одной их старейших из ныне используемых. Это является их достоинством, так как технология их производства хорошо изучена и отработана.

Для никель-кадмиевых аккумуляторов быстрый заряд предпочтительнее медленного. Кроме того, лучше применять не заряд постоянным током, а импульсный.

Достоинствами никель-кадмиевых аккумуляторов, в сравнении с другими типами химии, являются способность отлично выдерживать большие токи и переносимость работы в экстремальных температурных диапазонах.

Постоянная подзарядка не полностью разряженных никель-кадмиевых аккумуляторов негативно сказывается на их работоспособности. Такому типу химического источника тока необходим периодический полный разряд, так как он предотвращает появление крупных кристаллических образований на электродах ячеек аккумулятора. Процесс формирования этих образований называется эффектом памяти [51].

Область применения никель-кадмиевых аккумуляторов достаточно широка: портативные радиостанции, медицинское, радиоэлектронное оборудование, профессиональные видеокамеры, электроинструменты. Никель-кадмиевые аккумуляторы составляют около 50% от всего количества аккумуляторов для портативной техники. Однако, развитие новых типов аккумуляторных батарей с более высокой плотностью энергии, отсутствием эффекта памяти и использованием более экологически чистых технологий постепенно снижают использование этого типа аккумуляторов в сравнении с новыми типами.

1.3.3 Никель-металлогидридные аккумуляторные батареи

Производство никель-металлогидридных аккумуляторов началось в середине двадцатого века. Разрабатывались они с учетом недостатков устаревших никель-кадмиевых батарей, которые были выявлены за долгие годы эксплуатации. В никель-металлогидридных аккумуляторах могут использоваться разные комбинации металлов.

Разработанные в качестве замены никель-кадмиевым аккумуляторам, никель-металлогидридные имеют два существенных преимущества: высокая плотность энергии и экологическая безопасность. Современные никель-металлогидридные аккумуляторы имеют на 40% большую плотность энергии, по сравнению с никель-кадмиевыми. Это позволяет производить аккумуляторы более высокой емкости в тех же габаритах, что значительно расширяет сферу применения этого типа источника тока.

Несмотря на те достоинства, которые появились у данного типа аккумуляторных батарей в сравнении с никель-кадмиевыми, от недостатка в полной мере избавиться не получилось. Из-за «эффекта памяти» данные устройства иногда теряют некоторые характеристики и большую часть емкости, что приводит к деградации аккумулятора. Это происходит при многократных циклах неполной разрядки и последующей зарядки. В результате такой работы устройство «запоминает» меньшую границу разрядки, по этой причине понижается его емкость.

Никель-металлогидридные аккумуляторные батареи широко используются для питания разного вида электроники, которая функционирует в автономном режиме.

1.3.4 Литий-ионные аккумуляторные батареи

В зависимости от используемых материалов при производстве литиевых аккумуляторных батарей и реализуемых технологий, их можно разделить на несколько типов.

Большим преимуществом литий-ионных аккумуляторов перед другими типами аккумуляторных батарей является высокая плотность энергии, что позволяет объекту работать дольше в автономном режиме при скромном размере источника тока [52]. Также, стоит отметить, что литий-ионные аккумуляторные батареи обладают низкой скоростью саморазряда, которая едва заметна. К тому же, они способны выдерживать большое количество циклов разряд-заряд, не теряя свою емкость, что позволяет их использовать на долгосрочной основе.

Важная особенность литий-ионных источников питания – малое время заряда, которое может достигать в ряде случаев от 2-х до 3-х часов.

Рекомендуется не допускать полного заряда литий-ионной аккумуляторной батареи потому, что высокое напряжение приводит к разбалансированию батареи. Необходимо правильно выбрать нижний порог напряжения, чтобы продлить срок службы батареи и получить оптимальное время автономной работы объекта, который получает питание от аккумулятора.

Также на жизненный цикл аккумуляторов влияет глубина его разряда перед очередной зарядкой и зарядка токами выше указанных производителем в технической документации. Аккумулятор обладает низким внутренним сопротивлением, вследствие чего, зарядный ток сильно зависит от напряжения между его клеммами во время зарядки. Увеличение напряжения зарядки на 4% может привести к увеличению тока зарядки в 10 раз, что отрицательно сказывается на аккумуляторе, при недостаточном отводе тепла он перегревается и деградирует, что приводит к потере емкости [53].

Высокая плотность энергии, отсутствие саморазряда и высокая скорость зарядки позволяют использовать литий-ионные аккумуляторы в большинстве мобильных устройств, электроинструментов и электромобилях.

1.3.5 Суперконденсаторы

Основным видом устройств для хранения электрической энергии сейчас являются химические источники тока – аккумуляторные батареи. Однако стоит обратить внимание на еще один вид накопителей энергии – суперконденсаторы или ионисторы. Суперконденсаторы не являются химическим источником тока, в отличие от аккумуляторов, они ничего не вырабатывают, а запасают и отдают заряд в готовом виде.

В сравнении с аккумуляторами, у суперконденсаторов имеется ряд преимуществ. В первую очередь, это скорость зарядки. Суперконденсатор может заряжаться очень быстро. Зачастую на практике скорость процесса заряда ограничена возможностями зарядного устройства и кабелей, которые подают ток [54].

Второе преимущество заключается в долговечности. Суперконденсатор способен выдержать и 10, и 100 тысяч, и даже миллион циклов без последствий для дальнейшей работы. Стоит отметить, что характеристики суперконденсаторов слабо зависят от рабочего температурного диапазона. Они не очень токсичны, большинство используемых в конструкции веществ химически не так активны, например, как литий, а потому безопасны и более просты в утилизации.

Главный минус суперконденсаторов – удельная емкость. Она пока намного ниже, чем у аккумуляторов. При схожих значениях ёмкости, масса суперконденсатора может превосходить массу аккумуляторной батареи в 25 раз, что сильно ограничивает сферу их применения.

Вторым существенным минусом является цена. Удельная стоимость суперконденсатора превышает удельную стоимость аккумуляторных батарей, примерно, в 10 раз. Таким образом, если использовать суперконденсатор в современных электромобилях, то накопитель энергии будет стоить в 10 раз дороже и при этом в 25 раз тяжелее [55].

1.3.6 Сравнительный анализ источников тока

Выбор основных характеристик аккумуляторной батареи влияет на качество и срок службы источника тока в целом. В таблице 1.3 показаны основные характеристики, на которые необходимо ориентироваться при выборе наиболее предпочтительного типа аккумуляторных батарей.

Таблица 1.3 – Количественное сравнение источников тока

Параметр/тип источника тока	Свинцово-кислотные	Никель-кадмиевые	Никель-металл-гидридные	Литий-ионные	Суперконденсатор
Номинальное напряжение, В	2	1,2	1,2	3,7	2,7
Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	30-40	40-60	30-80	90-140	5
Удельная мощность, Вт/кг	180	150	250-1000	1800	10000
Среднее время заряда, час	> 10	8	6	2	0,006
Количество циклов заряда/разряда, шт	500-800	2000	800	2000	1000000
Средний саморазряд за месяц, %	4	20	30	7	15

Для определения наиболее предпочтительного типа тягового источника тока электромобиля были выбраны следующие характеристики:

- компактность – сравнительная характеристика, определяющая массогабаритные показатели для предоставления заданных параметров;

- быстрый процесс заряда – возможность батареи заряжаться максимальными для нее токами менее чем за 2,5 часа;
- эффект памяти – процесс обратимой потери ёмкости, имеющий место в некоторых типах химических источников тока при нарушении рекомендованного режима заряда, в частности, при подзарядке не полностью разрядившегося аккумулятора;
- допустимый перезаряд – показатель, определяющий допустимое значение при заряде аккумулятора свыше 100%;
- глубина разряда (DOD) – реальный уровень напряжения, до которого аккумулятор можно разрядить без ущерба для дальнейшей работоспособности.

Распределение качественных показателей приведено в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Качественное сравнение источников тока

	Свинцово-кислотные	Никель-кадмиевые	Никель-металл-гидридные	Литий-ионные	Суперконденсатор
1	2	3	4	5	6
Компактность	-	+	+	+	-
Быстрый процесс заряда	-	+	+	+	+
Эффект памяти	-	+	+	-	-
Допустимый перезаряд	Высокий	Средний	Низкий	Очень низкий	Недопустим
Глубина разряда, %	50	50 - 80	50 - 85	80	100
Периодичность обслуживания, месяцев	3-6	1 - 2	2 - 3	-	-

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».

Единственным существенным минусом литий-ионных аккумуляторных батарей является их высокая стоимость. Хотя, в этом направлении ведутся активные исследования и работы, которые за последние годы увенчались успехом.

1.4 Определение емкости тяговой аккумуляторной батареи

Необходимая емкость аккумуляторной сборки определяется исходя из количества электроэнергии, потребляемого нагрузкой в режиме разряда. В нашем случае нагрузкой является бесщеточный бесколлекторный электродвигатель постоянного тока.

Для выполнения оценки параметров аккумуляторной батареи, необходимо проанализировать серийно выпускаемые модели электрических транспортных средств. Сравнение различных типов электрических транспортных средств по параметрам аккумуляторной батареи представлено в таблице 1.5.

Стоит отметить, что во всех представленных в анализе электрических транспортных средствах применяется литий-ионная аккумуляторная сборка, что подтверждает выбор типа аккумуляторной батареи, рассмотренный в пункте 1.3. Значение величины запаса хода получено в рамках цикла городских испытаний WLTC (Worldwide harmonized light vehicles test cycle) [56].

Таблица 1.5 – Сравнение различных типов электромобилей по параметрам батареи

Марка	Модель	Емкость батареи, кВтч	Масса батареи, кг	Тип батареи	Запас хода для цикла WLTC, км
Kia	Soul Electric	27	277	Li-ion	149,64
Kia	Soul EV	32,5	203	Li-ion	155
Chevrolet	Spark EV	18,4	215	Li-ion	131,94
Mercedes	B250e	35	290	Li-ion	139,98
Volkswagen	E-Golf	24,2	313	Li-ion	133,55
Nissan	Leaf	24	295	Li-ion	135,16
BMW	i3	18,8	235	Li-ion	130,33
Tesla	Model S	85	545	Li-ion	426,38
Ford	Focus Electric	23	303	Li-ion	122,28
Nissan	Leaf	24	290	Li-ion	120,67
Mitsubishi	I-MIEV	16	227	Li-ion	99,76

На рисунке 1.8, методом наименьших квадратов [57], выполнена линейная аппроксимация зависимости запаса хода транспортного средства от емкости батареи. Величина достоверности R^2 составляет 0,9859, что соответствует приемлемому уровню точности аппроксимации. Согласно выполненной аппроксимации, удельный показатель запаса хода составляет 5,1211 километров на 1 киловатт-час емкости батареи. Соответственно, задаваясь требуемым запасом хода возможна предварительная оценка емкости. Необходимо обеспечить запас хода 150 километров, что соответствует среднему значению запаса хода для проанализированных в работе электрических транспортных средств, представленных в таблице 1.5. В соответствии с [58], средний пробег автомобиля в день находится в

промежутке от 50,8 до 65,2 километров. Значение электроемкости составляет 29,3 киловатт-часа.

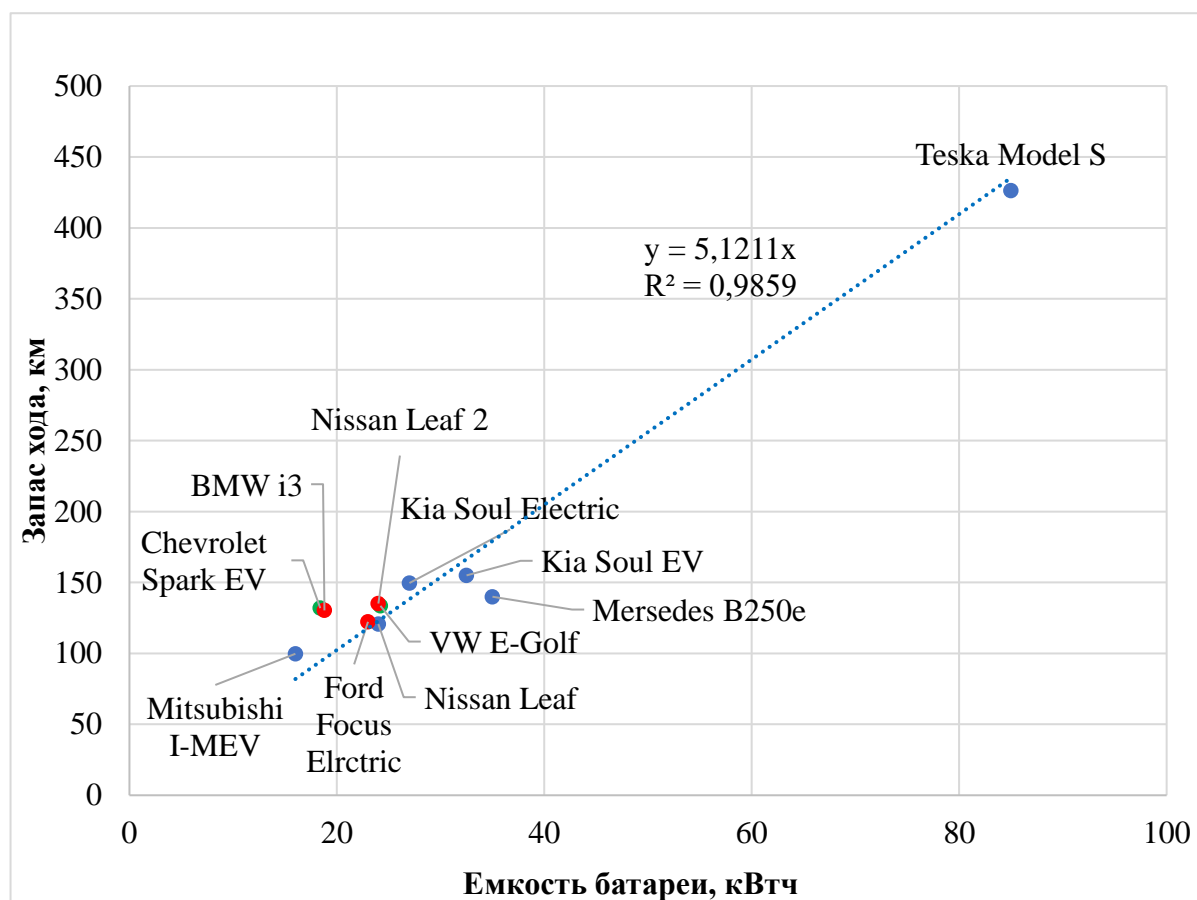


Рисунок 1.8 – Зависимость запаса хода транспортного средства от емкости батареи

На рисунке 1.9, методом наименьших квадратов, выполнена линейная аппроксимация зависимости массы батареи транспортного средства от емкости батареи. Величина достоверности R^2 составляет 0,9067, что соответствует приемлемому уровню точности аппроксимации. Согласно выполненной аппроксимации, удельный показатель массы батареи составляет 8,2633 килограмм на 1 киловатт-час емкости батареи. Соответственно, задаваясь требуемой энергоемкостью батареи транспортного средства возможна предварительная оценка массы батареи. Соответственно, масса аккумуляторной батареи для полученного значения энергоемкости составляет 242 килограмма.

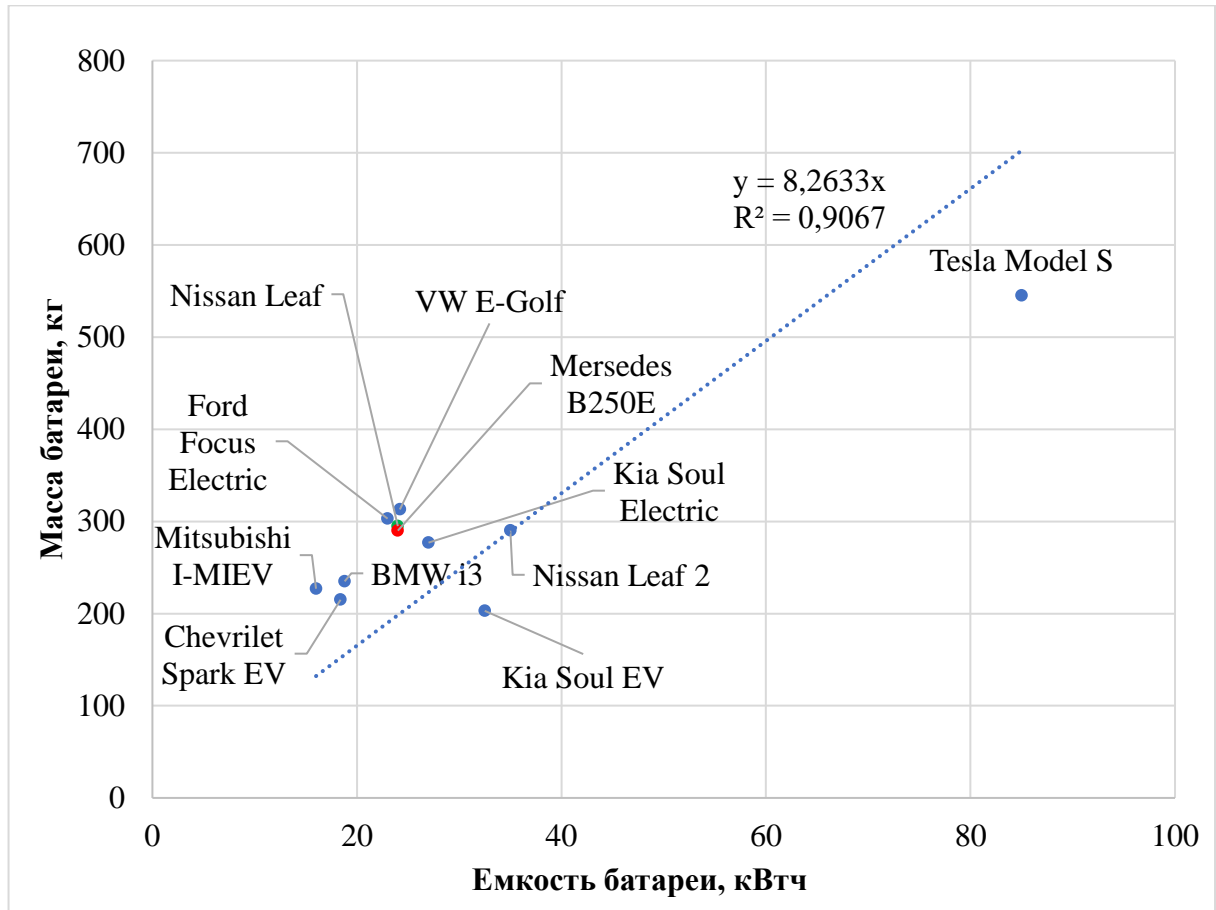


Рисунок 1.9 – Зависимость массы аккумуляторной батареи от емкости

1.5 Разработка функциональной схемы тяговой системы безрельсового транспортного средства

Сигнал задания скорости формируется в зависимости от величин сигналов, поступающих с педали газа и датчика поворота руля. Данные сигналы поступают в блок электронного дифференциала, где обрабатываются с помощью специального алгоритма на базе ПИ – регулятора. На выходе с электронного дифференциала формируются четыре сигнала задания скорости каждого мотор-колеса. Далее сигналы задания скорости попадают в систему управления. Система управления на выходе формирует сигналы управления, которые регулируют открытие и закрытие ключей силового преобразователя (инвертора). Питание силовой части электромобиля, а также цепей управления, осуществляется от аккумуляторной батареи.

Отдавая предпочтение варианту реализации тяговой системы на базе мотор-колес, необходимо заострить внимание на отсутствие зубчатой передачи между двигателем и рулем. Это, в свою очередь, влечет за собой необходимость использования электронного дифференциала.

Однако, применение электронного дифференциала оставляет целый ряд вопросов, самым важным из которых является устойчивость электромобиля. В нормальных условиях вождения все системы приводных колес требуют симметричного распределения крутящего момента с обеих сторон. Необходимо учесть, что симметричного распределения момента недостаточно, так как при изменении коэффициента сцепления шин с дорожным покрытием, колеса вращаются с разными скоростями, это приводит к необходимости применения системы контроля тяги. На сегодняшний день, оптимального решения этой проблемы нет, вопрос остается открытым и вызывает интерес в научных кругах.

Функциональная схема тяговой системы безрельсового транспортного средства на базе четырех мотор-колес представлена на рисунке 1.10.

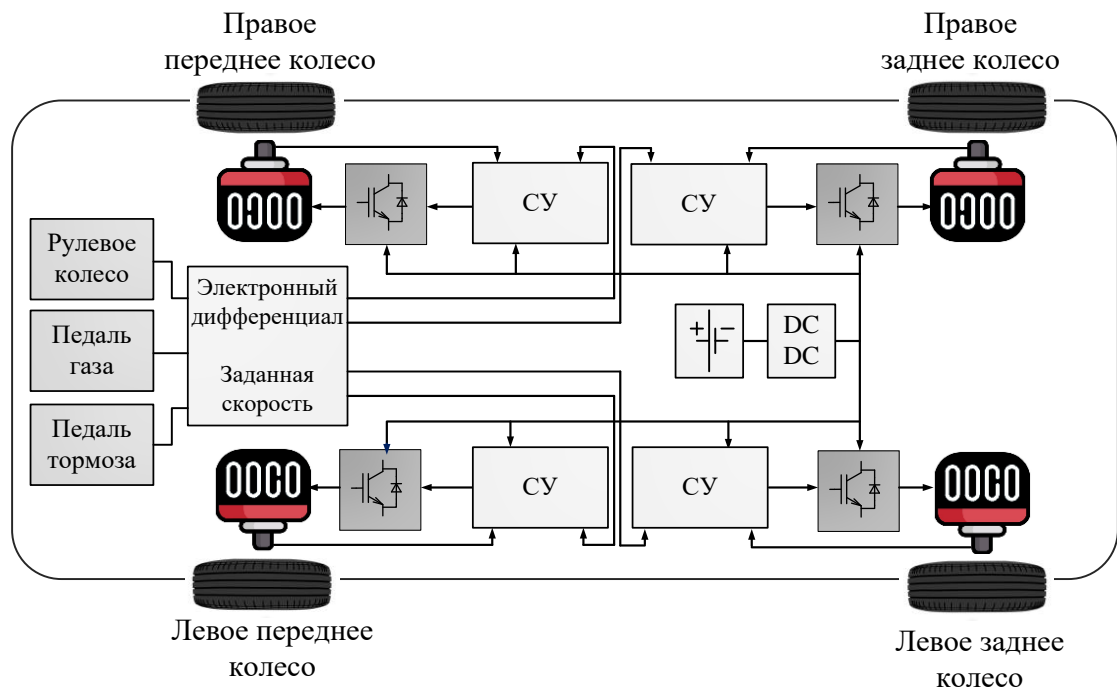


Рисунок 1.10 – Функциональная схема тяговой системы АЭТС на базе четырех мотор-колес

Выводы по главе 1

В данной главе:

1. Рассмотрены наиболее распространенные варианты компоновок тяговой системы электрических транспортных средств, 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.

2. Осуществлен выбор бесколлекторного двигателя постоянного тока, предварительно оценена мощность выбранного двигателя. 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.

3. Рассмотрены основные типы накопителей, применяемых в электрических транспортных средствах, 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».

4. Проведен анализ емкостных и массогабаритных показателей аккумуляторных батарей, представленных в серийно выпускаемых электромобилях. Определены параметры батареи, применяемой в разрабатываемой системе.

5. Разработана функциональная схема тяговой системы безрельсового транспортного средства на базе четырех мотор-колес.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛА БЕЗРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

2.1 Математическое описание электронного дифференциала

В автомобильной технике электронный дифференциал является устройством, которое обеспечивает необходимый крутящий момент для каждого ведущего колеса и допускает различные скорости вращения колес. Он используется вместо механического дифференциала в многоприводных системах. При прохождении поворотов внутреннее и внешнее колеса должны вращаться с разной скоростью, потому что внутренние колеса имеют меньший радиус поворота. Электронный дифференциал использует сигнал управления рулевым колесом и сигналы скорости двигателя для управления мощностью каждого колеса, чтобы все колеса получали необходимый крутящий момент. Дифференциал, в свою очередь, распределяет мощность, приходящуюся на ведущие колеса, таким образом, что внутреннее колесо замедляется, а внешнее ускоряется. Таким образом, получается избежать заносов и улучшить управляемость автомобиля [59]. На рисунке 2.1 представлена траектория движения колес электромобиля при повороте

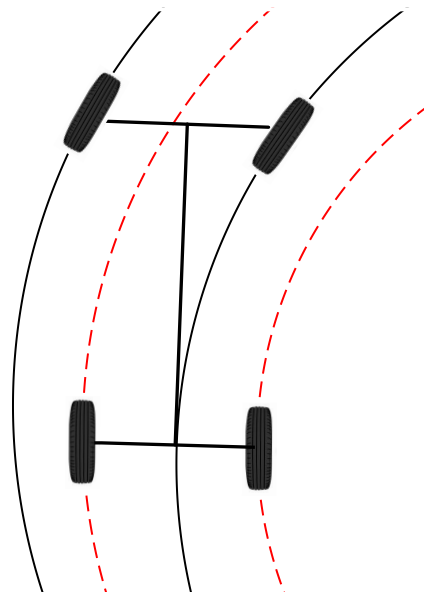


Рисунок 2.1 – Траектория движения колес электромобиля при повороте

Классическая автомобильная трансмиссия состоит из одного двигателя внутреннего сгорания, передающего крутящий момент только на одну из осей или сразу на обе оси. Наиболее распространенное решение - использование механического устройства для распределения крутящего момента на колеса. Механический дифференциал обеспечивает разную частоту вращения колес на поворотах. С появлением электромобилей возможны новые конфигурации трансмиссии. Системы с несколькими приводами упрощаются в использовании благодаря большой удельной мощности электродвигателей. Эти системы, обычно с одним двигателем на ведущее колесо, нуждаются в дополнительном контроллере верхнего уровня, который выполняет ту же задачу, что и механический дифференциал. Схема ЭД имеет ряд преимуществ перед механическим дифференциалом:

- простота - позволяет избежать дополнительных механических деталей, таких как коробка передач, редуктор или сцепление;
- улучшение массогабаритных показателей всего транспортного средства;
- независимый крутящий момент для каждого колеса обеспечивает дополнительные возможности (например, контроль тяги, контроль стабилизации);
- реконфигурируемость – возможность перепрограммировать систему управления для включения новых функций или настроить в соответствии с предпочтениями водителя;
- позволяет реализовать распределенное рекуперативное торможение;
- крутящий момент не ограничивается колесом с наименьшим сцеплением, как с механическим дифференциалом.
- более быстрое время отклика гарантирует быстрое действие системы;
- точное знание тягового момента на колесо.

Рассмотрим математическое описание электронного дифференциала для задних ведущих колес с приводом на каждое колесо [60]. Чтобы реализовать функции электронного дифференциала, необходимо составить уравнения, показывающие зависимость величины сигналов задания для двигателей левого и правого колес в зависимости от текущей скорости и радиуса дуги, по которой происходит поворот. Радиус поворота напрямую зависит от угла поворота рулевого колеса δ .

На рисунке 2.2 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.

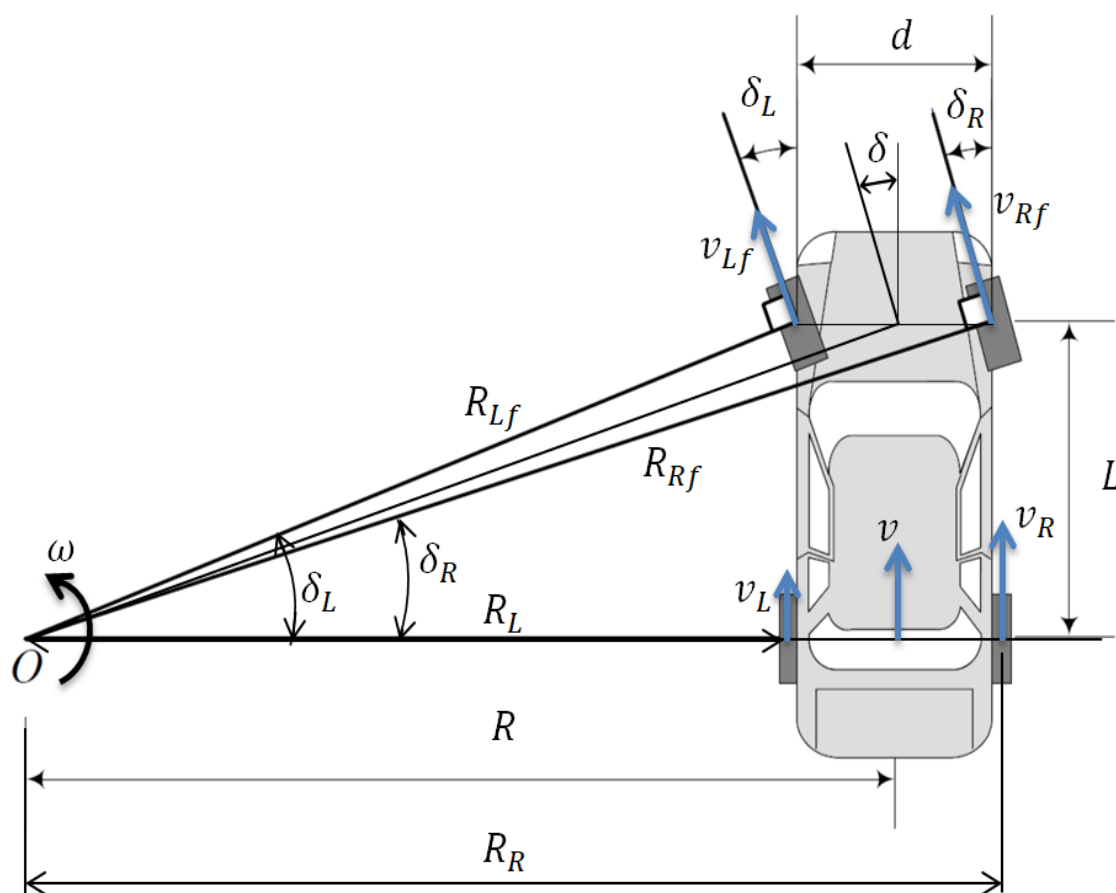


Рисунок 2.2 – Модель траектории движения

Рассчитываем радиус поворота:

$$R = \frac{L}{\operatorname{tg}\delta}. \quad (2.1)$$

Тогда радиусы поворота левого и правого колес соответственно равны:

$$R_L = R - \frac{d}{2} = \frac{L}{\operatorname{tg}\delta} - \frac{d}{2}; \quad (2.2)$$

$$R_R = R + \frac{d}{2} = \frac{L}{\operatorname{tg}\delta} + \frac{d}{2}; \quad (2.3)$$

Будем считать, что значения v и δ известны, так как эти переменные являются заданными, то есть водитель транспортного средства сам задает значение скорости с помощью педали газа, а значение угла поворота задается при помощи руля.

Находим угловую частоту вращения ω , с которой вращается электромобиль при совершении поворота:

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{v \cdot \operatorname{tg}\delta}{L}. \quad (2.4)$$

Определяем значения линейных скоростей колес v_R и v_L , пользуясь соотношениями, полученными выше:

$$v_R = \omega \cdot R_R = \frac{v \cdot \operatorname{tg}\delta}{L} \cdot \left(\frac{L}{\operatorname{tg}\delta} + \frac{d}{2} \right) = v \cdot \left(1 + \frac{d \cdot \operatorname{tg}\delta}{2L} \right); \quad (2.5)$$

$$v_L = \omega \cdot R_L = \frac{v \cdot \operatorname{tg}\delta}{L} \cdot \left(\frac{L}{\operatorname{tg}\delta} - \frac{d}{2} \right) = v \cdot \left(1 - \frac{d \cdot \operatorname{tg}\delta}{2L} \right); \quad (2.6)$$

Таким образом, соотношения (2.5) и (2.6) показывают, какими должны быть значения скоростей левого и правого колес в зависимости от угла поворота и общей скорости движения.

Очевидно, что при $\delta = 0$, то есть, когда автомобиль движется прямолинейно, $v_R = v_L = v$.

Для электронного дифференциала полноприводного автомобиля частота вращения задних колес определяется также как было показано выше, поэтому опишем алгоритм определения частоты вращения только передних колес.

Особенностью модели полноприводного электромобиля является то, что передние колеса поворачиваются на разный угол. Это необходимо для того,

чтобы центры окружностей, по которым движутся все четыре колеса, находились в одной точке. В случае, когда колеса повернуты на одинаковый угол, внутреннее колесо скользит по дорожному покрытию, что приводит к ухудшению управляемости, нежелательному нагреву и износу шин. Принцип поворота передних колес на разную величину угла, когда внутреннее колесо поворачивается на больший угол, чем наружное, называется принципом Аккермана. Принцип Аккермана определяет геометрию рулевого управления, которая применима для любых транспортных средств, с целью обеспечения корректного угла поворота рулевых колес при прохождении поворота. До того, как принцип был разработан, транспортные средства того времени были снабжены параллельными рулевыми рычагами и страдали от плохих характеристик рулевого управления. Рудольф Аккерман известен разработкой принципа использования наклонных рулевых рычагов, который устраняет проблему рулевого управления в транспортных средствах [61].

Для нахождения скоростей передних колес v_{Rf} и v_{Lf} определим сначала радиусы поворота R_{Rf} и R_{Lf} :

$$R_{Lf} = \frac{L}{\sin\delta_L}; \quad (2.7)$$

$$R_{Rf} = \frac{L}{\sin\delta_R}, \quad (2.8)$$

где δ_L и δ_R – углы поворота левого и правого колес соответственно.

Тогда, используя выражения (2.4), запишем выражения для v_{Rf} и v_{Lf} :

$$v_{Rf} = \omega \cdot R_{Rf} = \frac{v \cdot \operatorname{tg} \delta}{L} \cdot \frac{L}{\sin\delta_R} = \frac{v \cdot \operatorname{tg} \delta}{\sin\delta_R}, \quad (2.9)$$

$$v_{Lf} = \omega \cdot R_{Lf} = \frac{v \cdot \operatorname{tg} \delta}{L} \cdot \frac{L}{\sin\delta_L} = \frac{v \cdot \operatorname{tg} \delta}{\sin\delta_L}, \quad (2.10)$$

Далее определяем δ_L и δ_R , воспользовавшись следующими соотношениями [61]:

$$\operatorname{ctg} \delta_R - \operatorname{ctg} \delta_L = \frac{d}{L}, \quad (2.11)$$

$$\operatorname{ctg} \delta = \frac{\operatorname{ctg} \delta_R + \operatorname{ctg} \delta_L}{2}; \quad (2.12)$$

Отсюда:

$$\delta_R = \operatorname{arcctg} \left(\operatorname{ctg} \delta + \frac{d}{2L} \right); \quad (2.13)$$

$$\delta_L = \operatorname{arcctg} \left(\operatorname{ctg} \delta - \frac{d}{2L} \right); \quad (2.14)$$

Подставляем (2.11) и (2.12) в выражения (2.9) и (2.10):

$$v_{Rf} = \frac{v \cdot \operatorname{tg} \delta}{\sin \left(\operatorname{arcctg} \left(\operatorname{ctg} \delta + \frac{d}{2L} \right) \right)}; \quad (2.15)$$

$$v_{Lf} = \frac{v \cdot \operatorname{tg} \delta}{\sin \left(\operatorname{arcctg} \left(\operatorname{ctg} \delta - \frac{d}{2L} \right) \right)}; \quad (2.16)$$

Таким образом, получены уравнения (2.5), (2.6), (2.15) и (2.16), показывающие зависимость линейных скоростей колес в функции заданной скорости v и угла поворота руля δ .

На основе уравнений (2.5), (2.6), (2.15) и (2.16) составлена структурная схема электронного дифференциала, представленная на рисунке 2.3:

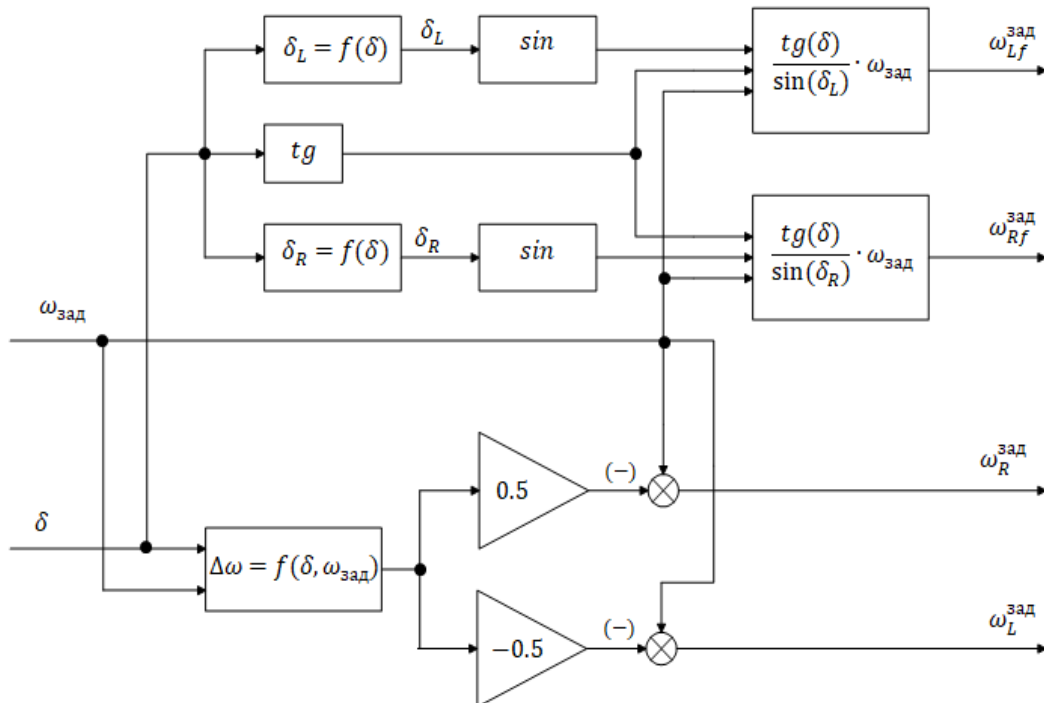


Рисунок 2.3 – Структурная схема электронного дифференциала.

2.2 Имитационное моделирование электронного дифференциала

Имитационная модель электронного дифференциала на базе четырех мотор-колес в пакете программ MATLAB/Simulink представлена на рисунке 2.4.

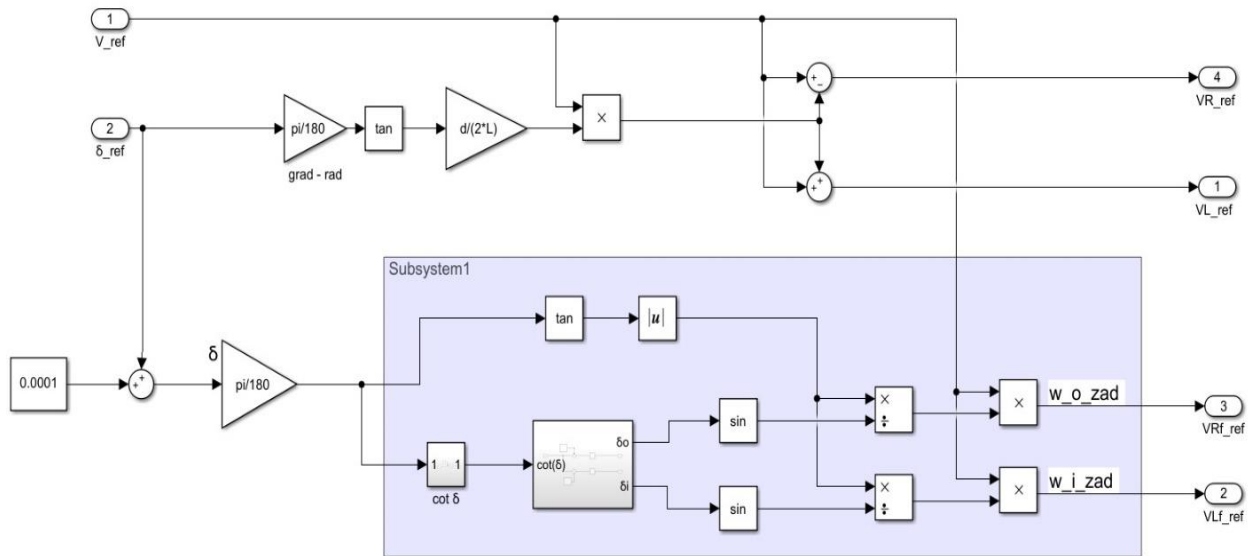


Рисунок 2.4 – Математическая модель электронного дифференциала на базе четырех мотор-колес в пакете программ MATLAB/Simulink

В качестве испытательного полигона для проверки работоспособности системы электронного дифференциала рассмотрим трассу Euroring, на которой проводятся соревнования Formula Student– это крупный ежегодный международный студенческий проект, этапы которого проходят во многих странах Европы. Целью проекта является формирование инженерного мышления у студентов высших учебных заведений и подготовка специалистов, которые сталкивались с решением реальных производственных задач. Первые соревнования прошли более двадцати лет назад и до сих пор не имеют аналогов. Движение электромобиля будет смоделировано, основываясь на результатах прохождения гоночного трека Euroring, представленного на рисунке 2.5. За основу взята динамика и траектория движения действующего рекордсмена и победителя соревнований 2017 года.

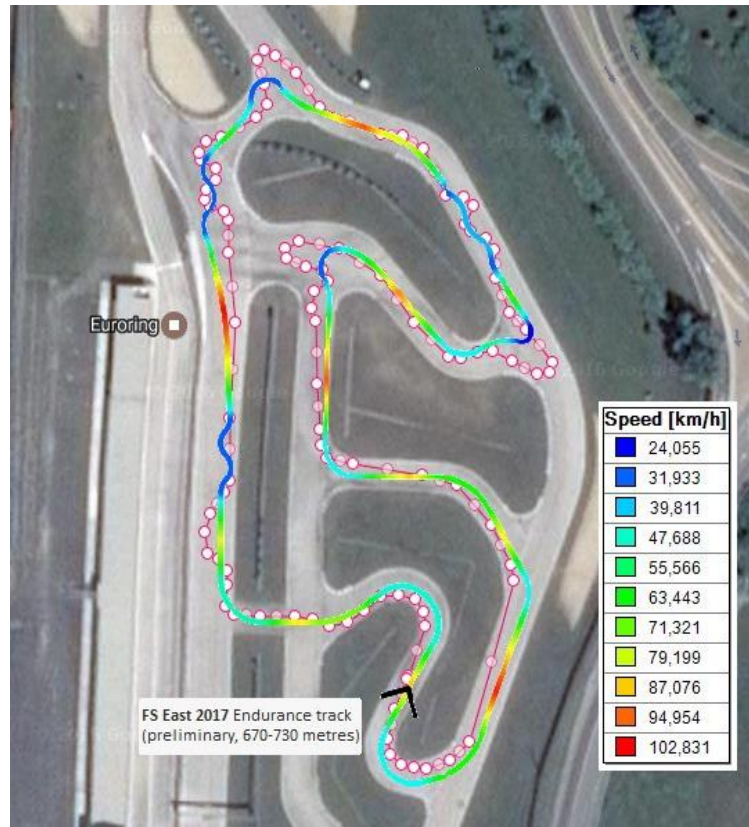


Рисунок 2.5 – Карта развиваемой скорости болида на трассе Euroring

Необходимо разбить круг на участки, где транспортное средство разгоняется, движется с постоянной скоростью и тормозит. Далее, требуется определить длину каждого выделенного участка. Зная длину каждого участка и значение скорости на нем, можно определить время, в течение которого транспортное средство двигалось по каждому участку. По результатам расчетов время прохождения одного круга трассы равно $t_{кр} = 49,1$ с.

Имитационная модель электронного дифференциала на базе четырех мотор-колес в пакете программ MATLAB/Simulink представлена на рисунке 2.6. Имитационная модель включает в себя подсистему электронного дифференциала, на выходе которой формируются задающие сигналы частоты вращения двигателей каждого колеса, величина которых зависит от поступающих на вход сигнала задания на скорость движения и сигнала угла поворота руля.

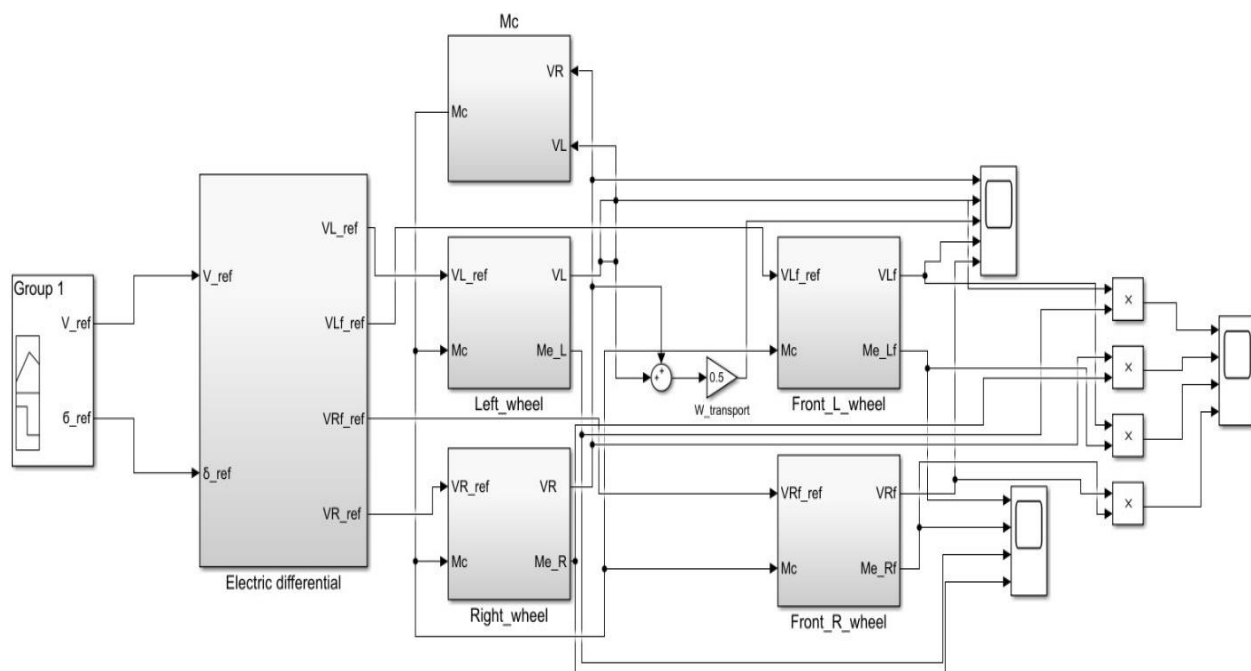


Рисунок 2.6 – Имитационная модель системы электронного дифференциала полноприводного электромобиля

Подсистема двигателя включает в себя блок системы управления двигателем, а также математическую модель самого двигателя [62]. 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 на базе ПИ – регулятора напряжения ПИ РН. Для каждого регулятора подобраны коэффициенты, обеспечивающие необходимую форму переходного процесса [63].

В качестве регулятора угловой частоты вращения и напряжения используется пропорционально-интегральный регулятор (ПИ – регулятор). Применение ПИ – регулятора обусловлено тем, что наличие интегрирующего звена в структуре регулятора гарантирует астатизм первого порядка в контуре

регулирования угловой частоты вращения, как по задающему воздействию, так и по возмущающему.

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 определения коэффициентов регуляторов записываются передаточные функции замкнутых контуров регулирования и приравниваются знаменатели этих передаточных функций к нормированным полиномам.

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 [63]. Для контура регулирования угловой частоты вращения также выбирается 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.

Вопросы применения ПИД – регулятора для контура стабилизации линейной скорости транспортного средства будут подробнее рассмотрены в третьей главе.

По данным результатов прохождения полного круга гоночного трека Euroring, построены графики сигналов задания скорости электромобиля и угол поворота колес, представленные на рисунке 2.7 и 2.8 соответственно. На рисунках 2.9 и 2.10 представлены переходные процессы по частоте вращения вала двигателей всех колес и переходные процессы по моменту на валу

двигателей всех колес соответственно. На рисунке 2.11 представлен переходный процесс по частоте вращения в увеличенном масштабе для наглядного анализа показателей качества.

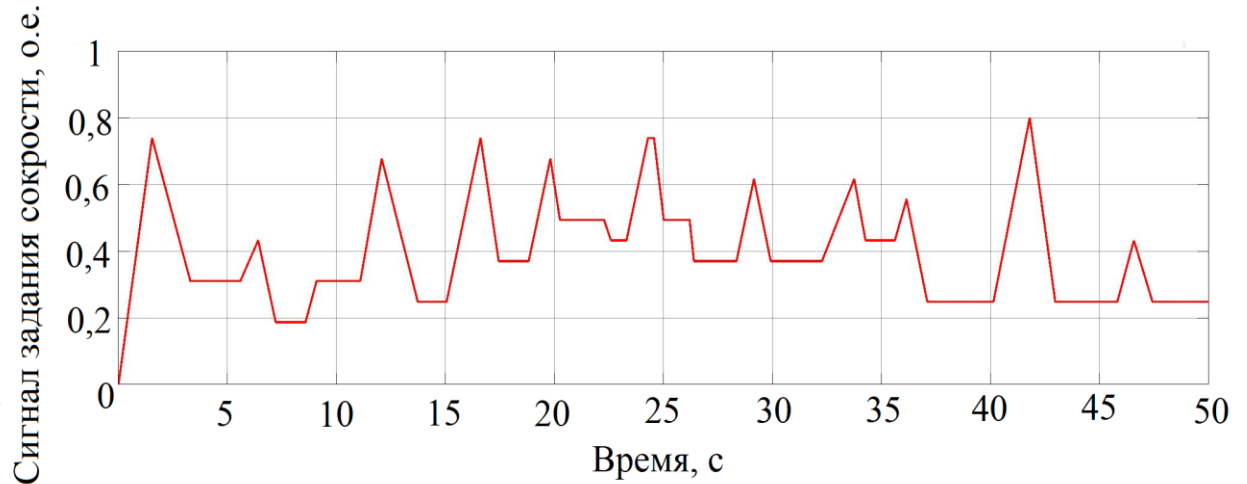


Рисунок 2.7 – Сигнал задания скорости при прохождении полного круга на трассе Euroring

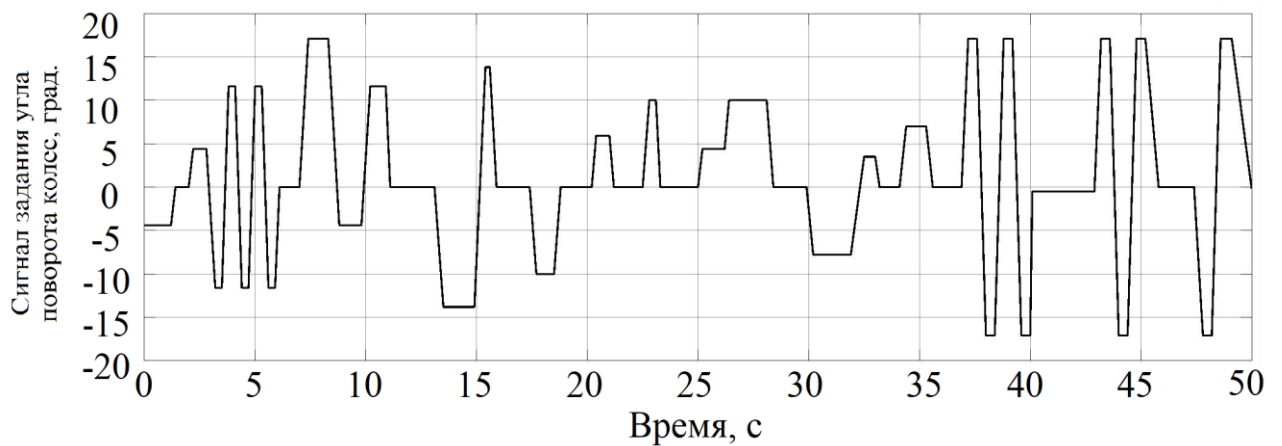


Рисунок 2.8 – Сигнал задания угла поворота колес при прохождении полного круга на трассе Euroring

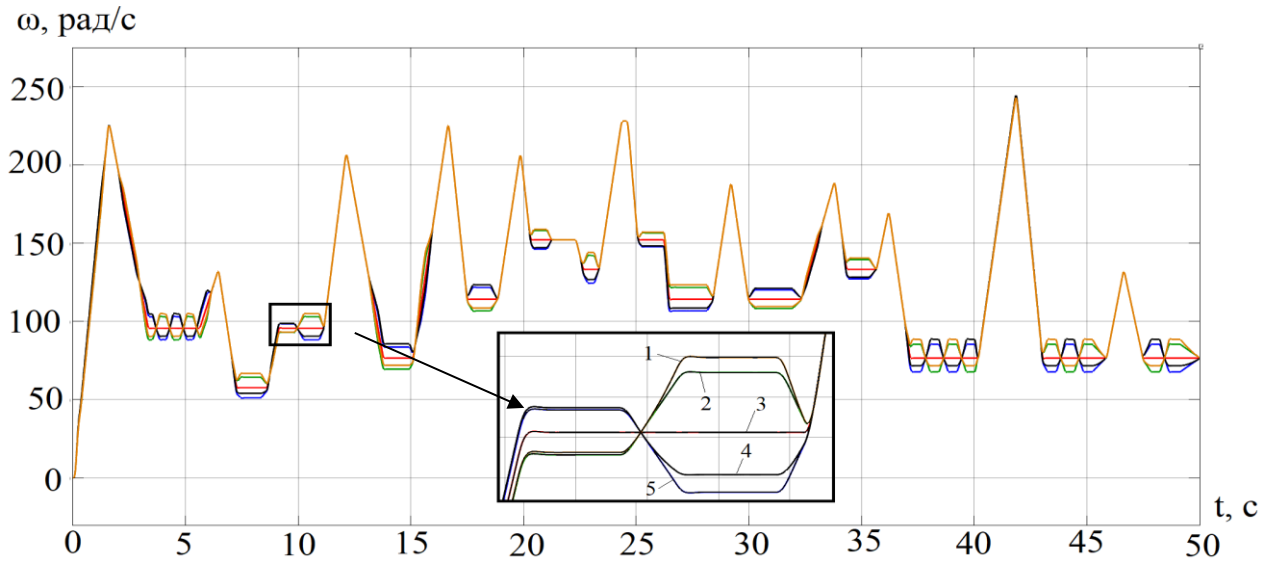


Рисунок 2.9 – Переходный процесс по частоте вращения вала двигателя (1 – левое переднее колесо; 2 – левое заднее колесо; 3 – средняя скорость автомобиля; 4 – правое заднее колесо; 5 – правое переднее колесо)

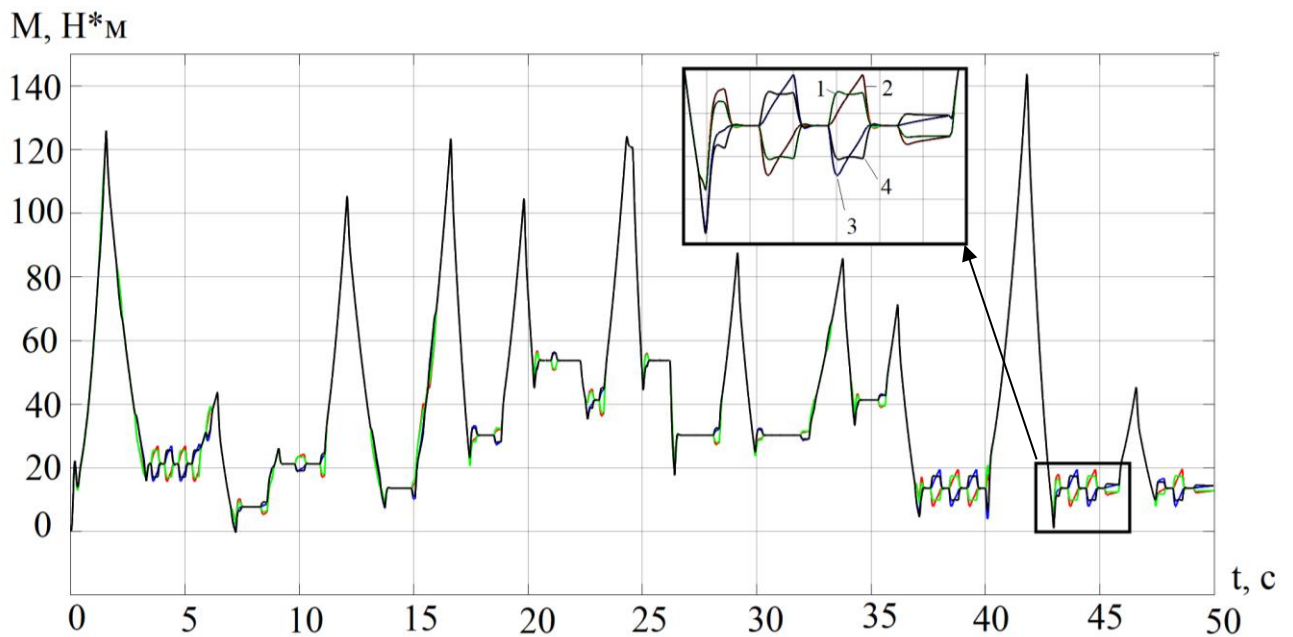


Рисунок 2.10 – Переходный процесс по моменту на валу двигателя (1 – правое заднее колесо; 2 – левое переднее колесо; 3 – левое заднее колесо; 4 – правое переднее колесо)

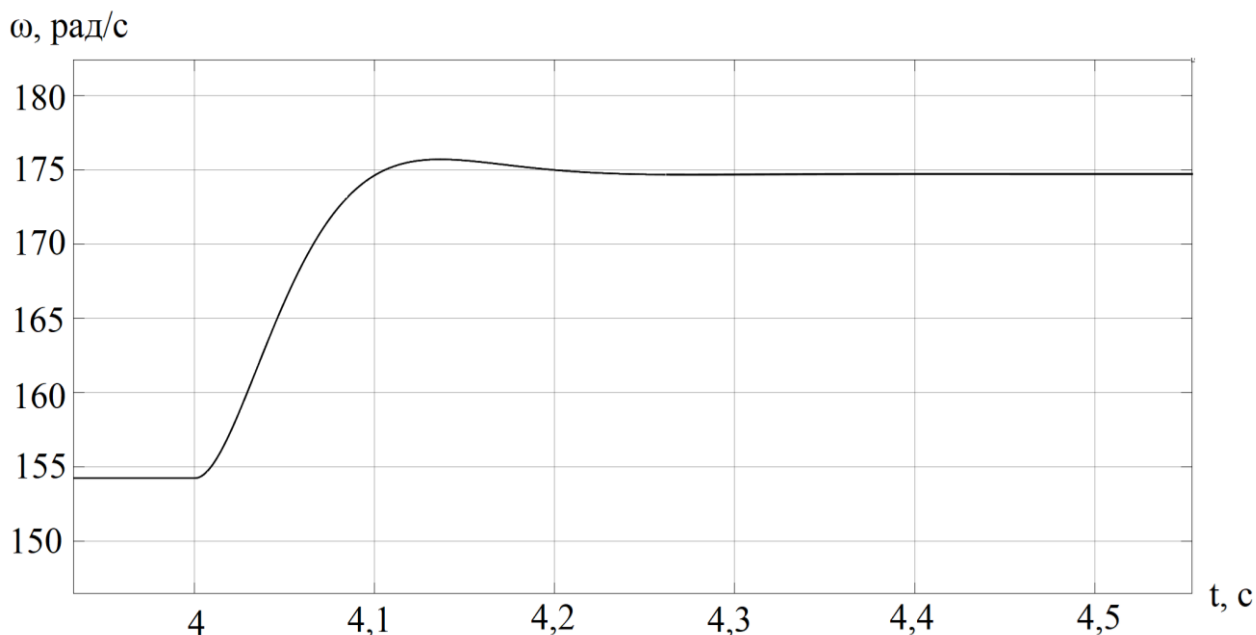


Рисунок 2.11 – Масштабированный участок переходного процесса по частоте вращения

Анализ рисунков 2.9 – 2.11 позволяет сделать вывод о работоспособности синтезированной системы, поскольку скорости вращения колес на каждом участке пути, полученные посредством моделирования, совпадают со скоростями, вычисленными по приведенным математическим уравнениям. По рисунку 2.11 можно определить показатели качества переходного процесса по частоте вращения при повороте колес на 15 градусов. Величина перерегулирования составляет 0,51%, время регулирования 0,093 с. Такие показатели качества удовлетворяют требованиям быстродействия системы.

2.3 Сравнение энергоэффективности механического и электронного дифференциалов

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, тогда как в механическом дифференциале изменение достигается за счет движения шестерней

дифференциального блока, из-за чего, вследствие трения происходит снижения коэффициента полезного действия всего привода.

Известно, что КПД дифференциала непосредственно влияет на КПД колёсной машины и, кроме того, на такие важные её качества, как проходимость и способность движения с сохранением раздельного перемещения ведущих колёс. В то же время параметрами внутреннего трения дифференциала определяется его КПД.

Если вопросы эффективности использования дифференциала и степень влияния этого механизма на проходимость в какой-то мере и изучены, то взаимосвязь КПД указанного элемента трансмиссии с его способностью обеспечивать раздельное качение ведущих колёс, в силу назначения этого механизма изучена слабо.

Для расчета КПД механического дифференциала наиболее часто используется формула, применяемая в Центральном научно-исследовательском автомобильном и автомоторном институте «НАМИ» [64]:

$$\eta = 1 - \frac{B}{2R} \cdot K_{\delta}, \quad (2.17)$$

где B – ширина колесной базы; R – радиус поворота центра ведущей оси автомобиля; K_{δ} – коэффициент блокировки дифференциала, оптимальным считается значение 0,3...0,5.

Чем больше поворот колес транспортного средства – тем меньше радиус поворота центра его ведущей оси. Поскольку радиус находится в знаменателе, при уменьшении радиуса увеличивается значение всего вычитаемого в целом, что приводит и к снижению КПД. Имитационная модель в программном пакете MATLAB/Simulink для оценки КПД механического дифференциала представлена на рисунке 2.12.

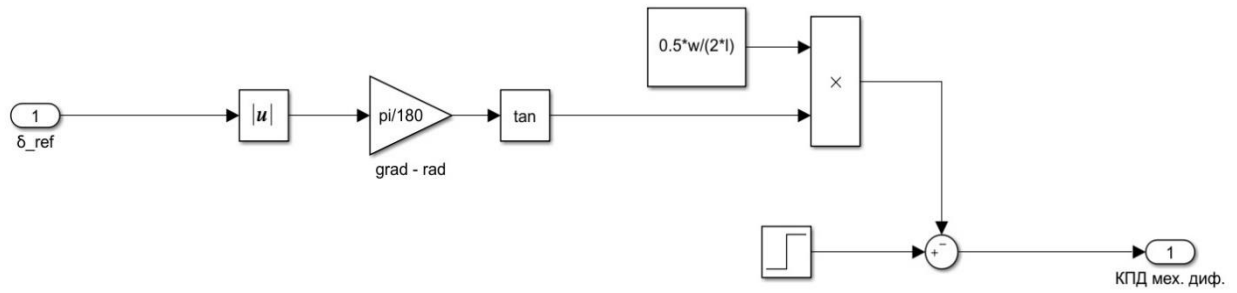


Рисунок 2.12 – Структурная схема вычисления КПД механического дифференциала

Для оценки эффективности применения механического дифференциала было проведено цифровое моделирование электроприводов электромобилей, оснащенных электронным и механическим дифференциалами. Для имитационного моделирования также используется трасса Euroring, представленная на рисунке 2.5.

Сравнение проводилось на основании анализа графика энергий, затраченных двигателями при использовании механического и электронного дифференциала, а также КПД приводов при совершении маневров. Соответствующие переходные процессы представлены на рисунках 2.13 и 2.14.

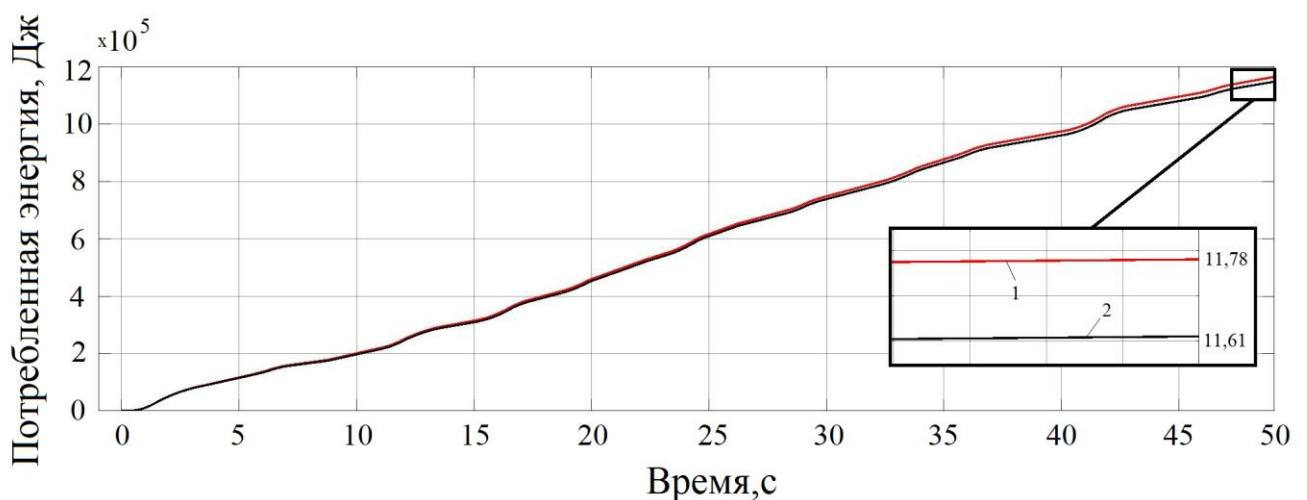


Рисунок 2.13 – Графики энергий, затраченных двигателями при использовании механического (1) и электронного дифференциала (2)

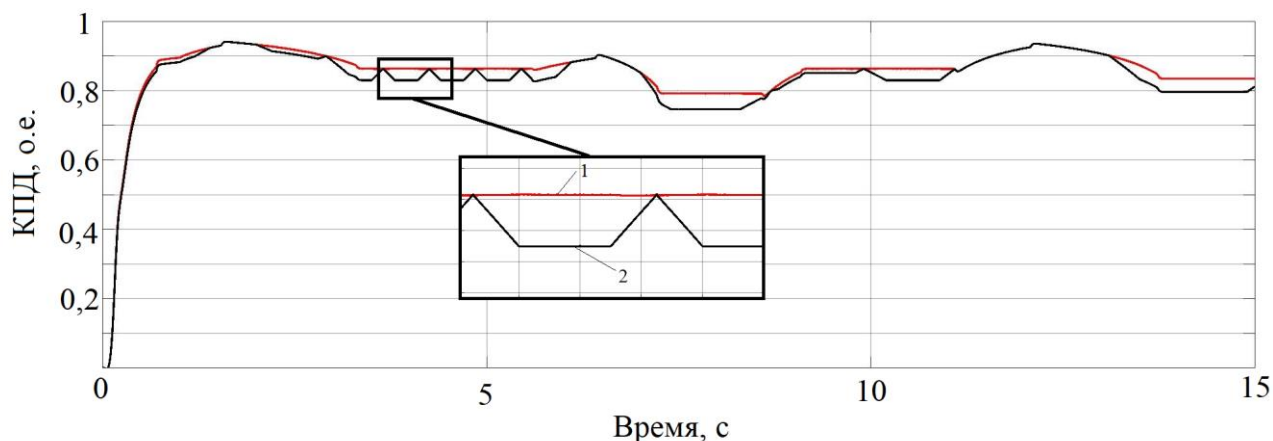


Рисунок 2.14 – Графики изменения КПД приводов при использовании механического (1) и электронного дифференциала (2)

Анализ переходных процессов, представленных на рисунках 2.13 и 2.14, позволяет определить величину экономии энергии, затраченной двигателями для системы с электронным дифференциалом по сравнению с системой, оснащенной механическим дифференциалом. Экономия энергии от применения электронного дифференциала составила 1,46 % после прохождения трассы EuroRing. Стоит отметить, что коэффициент полезного действия механического дифференциала обратно пропорционален углу поворота колес транспортного средства. При максимальных значениях угла поворота колес транспортного средства мгновенная разница в КПД между электронным и механическим дифференциалами достигает значения в 5,1%, что также свидетельствует об эффективности применения электронного дифференциала.

Выводы по главе 2

В данной главе:

1. Разработана система электронного дифференциала, для варианта компоновки с четырьмя мотор колесами на базе бесколлекторных двигателей постоянного тока, основой алгоритма работы которого является принцип Аккермана.

2. Рассмотрено математическое описание дифференциала, составлена модель в программном пакете MATLAB/Simulink. Анализ результатов имитационного моделирования доказывает корректность системы.

3. Проведен сравнительный анализ эффективности систем с электронным и механическим дифференциалом. Имитационное моделирование прохождения испытательного полигона Euroring демонстрирует, что экономия энергии от применения электронного дифференциала составила 1,46 % по сравнению с механическим дифференциалом, мгновенная разница в значениях КПД достигала величины 5,1 %.

ГЛАВА 3 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

3.1 Система стабилизации линейной скорости транспортного средства на базе ПИД – регулятора

Контур регулирования линейной скорости транспортного средства – это внешний контур, который обеспечивает плавное изменение скорости, отсутствие статической ошибки регулирования и помехоустойчивость. Для решения поставленных задач возможен синтез ПИ или ПИД регулятора. Если регулирование скорости осуществляется при помощи ПИ-регулятора, уравнение регулятора имеет следующий вид:

$$U(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt; \quad (3.1)$$

$$e(t) = x_0(t) - y(t), \quad (3.2)$$

где $e(t)$ – сигнал ошибки регулирования; x_0 – задающее воздействие; $y(t)$ – выходной сигнал объекта управления; $U(t)$ – выходной сигнал регулятора, который является управляющим воздействием; K_P , K_I – коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих соответственно.

Если же регулирование скорости осуществляется при помощи ПИД-регулятора, то уравнение будет иметь вид:

$$U(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t), \quad (3.3)$$

где K_D – коэффициент дифференциальной составляющей.

Анализ литературы [65, 66, 67] показал, что одним из распространенных методов стабилизации линейной скорости транспортного средства – это система стабилизации скорости с ПИД регулятором, основанным на эмпирическом подходе, при котором закон управления выбирается при любых логических структурах и строгом математическом описании. [68, 69].

Каждая составляющая часть регулятора (пропорциональная, интегральная и дифференциальная) выполняет свою задачу, оказывая свое специфическое влияние на функционирование системы:

- пропорциональная составляющая отвечает за настоящее время, реагируя на текущую ошибку регулирования;
- дифференциальная составляющая определяет будущее, реагируя на тенденцию изменения ошибки;
- интегральная составляющая ответственна за прошлое, накапливая предыдущие ошибки и сглаживая высокочастотные шумы.

Выходы этих элементов складываются между собой и формируют управляющий сигнал на входе системы. ПИД-регуляторы эффективны в управлении различными объектами и процессами, в том числе и система стабилизации скорости транспортных систем. На рисунке 3.1 представлена система стабилизации скорости электрического безрельсового транспортного средства на базе бесколлекторного двигателя постоянного тока BLDC в составе мотор – колеса, с питанием от автономного инвертора напряжения АИН.

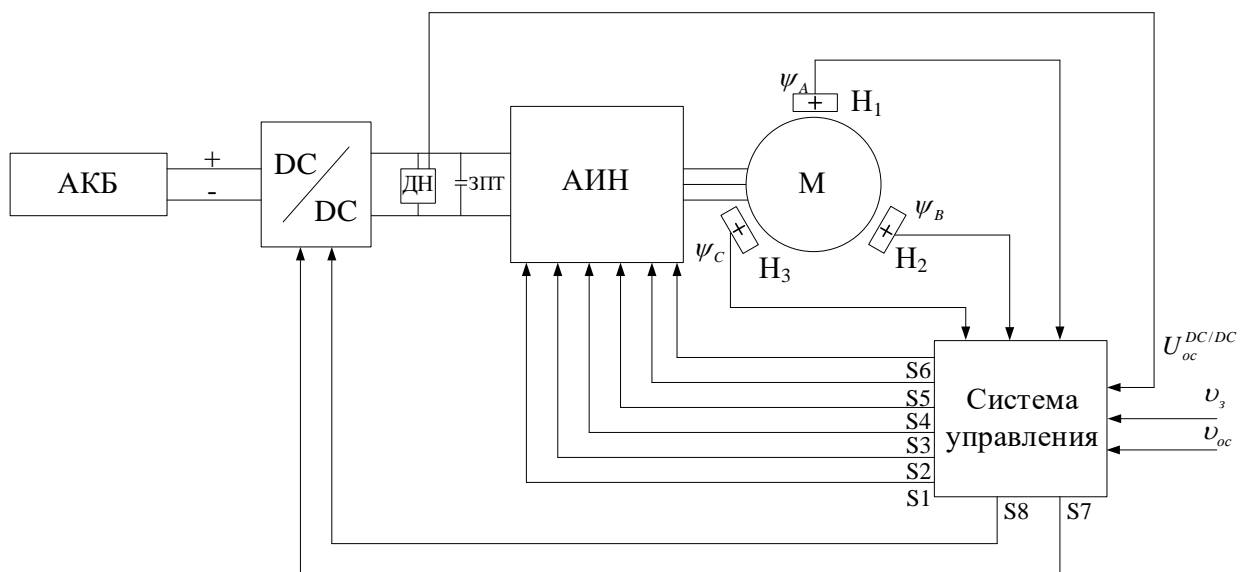


Рисунок 3.1 – Функциональная схема системы стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства

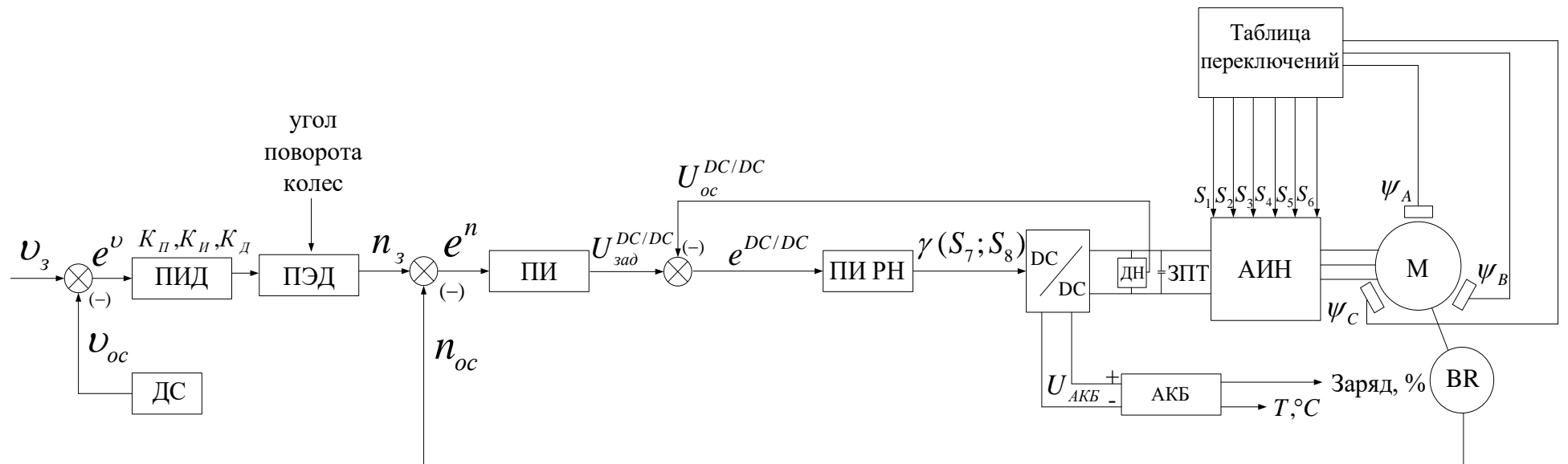


Рисунок 3.2 – Функциональная схема алгоритма стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства с применением ПИД регулятор

На рисунке 3.2 представлена 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 ЗПТ 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 понимается сигнал с выхода подсистемы электронного дифференциала ПЭД, а сигнал обратной связи – это сигнал с датчика угловой частоты вращения - ВР. Подсистема электронного дифференциала корректирует сигнал задания, поступающий с ПИД – регулятора, в зависимости от угла поворота колес. Блок преобразования скорости транспортного средства представляет собой систему математических уравнений, описывающих преобразование скорости движения контрольной точки в угловую скорость движения каждого колеса. В этом блоке может быть заложено преобразование для любой конфигурации колёсной базы: одноколёсной, дифференциальной, автомобильной с расчётом электрического дифференциала и так далее. Полученные сигналы с данными о желаемой скорости вращения колёс подаются на систему управления электроприводов этих колёс, где осуществляется управление электрическими машинами, установленными в транспортном средства [70]. 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 BLDC, при этом формируются коммутационные функции $S_1 - S_6$ на соответствующие ключи АИН. Угловое положение ротора BLDC 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 .

Рассмотрим подробнее принцип работы BLDC мотора и способы управления на примере двухполюсного варианта реализации.

На рисунке 3.3 представлена схема поперечного разреза BLDC двигателя с одной парой полюсов.

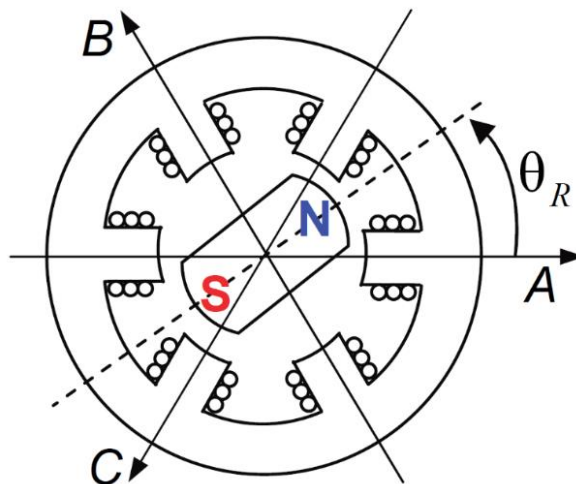


Рисунок 3.3 – Схема поперечного разреза бесколлекторного двигателя постоянного тока с одной парой полюсов

На статоре бесколлекторного двигателя постоянного тока располагается трехфазная обмотка, оси которых сдвинуты в пространстве относительно друг друга на 120 электрических градусов. Каждая из этих осей состоит из двух

секций, которые включены встречно. Такая реализация позволяет создать положительный и отрицательный полюсы внутри двигателя при протекании электрического тока, к этим полюсам в свою очередь, притягивается магнитный ротор. Поочередное изменение токов, протекающих в обмотках, осуществляет переключение полюса обмоток, благодаря чему возникает крутящий момент, при вращении ротора вслед за полем. Нулевым положением ротора θ_R считается такое положение, при котором вектор потока ротора и ось фазы А сонаправлены.

Уравнения равновесия обмоток статора бесколлекторного двигателя постоянного тока в системе координат ABC:

$$\begin{cases} U_A = \frac{d\psi_A}{dt} + I_A R_\phi \\ U_B = \frac{d\psi_B}{dt} + I_B R_\phi, \\ U_C = \frac{d\psi_C}{dt} + I_C R_\phi \end{cases} \quad (3.4)$$

где:

U_A, U_B, U_C – значения фазных напряжений;

ψ_A, ψ_B, ψ_C – значения потокосцеплений фазных обмоток;

I_A, I_B, I_C – значения токов в фазах.

R_ϕ – активное сопротивление фазной обмотки.

На формирование величины потока в обмотке каждой фазы оказывают влияние следующие составляющие:

- поток, формируемый собственным током фазы;
- поток, формируемый магнитными полями других фазных обмоток;
- поток, формируемый в обмотке магнитами ротора.

$$\begin{cases} \psi_A = L_A I_A + L_{AB} I_B + L_{AC} I_C + \psi_{fA} \\ \psi_B = L_B I_B + L_{AB} I_A + L_{BC} I_C + \psi_{fB}, \\ \psi_C = L_C I_C + L_{AC} I_A + L_{BC} I_B + \psi_{fC} \end{cases} \quad (3.5)$$

где:

L_A, L_B, L_C – значение индуктивности фазных обмоток;

L_{AB}, L_{BC}, L_{AC} – значение взаимных индуктивностей обмоток;

$\psi_{fA}, \psi_{fB}, \psi_{fC}$ – значения потокосцеплений, наводимых в обмотках магнитом ротора.

В общем случае, индуктивности $L_A, L_B, L_C, L_{AB}, L_{BC}, L_{AC}$ могут являться переменными функциями угла поворота поля θ_e . В частном же случае, для неявнополюсного двигателя, для случая с цилиндрическим ротором, индуктивности и взаимные индуктивности $L_A, L_B, L_C, L_{AB}, L_{BC}, L_{AC}$ не зависят от угла поворота поля θ_e .

Введем обозначение L_Φ – индуктивность фазной обмотки и $L_{\Phi\Phi}$ – взаимная индуктивность фазных обмоток. Далее, подставим систему уравнений (3.5) в систему уравнений (3.4) и получим следующее выражение:

$$\begin{cases} U_A = L_\Phi \frac{dI_A}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_B}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_C}{dt} + \frac{d\psi_{fA}}{dt} + I_A R_\Phi \\ U_B = L_\Phi \frac{dI_B}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_A}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_C}{dt} + \frac{d\psi_{fB}}{dt} + I_B R_\Phi, \\ U_C = L_\Phi \frac{dI_C}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_A}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_B}{dt} + \frac{d\psi_{fC}}{dt} + I_C R_\Phi \end{cases} \quad (3.6)$$

Стоит отметить, что производные потокосцеплений магнитов ротора от времени – это ЭДС, наводимая в обмотках магнитами ротора. Таким образом, система (3.6) приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} U_A = L_\Phi \frac{dI_A}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_B}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_C}{dt} + E_A + I_A R_\Phi \\ U_B = L_\Phi \frac{dI_B}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_A}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_C}{dt} + E_B + I_B R_\Phi. \\ U_C = L_\Phi \frac{dI_C}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_A}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_B}{dt} + E_C + I_C R_\Phi \end{cases} \quad (3.7)$$

Единичной функцией формы ЭДС является функция от угла поля θ_e , которая имеет единичную амплитуду и повторяет по форме ЭДС. Для фаз А, В, С единичная функция формы ЭДС приобретает вид E_{1A}, E_{1B}, E_{1C} . В таком случае, мгновенные значения ЭДС в фазах можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} E_A = \psi_f \omega_e E_{1A} = \psi_f Z_p \omega_R E_{1A} \\ E_B = \psi_f \omega_e E_{1B} = \psi_f Z_p \omega_R E_{1B}, \\ E_C = \psi_f \omega_e E_{1C} = \psi_f Z_p \omega_R E_{1C} \end{cases} \quad (3.8)$$

где:

ψ_f – амплитуда потокосцепления ротора и фазной обмотки;

ω_e – скорость вращения поля;

ω_R – скорость вращения ротора;

Z_p – число пар полюсов двигателя.

На рисунке 3.4 представлены зависимости единичных функций формы ЭДС обмоток бесколлекторного двигателя постоянного тока от угла поворота поля.

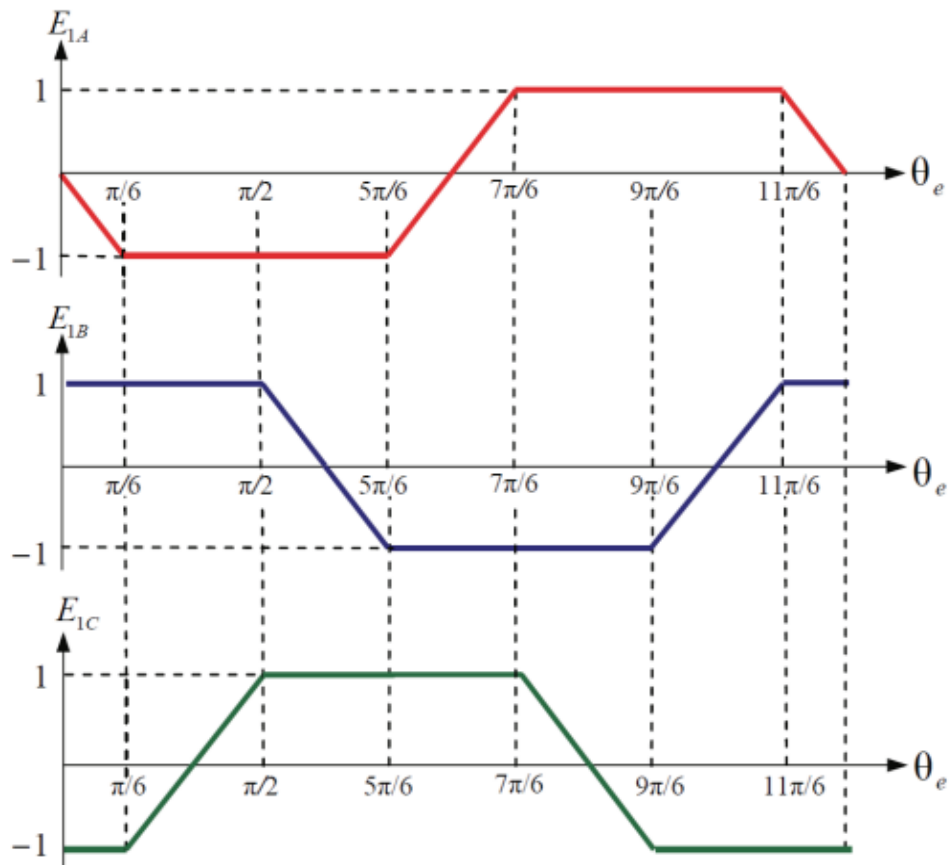


Рисунок 3.4 – Зависимости единичных функций формы ЭДС обмоток бесколлекторного двигателя постоянного тока от угла поворота поля

Вывод формулы для расчета электромагнитного момента

Момент, который создается двигателем, складывается из моментов, которые создаются его обмотками. Рассмотрим уравнение равновесия для обмотки фазы А, которое представлено в системе уравнений (3.7):

$$U_A = L_\Phi \frac{dI_A}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_B}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_C}{dt} + E_A + I_A R_\Phi \quad (3.9)$$

Для того, чтобы перейти к уравнению мгновенной электрической мощности обмотки, необходимо домножить обе его части на ток обмотки I_A . Уравнение приобретает следующий вид:

$$P_A = I_A \left(L_\Phi \frac{dI_A}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_B}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_C}{dt} \right) + I_A^2 R_\Phi + I_A E_A \quad (3.10)$$

Уравнение мгновенной электрической мощности включает в себя:

$I_A \left(L_\Phi \frac{dI_A}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_B}{dt} + L_{\Phi\Phi} \frac{dI_C}{dt} \right)$ – значение реактивной мощности обмотки;

$I_A^2 R_\Phi$ – значение активной мощности, которая рассеивается на обмотке;

$I_A E_A$ – значение мощности, формирующей электромагнитный момент.

Если потерями при преобразовании электрической мощности в механическую можно пренебречь, то справедливо выражение:

$$I_A E_A + I_B E_B + I_C E_C = M_{\text{ЭМ}} \omega_R \quad (3.11)$$

Отсюда можно определить электромагнитный момент двигателя $M_{\text{ЭМ}}$:

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{I_A E_A + I_B E_B + I_C E_C}{\omega_R} \quad (3.12)$$

Подставив в полученную формулу электромагнитного момента двигателя значение ЭДС из системы (3.8), получим формулу для вычисления электромагнитного момента ротора:

$$M_{\text{ЭМ}} = \psi_f Z_p (I_A E_{1A} + I_B E_{1B} + I_C E_{1C}) \quad (3.13)$$

Коммутация обмоток бесколлекторного двигателя постоянного тока

В соответствии с формулой (3.12) электромагнитный момент ротора бесколлекторного двигателя постоянного тока пропорционален сумме произведений фазных токов на функции формы соответствующих ЭДС.

Максимальные значения ЭДС обмоток соответствуют плоским участкам трапеции ЭДС. Формирование на этих участках угловой траектории токов некоторой постоянной амплитуды, совпадающих по знаку со знаком ЭДС, позволило бы сформировать максимальный постоянный положительный момент при этих токах.

На рисунке 3.4 участок угловой траектории от $\pi/6$ до $\pi/2$ в фазе A соответствует максимальному отрицательному значению ЭДС, а в фазе B - максимальному положительному значению ЭДС. Соответственно, формируя в фазе A отрицательное значение тока, а в фазе B положительное, будет получен положительный момент на рассмотренном участке угловой траектории.

Для этого фазу A необходимо подключить на отрицательный полюс внешнего источника постоянного напряжения $U_{зпт}$, а фазу B на положительный полюс внешнего источника постоянного напряжения $U_{зпт}$. При этом фаза C отключена от источника внешнего источника постоянного напряжения $U_{зпт}$. При этом, значение тока в обмотках формируется, исходя из значения напряжения, прикладываемого к обмоткам, величины ЭДС, а также параметров обмоток.

Такой подход позволяет составить таблицу переключения обмоток бесколлекторного двигателя постоянного тока, которые позволяют обеспечить значение момента нужного знака в зависимости от положения ротора. Алгоритм переключения обмоток бесколлекторного двигателя постоянного тока представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Алгоритм переключения обмоток бесколлекторного двигателя постоянного тока

Подключение фаз		Положение ротора									
		...	30	...	90	...	150	...	210	...	270
M>0	A	-	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	-	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	-			
	B	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	-	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	-	$+U_{3ПТ}$			
	C	$-U_{3ПТ}$	-	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	-	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$			
M<0	A	-	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	-	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	-			
	B	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	-	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	-	$-U_{3ПТ}$			
	C	$+U_{3ПТ}$	-	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	-	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$			

Обмотки трёхфазного двигателя с помощью схемы трехфазного автономного инвертора напряжения необходимо подключать ко внешнему источнику постоянного напряжения, которым для инвертора является звено постоянного тока. Для формирования крутящего момента на валу двигателя необходимо придерживаться правильной последовательности переключений состояний инвертора. Обычно в схемах с бесколлекторным двигателем постоянного тока это выполняется при помощи датчика положения ротора, который имеет три канала, каждый из которых формирует импульс на один оборот двигателя, соответствующий половине периода вращения, при этом импульсы в каналах сдвинуты на 120° .

Логическая обработка сигналов с датчика положения ротора позволяет определить текущее положение ротора в одном из шести возможных секторов. Алгоритм обработки сигналов с датчика положения ротора для определения углового положения ротора представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Алгоритм работы датчика положения ротора

	...	30	...	90	...	150	...	210	...	270	...	330
A	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
B	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
Сектор	1	2	3	4	5	6	1					

Синхронный DC/DC преобразователь

К компонентам электрических транспортных средств предъявляются повышенные требования надежности и безопасности. Вследствие чего к DC/DC преобразователям, которые применяются в составе силового электрооборудования электрических транспортных средств, также предъявляются аналогичные требования при разработке:

- соответствие номинального входного напряжения преобразователя напряжению блока аккумуляторной батареи;
- соответствие пределов изменения выходного напряжения преобразователя напряжению на входе трехфазного инвертора;
- стабилизация выходного напряжения преобразователя независимо от уровня заряда аккумуляторной батареи;
- сигнализация о повышении входных и выходных напряжений выше максимального значения;
- защита от коротких замыканий и перегрузок;
- наличие принудительной системы воздушного или жидкостного охлаждения;
- обеспечение бесперебойной работы при влиянии различных механических и климатических факторов;

- обеспечение двунаправленной передачи мощности рекуперации в тормозных режимах электрического транспортного средства;
- возможность отключения любого из параллельно работающих каналов при коротких замыканиях без отключения других работающих преобразователей для обеспечения бесперебойного электроснабжения тягового электропривода электрического транспортного средства [71].

Однофазный двунаправленный преобразователь, схема которого представлена на рисунке 3.5, может работать в режиме понижения и повышения напряжения в режиме как жесткой, так и мягкой коммутации.

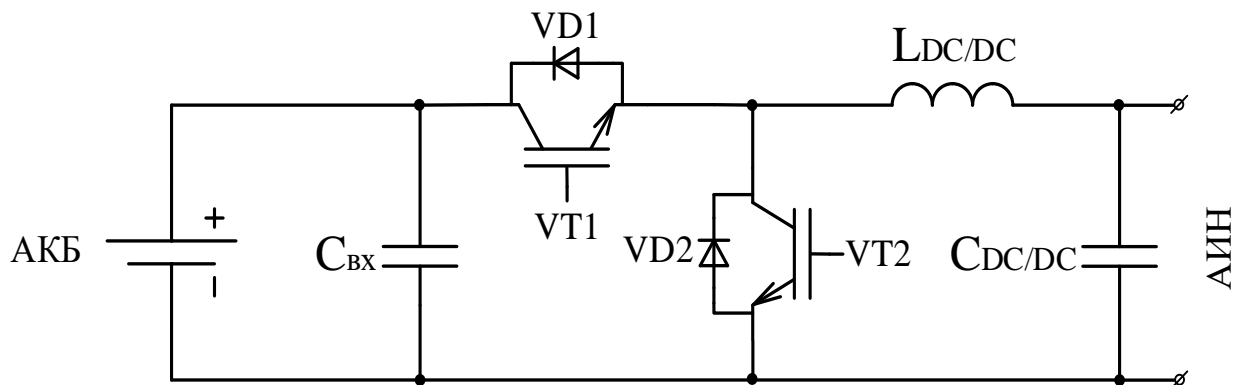


Рисунок 3.5 – Схема синхронного DC/DC преобразователь

Преобразователь состоит из двух силовых полупроводниковых ключей VT1 и VT2, двух конденсаторов $C_{вх}$ и $C_{DC/DC}$, а также индуктивности $L_{DC/DC}$. Ключи VT1 и VT2 являются комплементарными, то есть в проводящем состоянии всегда находится только один из двух ключей, что означает отсутствие сквозных токов в схеме.

Работа схемы в режиме понижения состоит из двух тактов. На первом такте работы ключ VT2 открыт, ключ VT1 закрыт, индуктивность $L_{DC/DC}$ подключена к напряжению аккумуляторной батареи $U_{АКБ}$, ток из аккумуляторной батареи протекает в звено постоянного тока, в соответствии с рисунком 3.6. [72]

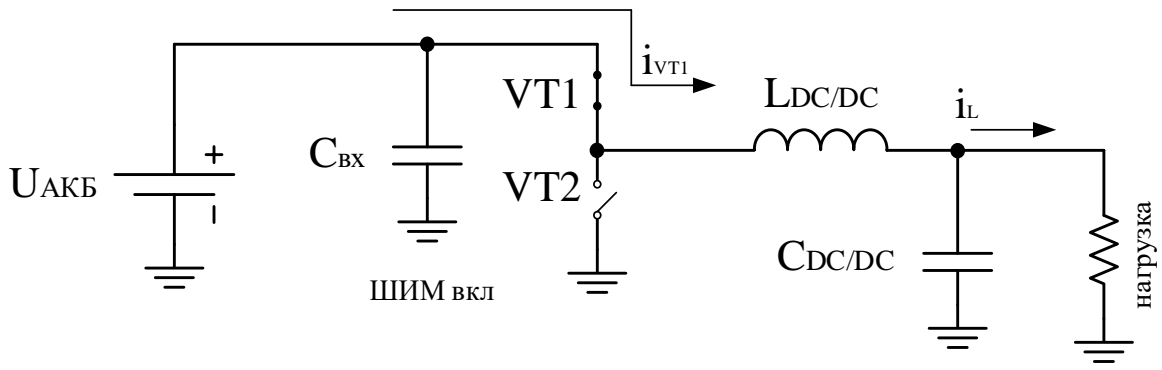


Рисунок 3.6 – Эквивалентная схема DC/DC преобразователя на первом такте работы

На втором такте работы ключ VT1 открыт, а ключ VT2 закрыт, ток циркулирует в замкнутом контуре, в соответствии с рисунком 3.7.

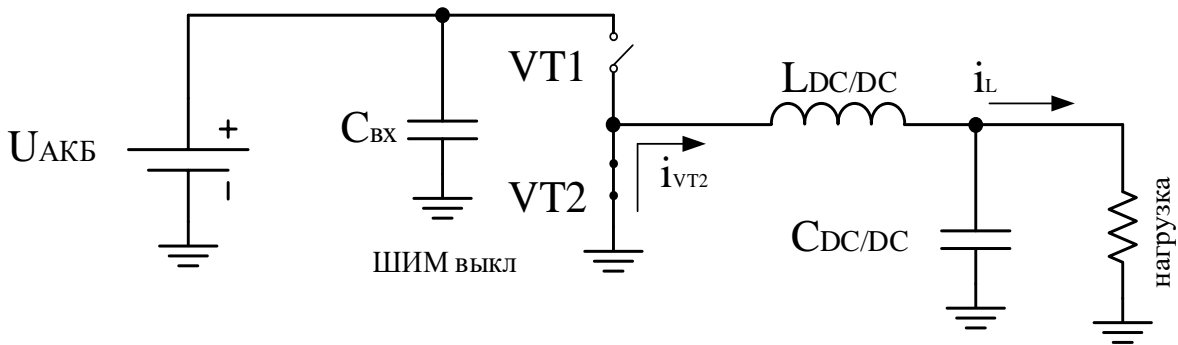


Рисунок 3.7 – Эквивалентная схема DC/DC преобразователя на втором такте работы

Форма управляющих импульсов, поступающих на ключ VT1 представлен на рисунке 3.8а. Осциллограммы токов, протекающих через ключ VT1, ключ VT2 и индуктивность $L_{DC/DC}$ представлены на рисунках 3.8б – 3.8г соответственно.

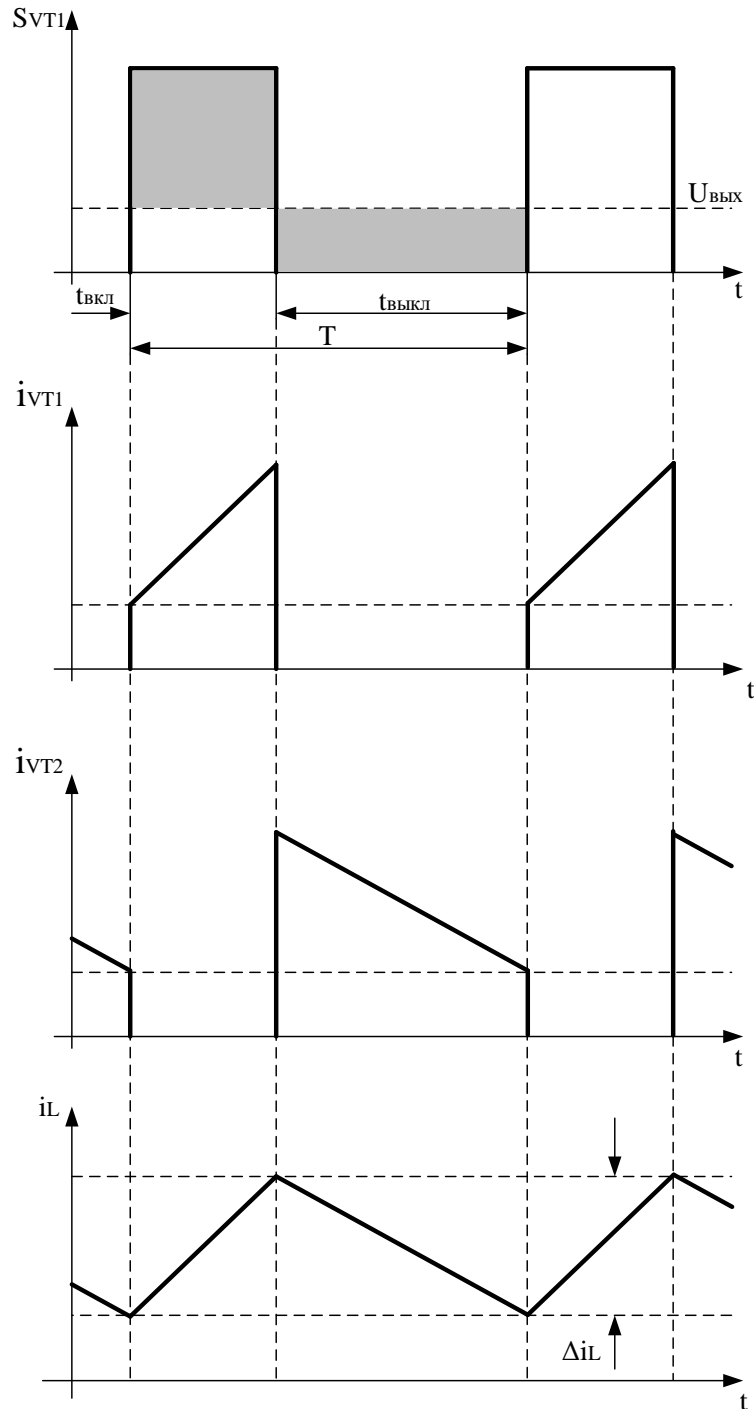


Рисунок 3.8 – а) Форма управляющих импульсов на ключ VT1; б) осциллограмма тока, протекающего через ключ VT1; в) осциллограмма тока, протекающего через ключ VT2; г) осциллограмма тока, протекающего через индуктивность $L_{DC/DC}$.

Стоит отметить, что схема DC/DC преобразователя, представленная на рисунке 3.4, может работать в режиме непрерывной проводимости, в котором

ток нагрузки, протекающий через индуктивность $L_{DC/DC}$ никогда не достигает нулевого значения, и в режиме прерывистой проводимости, когда ток нагрузки, протекающий через индуктивность $L_{DC/DC}$ некоторое время может равняться нулю. Однофазный двунаправленный преобразователь обычно проектируется и конструируется так, чтобы пульсации тока, обозначенные на рисунке 3.7г как ΔI_L , составляли 20 ... 50% от номинального тока нагрузки.

Изменяя скважность управляющего импульса на ключи DC/DC преобразователя возможно регулировать напряжение звена постоянного тока от U_{min} до $U_{АКБ}$.

3.2 Испытательный цикл

Для того, чтобы наиболее точно определить различные свойства и характеристики транспортных средств и их составляющих компонентов наиболее часто применяется комплекс испытаний. Несмотря на совершенствование различных расчетных методов и средств определения параметров движения транспортных средств, роста мощностей вычислительной техники, практические испытания не утратят своей актуальности. О том, справедлива ли математическая модель и принятые допущения можно судить только после проведения испытаний.

Способы и методы получения и обработки данных испытаний являются ключевым фактором, влияющим на итоговый результат. Наряду с методиками проведения испытаний, отдельное внимание следует обратить на полноту собираемых данных и правильность их интерпретации. Анализ и разработка новых методов обработки данных испытаний являются важной областью прикладной науки и осуществляются при помощи последних достижений математики на самой современной вычислительной технике [73].

На территории РФ крупнейшим и единственным независимым полигоном для испытаний колесных транспортных средств является Центр испытаний НАМИ. Испытательный полигон располагается рядом с посёлком Автополигон недалеко от города Дмитрова (Московская область). На

полигоне НАМИ можно проводить исследования практически всех технических свойств автомобилей, прицепов, мотоциклов, включая активную и пассивную безопасность, экологию, эргономику, топливную экономичность, тягово-скоростные свойства, надежность, коррозионную стойкость и др.

Центр испытаний НАМИ является аккредитованной технической службой в рамках Женевского соглашения 1958 года и может проводить сертификационные испытания на соответствие требованиям следующих международных и национальных стандартов: – Правил ЕЭК ООН; – ГОСТ и ГОСТ Р; – Технического регламента Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств». Разнообразные климатические условия в РФ обеспечивают возможность проведения испытаний автомобилей и шин как в летних, так и в зимних условиях. Площадь полигона НАМИ составляет 2500 га. Схема полигона представлена на рисунке 3.9.

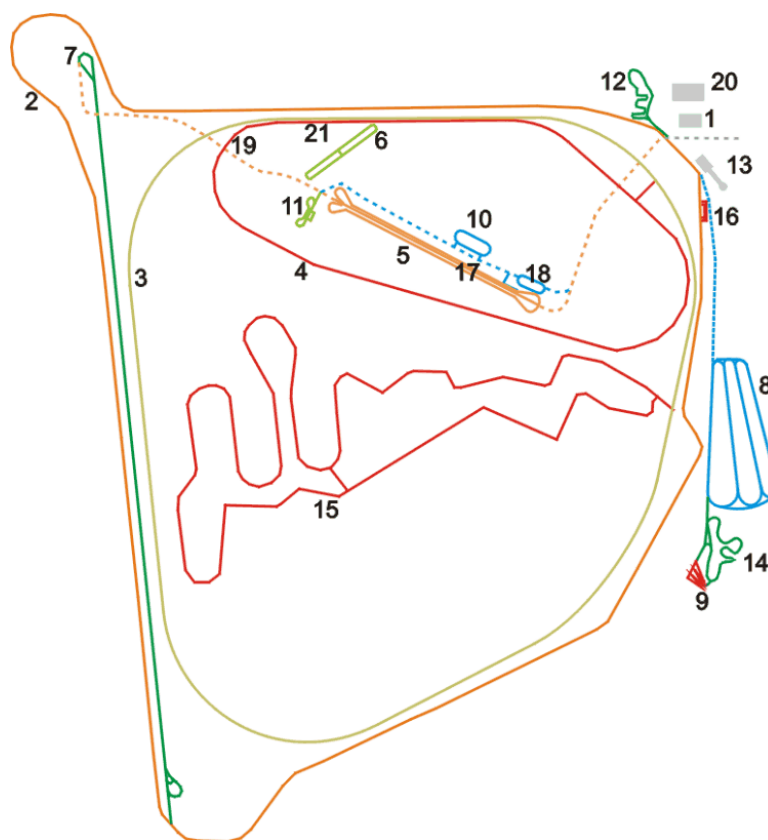


Рисунок 3.9 – Испытательный полигон НАМИ

На рисунке 3.9 приняты следующие обозначения: 1 – лабораторно-производственная база; 2 – грунтовая дорога равнинная, кольцевая; 3 – скоростная дорога; 4 – булыжная дорога кольцевая, профилированного мощения; 5 – комплекс специальных испытательных дорог; 6 – трек со сменными неровностями (кольцевой); 7 – динамометрическая дорога; 8 – подъемы малой крутизны, комплекс дорог для имитации городских режимов движения 4, 6, 8, 10 %; 9 – подъемы большой крутизны, имитация дорог горного цикла 30, 40, 50, 60 %; 10 – песчаный участок; 11 – бункерный участок; 12 – трасса автокросса; 13 – комплекс для испытаний автомобилей на пассивную и активную безопасность; 14 – горная дорога; 15 – грунтовая дорога тяжелая; 16 – грязевой участок; 17 – мелководный бассейн; 18 – глубоководный бассейн; 19 – щебёночная дорога; 20 – аэродинамическая труба; 21 – участок для испытаний дорожных ограждений.

Комплекс подъемов малой крутизны 8 предназначен для определения тягово-скоростных свойств автомобилей всех типов, а также для испытаний на долговечность, надежность тормозных систем, трансмиссий и других агрегатов. В этот комплекс входят подъемы крутизной 4, 6, 8 и 10%. На подъеме с уклоном 8% имеется базальтовый участок для оценки противобуксовочных систем.

На комплексе подъемов большой крутизны 9 (30, 40, 50 и 60%) определяют максимальные подъемы, преодолеваемые автомобилями, эффективность тормозных систем, работоспособность систем питания и смазки двигателей на уклонах, испытывают лебедки и проводят ряд других экспериментов.[73]

Используя рекомендованные величины уклонов, составлен некоторый испытательный цикл, представленный в виде зависимости уклона, измеряемого в градусах или процентах, от значения координаты, измеряемой в метрах. В таблице 3.3 представлены зависимости уклона от координаты.

Таблица 3.3 – Значения зависимости уклона от координаты

Координата, м	Уклон, °	Уклон, %
0	0	0
200	2,3	4
500	0	0
700	3,4	6
850	0	0
1200	4,6	8
1350	0	0
1480	5,7	10
1590	4,6	8
1630	0	0
1810	-5,7	-10
2200	0	0
2400	4,6	8
2500	0	0
2880	3,4	6
2900	0	0
3000	5,7	10
3100	0	-10
3400	-4,6	-8
3600	-3,4	-6
4000	0	0

Графическое изображение полученного испытательного цикла представлено на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Продольный профиль дорожного полотна испытательного цикла

3.3 Анализ режимов движения транспортного средства на основе стандартизированных циклов движения

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.

Таким образом, каждый цикл движения характеризуется пройденным расстоянием и временем движения. Реальный цикл движения ТС состоит не только из последовательных этапов пуска – выбега – торможения, а может включать в себя несколько последовательных пусков-выбегов, пусков-торможений, подтормаживаний, либо проходить без выбега или торможения. В конечном счете количество и очередность этапов определяется типом транспортного средства, условиями движения и личным стилем вождения.

Под условиями движения подразумеваются городской и загородный циклы движения, значительно отличающиеся между собой динамикой транспортного потока. Движение в городской среде преимущественно состоит из циклов пусков-торможений, режимы выбега либо кратковременны, либо

отсутствуют. Загородный цикл представляет собой пуск до максимально допустимой скорости и ее удержание, либо выбег до конечного пункта.

Значительная разница в циклах движения послужила причиной возникновения различных скоростных диаграмм, имитирующих требуемый цикл движения для определенного типа ТС. По территориальному признаку их испытательные циклы условно разделяют на европейский, американский и японский.

Для Европы обязательным является новый европейский цикл движения — NEDC (New European Driving Cycle), показанный на рисунке 3.11. Данный цикл моделирует типичную манеру езды на европейских дорогах. Длина цикла 11007 м, средняя скорость 33,6 км/ч, максимальная скорость 120 км/ч. В других странах (например, в США и Японии) при испытаниях автомобилей применяются другие циклы, учитывающие региональную специфику дорожного движения и стиля вождения. Измерение количества и анализ вредных веществ выполняются по методу CVS (Constant Volume Sampling, отбор проб постоянного объема) [74].

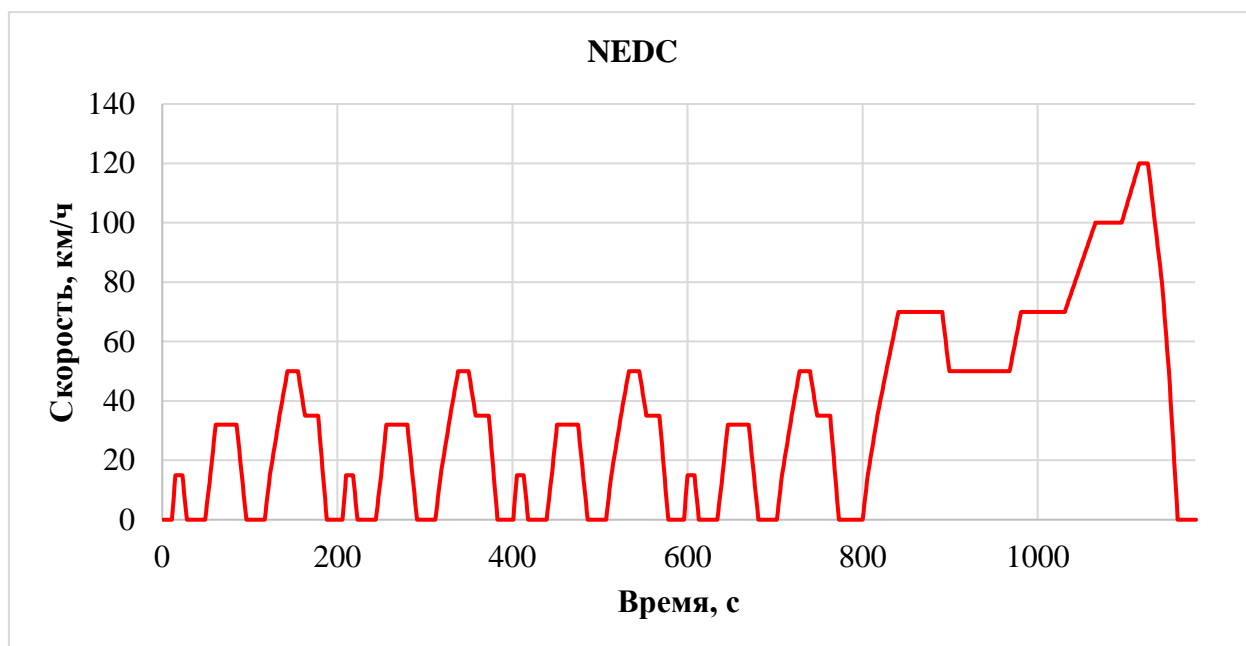


Рисунок 3.11 – Новый европейский цикл движения (NEDC)

Уже начиная с нормы Евро-3 произошло значительное ужесточение европейских условий испытаний. 40-секундная фаза холостого хода перед началом испытаний была упразднена. При дополнительном испытании в холодных условиях пуск двигателя производится при температуре -7°C , и немедленно начинается измерение отработавших газов (ОГ) в городском цикле. Предельно допустимое количество оксида углерода во время этого испытания не должно превышать 15 г/км , а углеводородов — $1,8 \text{ г/км}$. Параллельно с ужесточением условий испытаний вступление в силу нормы Евро-4 почти наполовину уменьшило предельное содержание вредных веществ в выхлопе. Поскольку 90% вредных веществ образуется в фазе нагрева катализатора, изготовители были вынуждены устанавливать новые системы очистки ОГ для фазы холодного пуска и прогрева двигателя. Стандарт Евро 5, действующий в России с 01.01.2016, также значительно ужесточил нормы выбросов ОГ транспортными средствами. Так, пробег автомобиля, в течение которого должны поддерживаться установленные требования по экологии, увеличен до 160 тыс. км, увеличены так называемые «коэффициенты ухудшения». Для автомобилей с двигателями с искровым зажиганием они составляют: CO — 1,5; THC — 1,3; Nox, 1,6 (вместо значения 1,2 для всех компонентов Евро-4) [75].

При испытании ТС в США используется более сложная методика, представленная на рисунке 3.12 на примере FTP-75. Это всего лишь один из стандартных испытательных циклов, принятых в США. Другие, применяемые режы - загородный цикл (Highway Cycle), цикл 5FTP, цикл US06 и цикл OBD, который также называют CARB Unified Cycle. Испытание FTP-75 состоит из трех фаз и паузы (простоя). Пауза в 10 минут в цикле FTP имитирует нахождение автомобиля в пробке, типичной при движении в большом городе. Третья фаза идентична первой. Кроме того, для увеличения адекватности результатов, используются два дополнительных поправочных федеральных теста US06 и SFTP-SC03 [76]. Они позволяют получить данные о движении

при более “агрессивном” вождении на высоких скоростях, с большими ускорениями и замедлениями, а также с включенной климатической установкой. Максимальная скорость автомобиля при этом испытании заметно ниже, чем при испытаниях в Европе. Единых условий испытаний, таких как в Европе, в США нет.

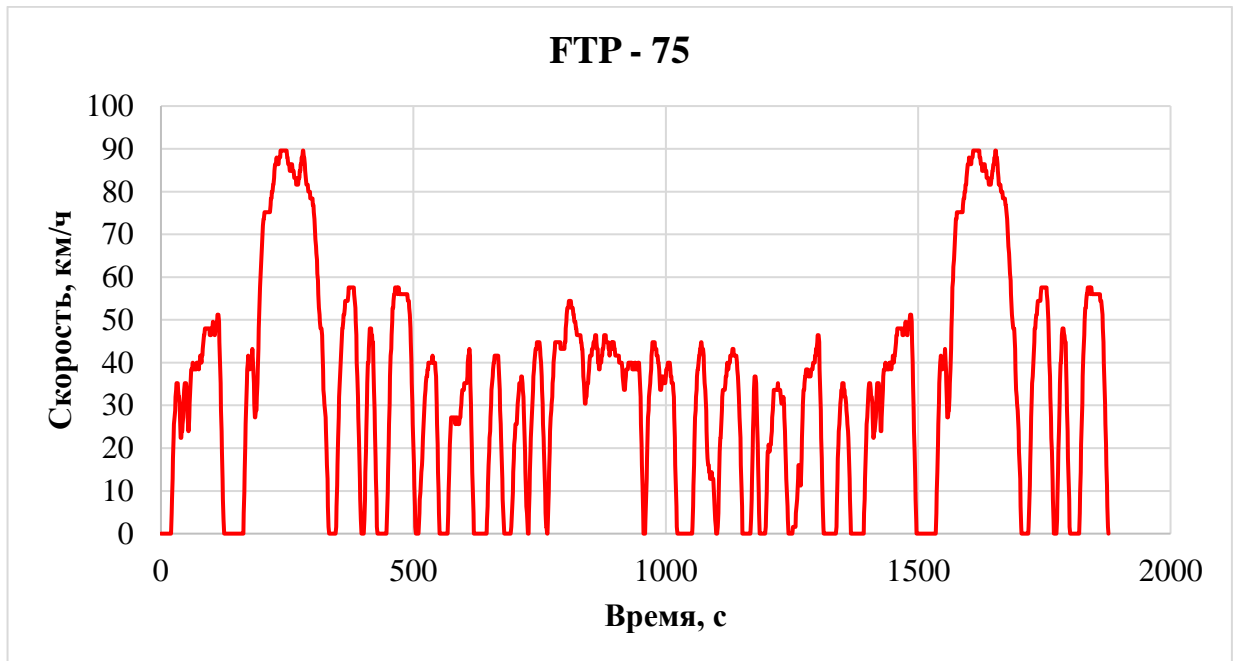


Рисунок 3.12 – Американский цикл движения FTP-75

Японская методика JC08 представлена на рисунке 3.13. Тестирование проводится поочередно в два этапа: «холодный» и «горячий» старт, с непрогретым и прогретым двигателем соответственно. Это позволяет учитывать топливо, расходуемое на прогрев. Итоговый расход топлива определяется суммой 25% от расхода в режиме «холодного» старта и 75% в режиме «горячий» старт. По своему характеру ездовой цикл схож с американским FTP-75. Он имитирует вождение в интенсивном городском потоке, а также часто меняющиеся ускорение и замедление. Продолжительность цикла 1205 с, протяженность 8,17 км, максимальная скорость 81,6 км/ч, средняя скорость движения 24,4 км/ч. Низкая средняя скорость хорошо описывает движение ТС в крупных мегаполисах, учитывая

остановки на светофорах, перекрестках, остановочных пунктах, пребывание в пробках и других затруднениях.

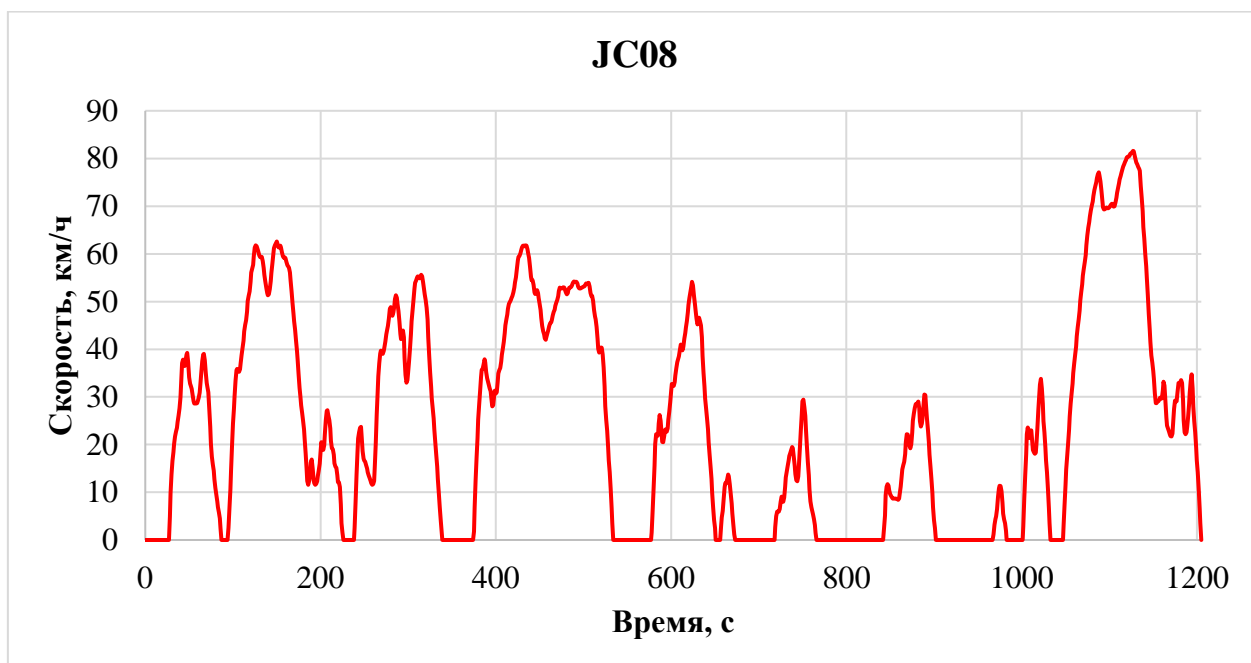


Рисунок 3.13 – Японский цикл движения JC08

С появлением электромобилей, на смену рассмотренным выше циклам пришел цикл WLTC (Worldwide harmonized light vehicles test cycle), представленный на рисунке 3.14 [77]. Это обосновано тем, что важно не столько то, какой электрокар расходует больше киловатт-часов на 100 километров, а именно запас хода, который вышерассмотренные циклы не могли оценить корректно. WLTC разделен непродолжительными остановками на четыре фазы: Low с максимальной скоростью 56,5 км/ч, Medium с максимальной скоростью 76,6 км/ч, High с максимальной скоростью 97,4 км/ч и Extra High с максимальной скоростью 131,6 км/ч. Первые две составляют городскую часть WLTC, а последние две — загородную.

Методика WLTC разработана на основе статистического анализа езды в различных странах мира. При создании цикла использовали японский (JC08) и американский (FTP-75), поэтому WLTC представляет собой непрерывное чередование разгонов и торможений. В отличие от европейского NEDC, нет

ни одного участка с равномерным движением ТС. В таблице 3.4 представлены характеристики описанных циклов.

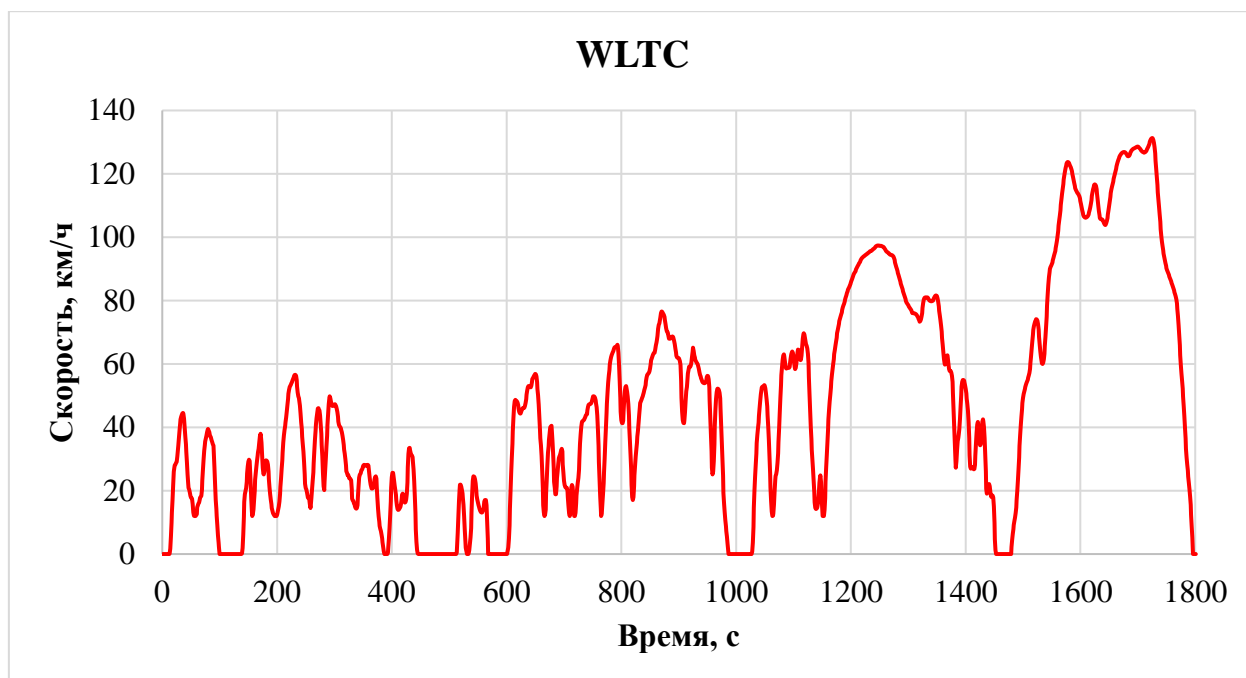


Рисунок 3.14 – Цикл WLTC

Электрический транспорт испытывается также, как и обычный транспорт, но на старте возможны 4 варианта стандартных значений заряда аккумуляторной батареи: 25, 50, 75 и 100%. Исключение составляют случаи, когда в ходе специальных тестов доказывается, что заряд батареи во время эксплуатации постоянно поддерживается на одном уровне. Если за время цикла заряд батареи увеличивается или уменьшается, то разница в Вт·ч пересчитывается в литры и вычитается либо добавляется к итоговому результату. Для подзаряжаемых гибридов предусмотрено 4 типа испытаний. Первый - расход электроэнергии в режиме электромобиля. Второй - при полностью разряженной батарее. Третий и четвертый тесты выполняются при частично разряженной батарее, однако степень разряда и процедура находятся на стадии разработки [78]. Сравнительная характеристика рассмотренных циклов движения приведена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Характеристики рассмотренных циклов

Цикл	$T_{\text{цикла}}, \text{с}$	$T_{\text{ост}} / T_{\text{цикла}}, \%$	$V_{\text{max}},$ км/ч	$V_{\text{cp}}, \text{км/ч}$	$a_{\text{max}}, \text{м/с}^2$
NEDC	1180	24,8	120	44,7	0,83
FTP-75	1876	19,6	91,3	42,4	1,48
JC08	1204	29,7	81,6	34,7	1,53
WLTC	1800	13,4	131,3	53,5	1,66

В настоящее время в РФ действует регламент «О безопасности колесных транспортных средств», в котором для оценки расхода топлива и выбросов вредных веществ предусмотрено применение требований Правил ЕЭК ООН №83 и 101, использующих ранее описанные испытательные циклы [79].

Для испытаний автомобильного транспорта на территории России до 2017 года как правило применялся именно Европейский цикл движения NEDC. Рассмотренные циклы в первую очередь предназначены для определения выбросов вредных газов и расхода топлива и не отображают всего многообразия режимов движения транспортного средства на дороге. В европейском методе транспортное средство совершает разгон с малым ускорением, что не отражает реальных динамических возможностей современных транспортных средств и интенсивность в крупнонаселённых городах. Также в европейском цикле езда представлена с высокой дискретизацией, что не отражает реально движения на дороге. Американский и японский циклы показывают сравнительно большую динамику, однако практически не содержат режимов с движением с равномерной скоростью. Японскому циклу соответствует наименьшая средняя скорость движения 24,4 км/ч. Наиболее приближенным к реальному движению на дороге является 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.

3.4 Имитационное моделирование режимов работы безрельсового транспортного средства в программном пакете MATLAB/Simulink

3.4.1 Моделирование системы стабилизации линейной скорости транспортного средства на базе ПИД – регулятора

Модель транспортного средства, система стабилизации линейной скорости которого реализована на базе ПИД – регулятора, в программном пакете MATLAB/Simulink представлена на рисунке 3.15. Поскольку испытательный цикл 3.10 не подразумевает прохождения поворотов, сигнал задания скорости будет формироваться одинаковым на все четыре колеса.

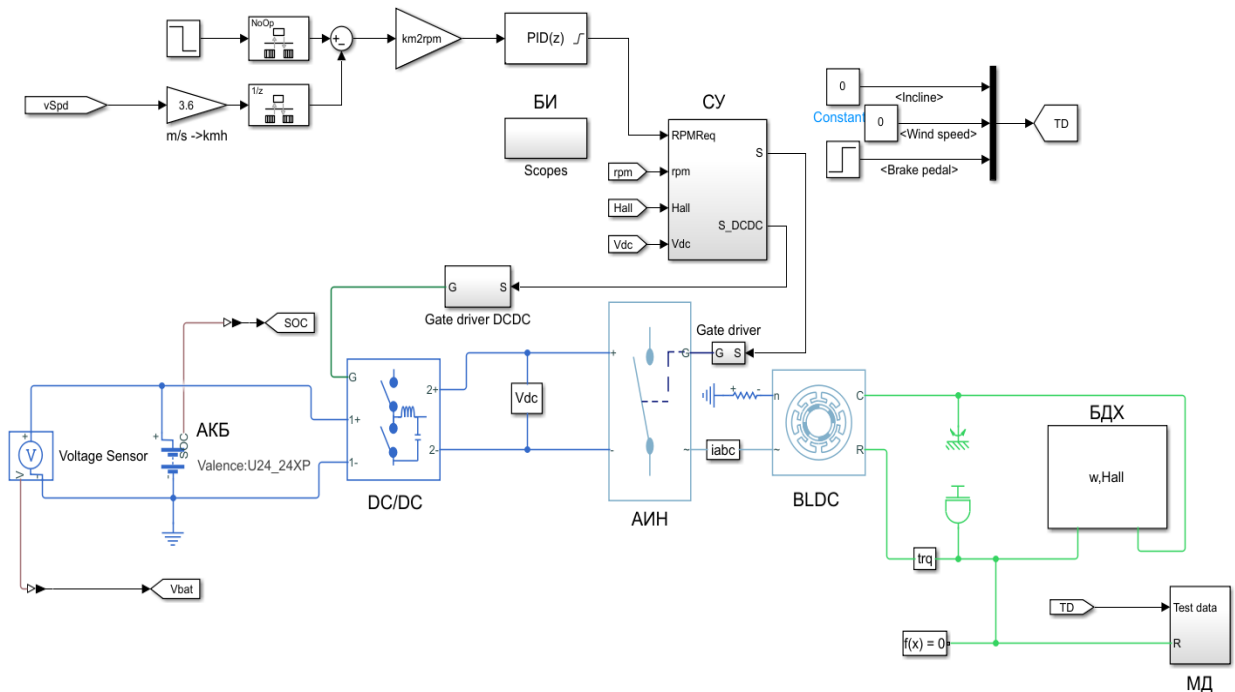


Рисунок 3.15 – Имитационная модель транспортного средства, система стабилизации линейной скорости которого реализована на базе ПИД – регулятора

Представленная модель включает в себя: BLDC – бесколлекторный двигатель постоянного тока, параметры которого представлены в таблице 1.3; DC/DC преобразователь; АИН – автономный инвертор напряжения; БДХ – блок датчиков Холла; СУ – система управления на базе ПИД – регулятора;

АКБ – аккумуляторная батарея; БИ – блок измерений; МД – модель движения транспортного средства.

Настройка ПИД регулятора осуществлена по методу Циглера – Никольса [80]. Суть метода заключается в том, что система выводится на границу устойчивости с появлением автоколебаний регулируемой величины, после чего, из анализа параметров автоколебаний определяются значения для настройки регулятора.

Для оценки работоспособности модели, а также для оценки динамики, проверим разгон транспортного средства от 0 до 100 км/ч. Переходные процессы по линейной скорости транспортного средства, току двигателя, а также частоте вращения представлены на рисунках 3.16, 3.17 и 3.18 соответственно.

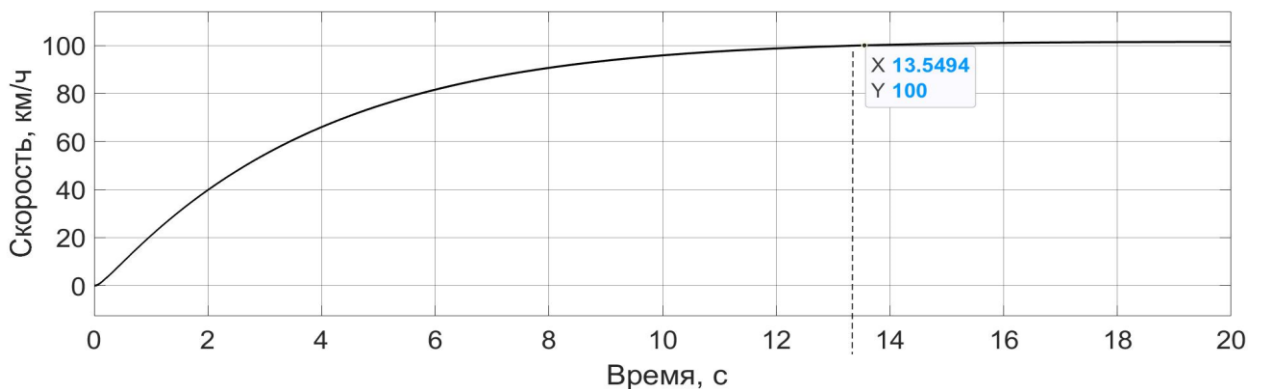


Рисунок 3.16 – Переходный процесс по линейной скорости транспортного средства при разгоне от 0 до 100 км/ч

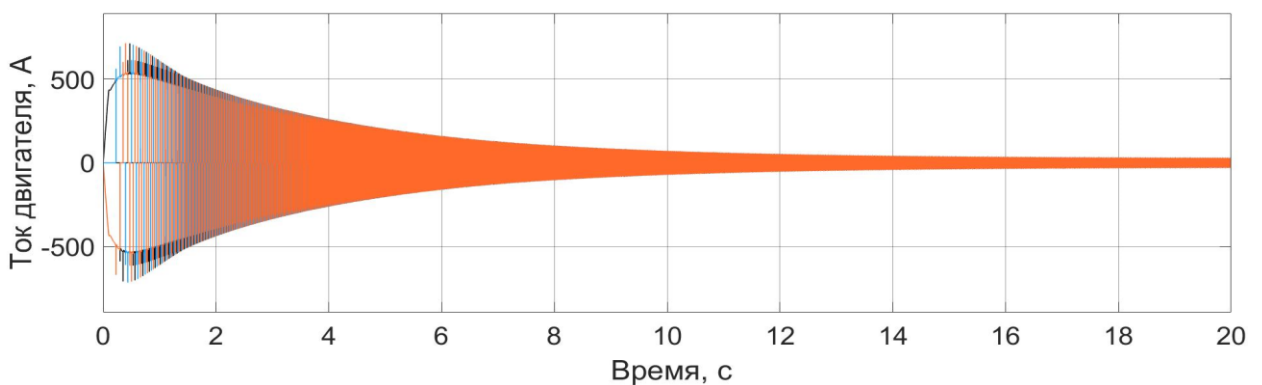


Рисунок 3.17 – Переходный процесс по току двигателя при разгоне от 0 до 100 км/ч

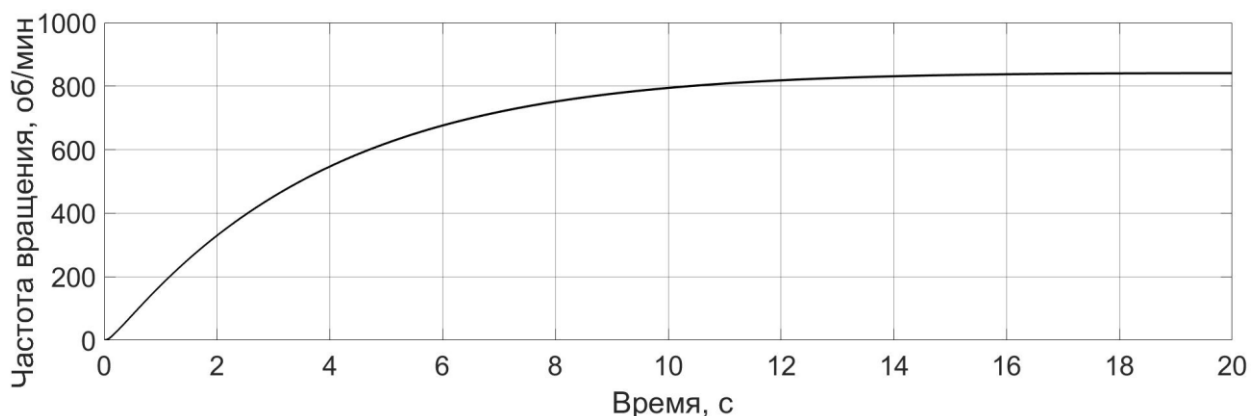


Рисунок 3.18 – Переходный процесс по частоте вращения двигателя при разгоне от 0 до 100 км/ч

Анализ переходных процессов, представленных на рисунках 3.16 — 3.18, позволяет сделать вывод о работоспособности разработанной модели, поскольку динамические показатели, полученные в процессе моделирования соответствуют результатам тягового расчета с достаточной степенью точности.

На следующем этапе моделирования получены переходные процессы по линейной скорости транспортного средства, току двигателя и заряду аккумуляторной батареи при смене продольного профиля дорожного полотна по следующему алгоритму S: движение по горизонтальному участку; подъем в горку с уклоном 3,4 градуса, что соответствует значению уклона в 6 процентов; движение по горизонтальному участку; спуск с уклоном -3,4 градуса, что соответствует значению уклона в -6 процентов.

Исследование проводится для модели, с параметрами аккумуляторной ячейки, емкостью 4560 Вт·ч. В дальнейшем, опыт на физической модели будет проводиться для АКБ с аналогичными параметрами.

Переходные процессы по скорости транспортного средства, току двигателя и заряду аккумуляторной батареи при прохождении рассмотренного участка представлены на рисунке 3.19.

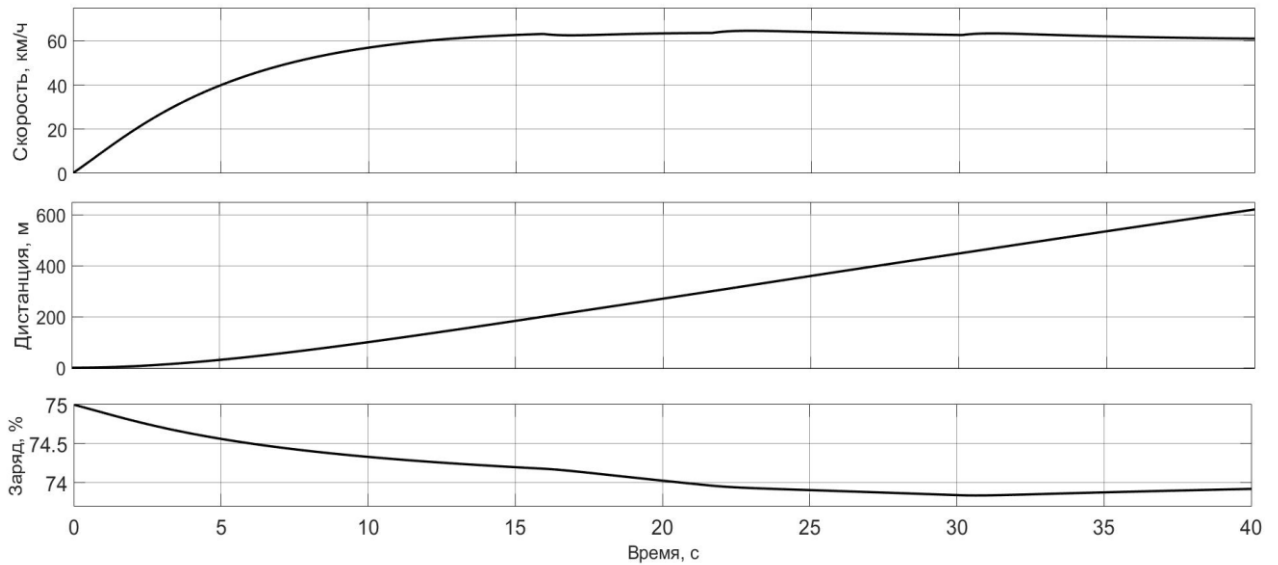


Рисунок 3.19 – Переходные процессы по скорости транспортного средства, току двигателя и заряду аккумуляторной батареи при изменении продольного профиля дорожного полотна алгоритму S для системы с ПИД регулятором

3.4.2 Применение алгоритмов нечеткой логики в системах электрического транспорта

О нечетких множествах научный мир узнал 57 лет назад из статьи Л. Заде «Fuzzy sets» в журнале «Information and Control» [81]. Воспринятая поначалу весьма скептически, сегодня теория нечетких множеств стала модным и эффективным методом моделирования в условиях неопределенности. Нечеткие системы успешно работают в различных областях инженерии, экономики, медицины, биологии, политики и др. Наибольшее применения нечеткие системы нашли в управлении техническими объектами и технологическими процессами.

Популярность теории нечетких множеств в проектировании объясняется тем, что нечеткие системы разрабатываются быстрее, они получаются проще и дешевле четких аналогов. Экспертные знания легко внедрить в нечеткие системы, что позволяет быстро создавать прототипы изделий с понятными для человека алгоритмами функционирования. Разработанные в последние

десятилетия методы обучения позволяют настроить нечеткую систему для обеспечения требуемых уровней функционирования, её аппаратная реализация относительно несложная, при этом вычисления могут быть распараллелены при необходимости.

В нечеткой логике для описания физических переменных используются лингвистические значения и выражения, вместо имен и чисел, применяемых в обычных разомкнутых и замкнутых системах управления. Если входная переменная описывается лингвистическими терминами, то она называется лингвистическим значением.

Каждый лингвистический терм описывается нечетким множеством M . Поэтому он математически однозначно определяется базовым множеством G из двух утверждений и функцией принадлежности. Функция принадлежности устанавливает принадлежность каждого элемента предметной области G в множестве M в форме числового значения от нуля до единицы. Если функция принадлежности конкретного значения равна единице, то лингвистическое утверждение соответствует лингвистическому терму во всех отношениях, если она равна нулю, то соответствия нет.

Конечные нечеткие множества могут быть описаны следующей формой записи:

$$M = \{(x_1, \mu_M(x_1)), \dots, (x_n, \mu_M(x_n))\}, x_i \in G, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.14)$$

Бесконечные множества:

$$M = \{x, \mu_M(x)\}, x \in G, \quad (3.15)$$

где $\mu_M(x)$ – числовые значения.

Наибольшее распространение получили следующие функции принадлежности: треугольная, трапециевидная, гауссова, сигмоидная. Для представления четких множеств применяется синглтонная функция

принадлежности и прямоугольник. На рисунке 3.20 приведены примеры графиков перечисленных функций принадлежности. Все функции описываются аналитическими выражениями и задаются параметрически. В исследовании не уделяется внимание реализации нечеткой логики с нуля, а используется популярный и признанный в научном обществе пакет Fuzzy Logic Toolbox в среде MATLAB фирмы MathWorks Inc.

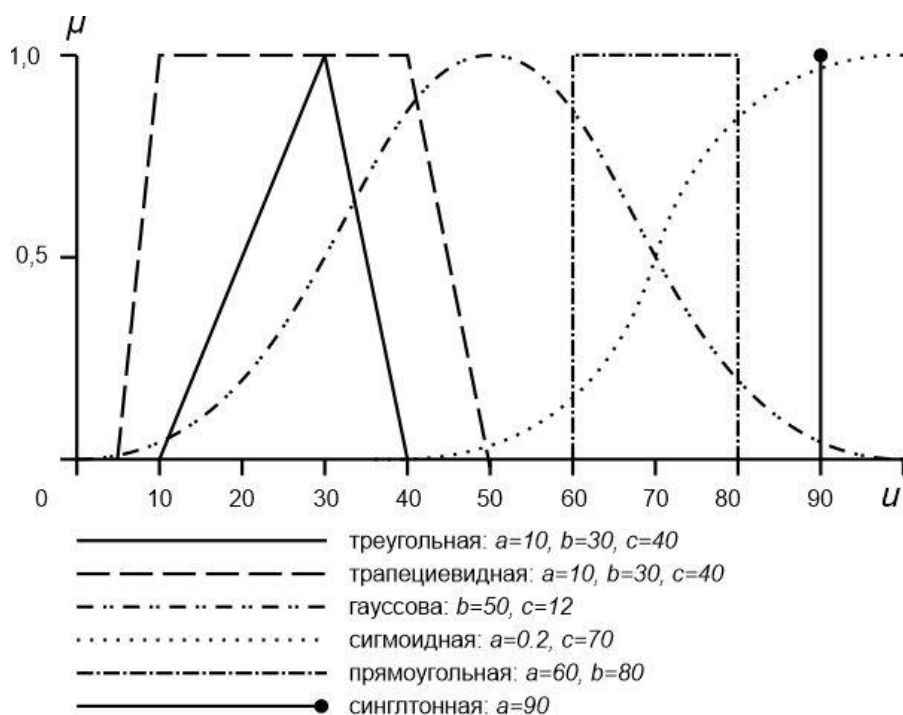


Рисунок 3.20 – Примеры наиболее распространенных функций распределения

Нечеткое управление означает управление техническими процессами в замкнутом и разомкнутом контурах, включая обработку измеряемых значений, которое основано на использовании нечетких правил и их преобразовании с помощью нечеткой логики.

Входная информация содержит действительные переменные в форме измеряемых переменных технологического процесса, производных переменных, а также уставок. Выходные переменные являются действительными переменными в форме регулирующих переменных. Между входными и выходными переменными технологического процесса и нечеткой

средой должны быть выполнены преобразования фаззификации – установления соответствия между численным значением входной переменной и значением функции принадлежности соответствующего ей терма лингвистической переменной и дефаззификация, что является аналогом операции нахождения положения случайных величин, таких как нахождение математической моды, ожидания и т.д. Существуют и применяются следующие методы дефаззификации: центр тяжести, медиана, центр максимумов, наибольший из максимумов, наименьший из максимумов. Основной компонент нечеткого управления состоит из лингвистических правил из базы правил и логического вывода, которые должны быть составлены экспертом.

Приведенные ниже примеры показывают принципиальные возможности, дающие общее представление о том, где может быть использовано нечеткое управление в области повышения энергоэффективности электрических и гибридных транспортных средств.

Исследователи предлагают решение для уменьшения пиковых токов на аккумуляторной батарее при зарядке и разрядке за счет использования суперконденсаторов в составе композитного источника питания [82]. Стратегии управления энергопотреблением в гибридных и электрических ТС, как правило основаны на жестких правилах и оптимизации параметров, различные типы систем управления преобразователей их плюсы и минусы обсуждаются в [83]. В том числе систему управления потоками энергии предлагается и для поддержания постоянных значений напряжения и тока, используя фильтр нижних частот на основе нечеткого логического контроллера и адаптивный пропорциональный интегральный контроллер заряда. Это предотвращает перезарядку суперконденсаторов и в целом повышает срок службы и производительность батареи [84]. Предложена адаптивная система диспетчерского управления энергопотреблением на основе нечеткой логики, с использованием параллельной активной топологии

[85]. Это позволило увеличить общую эффективность системы, а также решить проблемы согласования напряжения в звене постоянного тока.

Различные системы накопления энергии, используемые как для классических, так и для и подключаемых к сети гибридов, а также усовершенствованные схемы зарядки аккумуляторов описаны в [86,87]. Были проведены исследования нескольких стратегий управления для гибридов и подробное исследование системы управления потоками энергии для внедрения и преобразования традиционного транспортного средства в гибридный с возможностью подключения в сеть, с использованием нечеткой логики для эффективного управления двигателем, что позволяет снизить энергопотребление встраиваемых батарей [88].

Чао Гао и Цзянь и др. работали над улучшением состояния батареи и контролем тока разряда батареи. Для оптимизации функции принадлежности алгоритма нечеткой логики для гибридных и электрических транспортных средств использовали метод отсечения по «золотому» соотношению [89]. Несколько нечетких теорий, таких как нечеткая классификация, нечеткая диагностика и их приложения, представлены в [90].

Хайер Марзуги и др. использовали нечеткий регулятор для реализации алгоритма, основанного на правилах, который использовался для распределения требований к мощности между источниками и нагрузкой в гибридных и электрических транспортных средствах, игнорируя потери преобразователя [91]. Таким образом контролировалась равномерность использования топливных элементов и суперконденсаторов. Эта система контроля является гибкой и не требует предварительного задания какой-либо траектории движения транспортного средства, но стоимость такой системы высока.

В другом источнике исследователи стремились минимизировать колебания тока батареи, поток мощности от суперконденсаторов управлялся с использованием условий Каруша-Куна-Таккера [92]. Было проведено

детальное исследование нескольких алгоритмов управления. Среди них алгоритмы управления на основе правил и алгоритмы управления на основе оптимизации являются наиболее значимыми для систем распределения энергии на гибридных транспортных средствах.

Также важным объектом внимания являются системы управления торможением для электрических и гибридных транспортных средств. Исследованы сочетания батареи и конденсаторов с использованием двунаправленного преобразователя, относящегося к гибридным ТС, в том числе на топливных элементах. Однако в результате получилась сложная и дорогая система. Также автором обосновано, что суперконденсатор является лучшим источником улавливания энергии торможения, ввиду высокой удельной мощности.

Некоторые исследователи [93] использовали два накопительных устройства для удовлетворения необходимой потребности в энергии и принцип максимума Понтрягина (РМР). Основной целью использования этих стратегий является сохранение высвобождаемой электроэнергии и использовании её вновь, что приводит к увеличению срока службы батареи.

В [94] представлена схема гибридного транспортного средства повышенной проходимости с использованием системы управления потоками энергии на основе алгоритмов нечеткой логики. За счет эффективного управления потоком мощности было продемонстрировано увеличение эффективности экономии топлива. Большое количество исследователей возлагали на систему управления потоками энергии ключевую роль в решении задачи по повышению производительности и эффективности.

Всестороннее сравнение подходов таких систем обсуждается как качественно, так и количественно на основе библиометрического метода, подтверждается эффективность использования системы управления потоками энергии на основе нечеткой логики для гибридного и электрического транспортного средства. Это также показывает, что такая система на основе

нечеткой логики дает надежный результат и подходит для коммерческого производства гибридных транспортных средств.

Исследования Чжоу Шэнчжэ и др., которые работали над повышением стабильности и эффективности гибридной системы накопления энергии (HESS) также доказали эффективность внедрения нечетких систем. В результате проблема, связанная с коротким сроком службы и ограниченной емкостью систем накопления энергии в электромобилях, может быть сведена к минимуму [95]. С этой целью для оценки остаточного заряда аккумуляторной батареи и состояния питания использовался сигма-точечный алгоритм фильтрации Калмана. Предлагаемая стратегия управления использует два алгоритма нечеткой логики — один для оценки остаточного заряда аккумуляторной батареи, а другой — для оценки состояния питания. Состояние питания дает информацию о пиковой мощности аккумулятора. Эту пиковую мощность можно легко найти, используя величину остаточного заряда аккумуляторной батареи. На основе остаточного заряда батареи и состоянии питания строятся правила нечеткой логики. Эти правила обеспечивают необходимую постоянную мощность двигателя и минимизируют случаи быстрого разряда батареи.

Кунци Ма и др. использовали SOC батареи и требуемый крутящий момент в качестве входных данных, тогда как крутящий момент двигателя был принят в качестве выходных данных алгоритма нечеткой логики. В результате, использование нечеткой логики для систем управления энергопотоками, позволило снизить расход топлива транспортных средств на 4,5–13,3% [96]. Эти результаты были получены в соответствии с согласованным во всем мире циклом испытаний легковых автомобилей (WLTC) и новым европейским ездовым циклом (NEDC), а также показали свою эффективность и на нетиповых циклах. Во всех случаях испытания подтверждают наилучшую экономию топлива, обеспечиваемую алгоритмом нечеткой логики, по сравнению с традиционным контроллером. Некоторые исследователи

отдавали предпочтение использованию в гибридных транспортных средствах синхронного двигателя с постоянными магнитами. Распределение мощности в этих стратегиях осуществляется с использованием стратегии управления питанием на основе нечеткой логики без необходимости использования дополнительного контроллера. Использовался метод прямого управления крутящим моментом [97] с помощью модуляции пространственного вектора. Для компенсации мощности и регулирования напряжения использовался рекуперативно-тормозной режим зарядки суперконденсаторов. Это также подтверждает надежность и стабильность стратегии управления питанием и устраняет эффект дребезга. Низкая мощность и ограничение по запасу хода гибридных транспортных средств могут быть преодолены путем использования комбинации различных устройств накопления энергии. Среди них могут быть использованы сборки аккумуляторных батарей с суперконденсаторами, аккумуляторы на топливных элементах, суперконденсаторы и т. д. [98].

Руи Сюн и др. [99] обсуждали различные топологии и устройства батарей. Также обсуждается использование суперконденсаторов для гибридных транспортных средств, их плюсы и минусы. Параллельная комбинация батареи и суперконденсатора всегда требует двух преобразователей, способных обеспечить постоянное напряжение. Эти преобразователи также ограничивают ток и напряжение зарядки аккумулятора. Последовательные комбинации накопителей требуют балансировки потока мощности и минимизации потерь преобразователя. Общая эффективность системы может значительно повыситься при использовании системы управления с алгоритмом передачи сверхмощности. Алгоритм передачи сверхмощности можно комбинировать с другой стратегией управления для управления скоростью заряда или разряда батареи.

Исследовательская работа, описанная выше [100] имеет несколько недостатков. Одним из основных является уменьшение времени автономной

работы в долгосрочной перспективе. Ожидается, что срок службы батареи уменьшится при торможении и ускорении электромобиля, так как аккумуляторы испытывают значительные перепады напряжения во время непрерывной зарядки и разрядки. По этой проблеме представлен подробный обзор гибридных транспортных средств со сложным накопителем, включающим в себя топливные элементы, батареи, суперконденсаторы [101]. Однако, у такого решения есть один недостаток: система тягового привода становится дорогой из-за внедрения трех разных систем накопления. Кроме того, не предусмотрен метод минимизации скачков тока на стороне аккумулятора при торможении и ускорении, что возможно решить при помощи системы управления потоками энергии на основе нечеткой логики.

Чтобы устранить фактор высокой стоимости аккумуляторной батареи, суперконденсатор использовался в качестве вторичного накопителя энергии, который применялся для регулярной зарядки батареи. Для эффективного управления потоком мощности одновременно были реализованы алгоритмы передачи сверхмощности и нечеткой логики. Для уменьшения пускового тока на стороне батареи при торможении и ускорении, а как следствие продление срока службы батареи был разработан преобразователь SEPIC (single-ended primary inductor converter), его особенностью является обеспечение постоянного тока для батареи.

С точки зрения информационной технологии нечеткое управление является экспертной системой, основанной на правилах. Текущие значения его выходных переменных зависят исключительно от текущих значений входных переменных, а не от предыдущих значений, за исключением случая, когда нет активных правил и не было определено значение по умолчанию. Если контроллер должен обладать динамическими свойствами, должны быть предусмотрены внешние по отношению к функциональному блоку динамические функции. Одним из главных применений программируемых

нечетких контроллеров является их использование совместно с обычными ПИД-регуляторами для улучшения качества управления ПИД-регулятора.

Также наряду с применением подходов нечеткой логики в системах управления с неизвестным заранее уровнем и характером сигнальных внешних возмущений [102], характерных для систем управления тяговыми электроприводами, возможно применение подходов синтеза систем управления методом сигнально-адаптивной обратной модели (САОМ). Сигнально-адаптивная обратная модель, которая учитывает обратную модель объекта управления, и выполняет компенсацию сигнальных возмущений.

Однако, сложная структура системы управления, широкий диапазон изменения и нелинейность характеристик входящих в нее компонентов, представляют сложную задачу для метода сигнально-адаптивной обратной модели по выражению обратной модели процесса, позволяющей получить приемлемое качество работы системы во всех возможных режимах работы объекта управления.

Преимущества в части возможности учета характеристик компонентов системы безрельсового транспортного средства в различных режимах его работы, а также возможность формализации законов управления для каждого отдельного режима работы в виде набора правил и способность системы к автонастройке обуславливают применение законов нечеткой логики в разработке системы управления безрельсовым транспортным средством.

3.4.3 Моделирование системы стабилизации линейной скорости транспортного средства на базе алгоритма нечеткой логики

Функциональная схема алгоритма стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства с применением нечеткой логики представлена на рисунке 3.21.

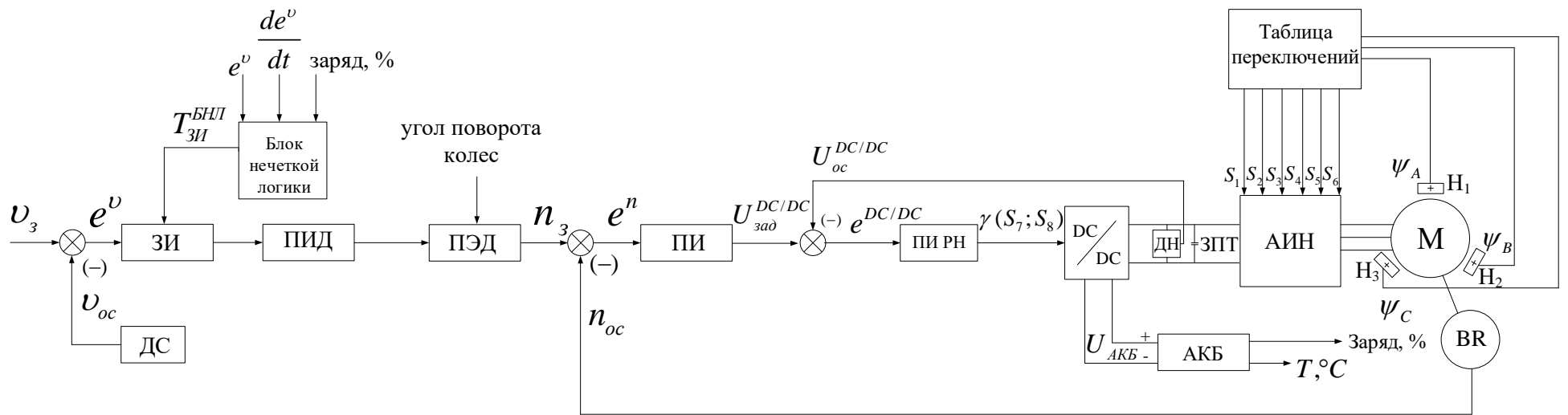


Рисунок 3.21 – Функциональная схема алгоритма стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства с применением нечеткой логики

Имитационная модель транспортного средства, система стабилизации линейной скорости которого реализована с применением нечеткой логики, в программном пакете MATLAB/Simulink представлена на рисунке 3.22.

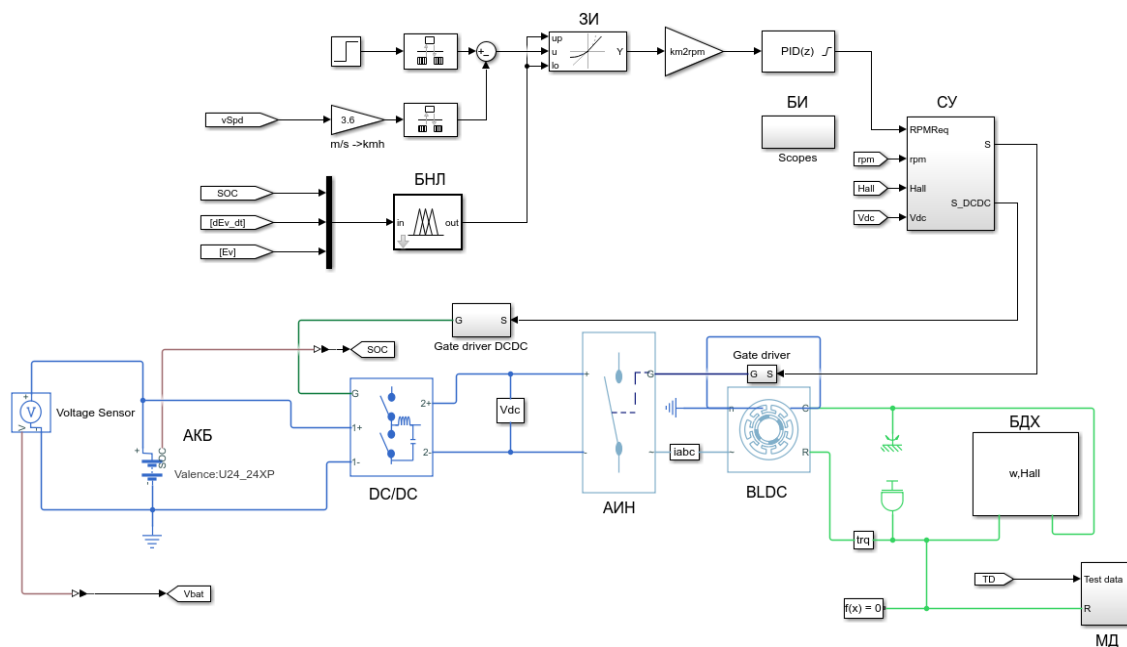


Рисунок 3.22 – Имитационная модель транспортного средства, система стабилизации линейной скорости которого реализована с применением нечеткой логики, в программном пакете MATLAB/Simulink

Система управления с ПИД – регулятором, представленная на рисунке 3.2, дополнена датчиком интенсивности ЗИ с настраиваемой постоянной времени $T_{ЗИ}^{БНЛ}$, управляемым блоком нечеткой логики БНЛ. В системе возможны три режима работы: экономичный (ECO), нормальный (NORMAL) и динамичный (FAST).

Блок нечеткой логики БНЛ выполняет функцию управления режимами работы системы стабилизации линейной скорости безрельсового транспортного средства, воздействуя на постоянную времени датчика 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. Рассмотренный алгоритм поясняет блок схема, представленная на рисунке 3.23.

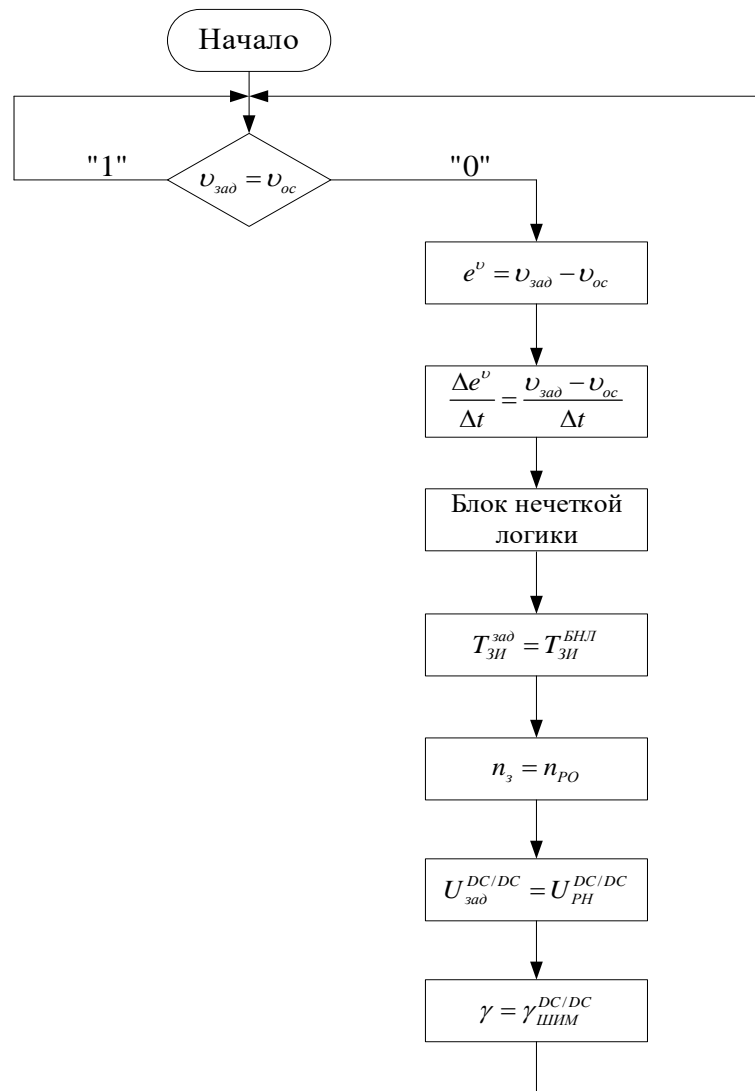


Рисунок 3.23 – Блок – схема программы алгоритма

На рисунке 3.23 были приняты следующие обозначения: v_s – сигнал задания на линейную скорость, v_{oc} – сигнал обратной связи по линейной скорости, e^v – сигнал ошибки регулирования, $\frac{\Delta e^v}{\Delta t}$ – первая производная по ошибке регулирования, $T_{3И}^{зад}$ – постоянная времени задатчика интенсивности, n_s – сигнал задания на контур стабилизации угловой частоты вращения, n_{PO} – сигнал с выхода регулятора линейной скорости, $U_{зад}^{DC/DC}$ – сигнал задания на ПИ РН, $U_{РН}^{DC/DC}$ – сигнал с выхода регулятора стабилизации угловой частоты вращения, γ – скважность, $\gamma_{ШИМ}^{DC/DC}$ – сигнал с выхода регулятора напряжения DC-DC преобразователя.

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 :

РН – positive high, «ошибка положительная высокая»;

М – 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 дефаззификации – centroid (метод центра тяжести). База лингвистических правил регулятора приведена в таблице 3.5. 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, представленному на рисунке 3.10. Целевая функция расхода энергии выглядит следующим образом:

$$J = \int_0^{t_{\text{пол}}} I^2 dt \rightarrow \min, \quad (3.16)$$

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

Оптимизация выполнялась в программном пакете MATLAB/Simulink.

Таблица 3.5 – База лингвистических правил нечеткого регулятора

№	Сигнал ошибки регулирования e^v	Первая производная по ошибке регулирования $\frac{\Delta e^v}{\Delta t}$	Заряд АКБ SOC, %	Выход регулятора
1	2	3	4	5
1	PH	M	–	FAST
2	NH	M	–	FAST
3	PH	NH	HIGH	NORMAL
4	PH	NH	LOW	ECO

1	2	3	4	5
5	M	NH	–	ECO
6	M	NM	HIGH	FAST
7	M	M	AVERAGE	NORMAL
8	M	M	LOW	ECO
9	M	PH	HIGH	NORMAL
10	M	PH	AVERAGE	NORMAL
11	M	PH	LOW	ECO

Функции принадлежности ошибки регулирования, первой производной ошибки регулирования, остаточного заряда аккумуляторной батареи и выхода нечеткого регулятора представлены на рисунках 3.24 – 3.27 соответственно.

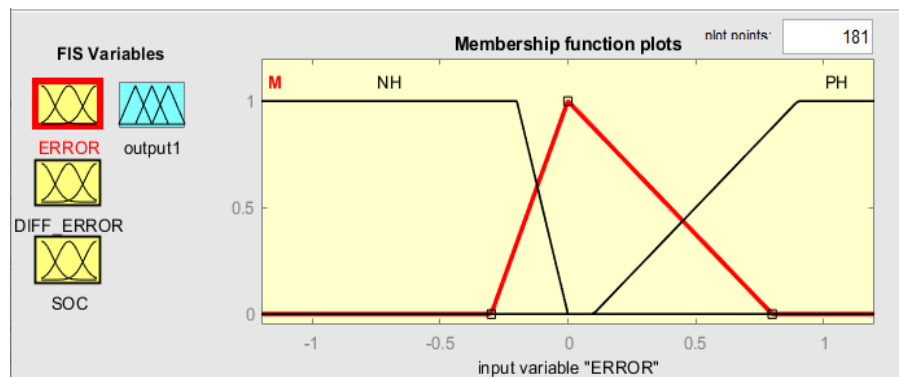


Рисунок 3.24 – Функция принадлежности ошибки регулирования

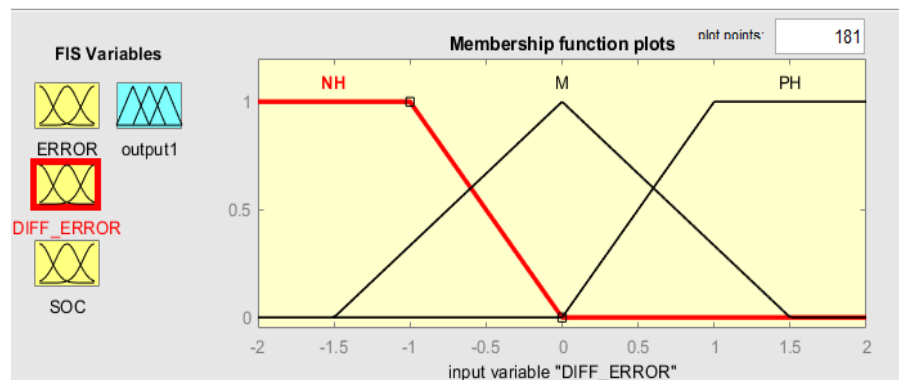


Рисунок 3.25 – Функция принадлежности производной ошибки регулирования

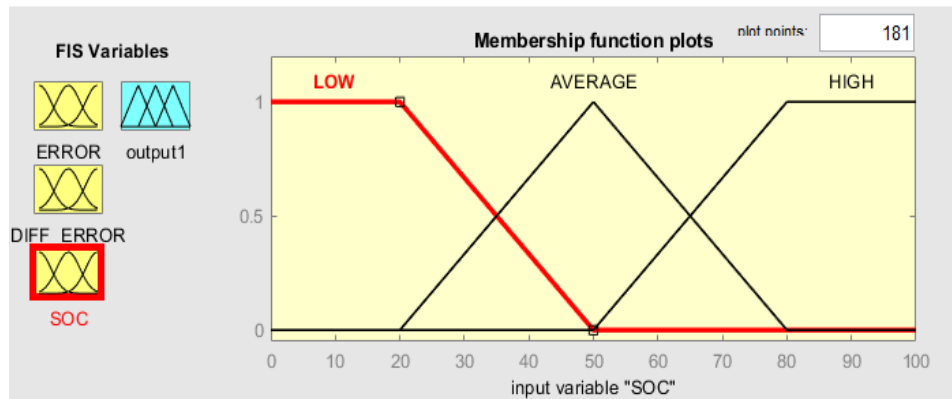


Рисунок 3.26 – Функция принадлежности остаточного заряда аккумуляторной батареи

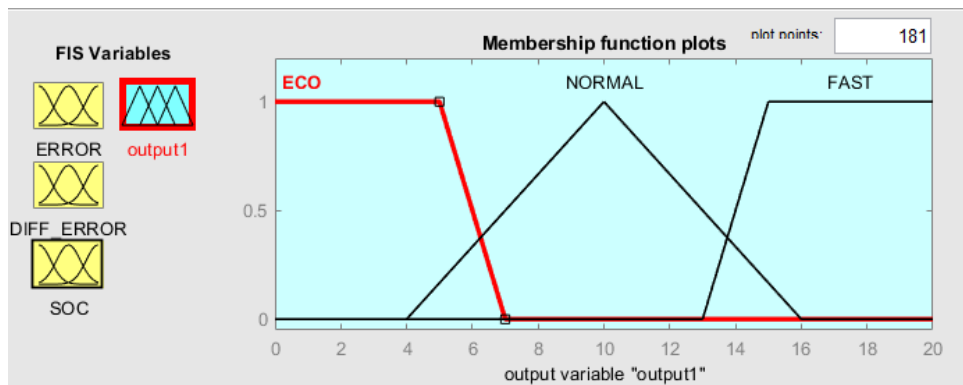


Рисунок 3.27 – Функция принадлежности выхода нечеткого регулятора

На рисунках 3.28 и 3.29 построены трехмерные поверхности отклика для разных форм функций принадлежности.

По горизонтальным осям отложены значения входных переменных: сигнал ошибки регулирования и ее первой производной в первом случае, первая производная по ошибке регулирования и остаточный заряд аккумуляторной батареи во втором случае. По вертикальным осям в обоих случаях – значения выходной переменной. Всего было реализовано шесть вариантов поверхностей отклика, поскольку на вход подаются три различные переменные.

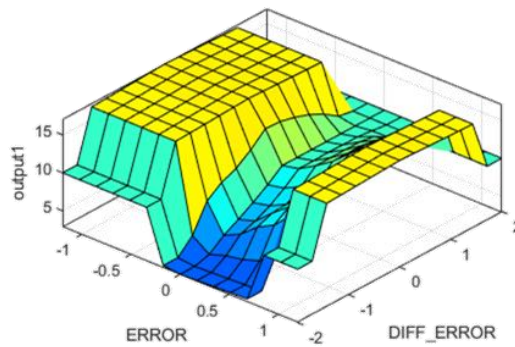


Рисунок 3.28 – Поверхность отклика сигнала ошибки регулирования и ее первой производной

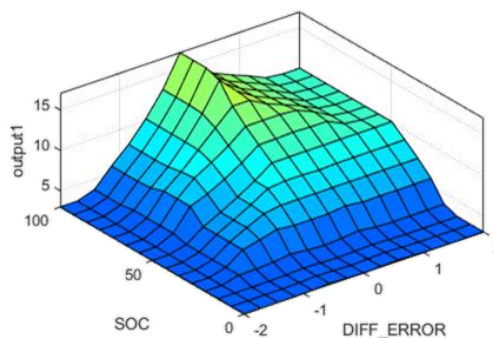


Рисунок 3.29 – Поверхность отклика первой производной по ошибке регулирования и остаточный заряд аккумуляторной батареи

Для сравнения с исходной системой стабилизации линейной скорости на базе ПИД – регулятора произведем имитационное моделирование аналогично предыдущему разделу: разгон от 0 до 100 км/ч а также движение по алгоритму S. Ввиду того, что разгон от 0 до 100 км/ч представляет собой процесс экстренного разгона, выход нечеткого регулятора переходит в «динамичный» режим работы, таким образом переходные процессы для данного случая полностью повторяют вид переходных процессов для системы с ПИД – регулятором. Для иллюстрации работоспособности нечеткого регулятора на рисунке 3.30 приведены переходные процессы по скорости транспортного средства, току двигателя и заряду аккумуляторной батареи при изменении продольного профиля дорожного полотна по алгоритму S.

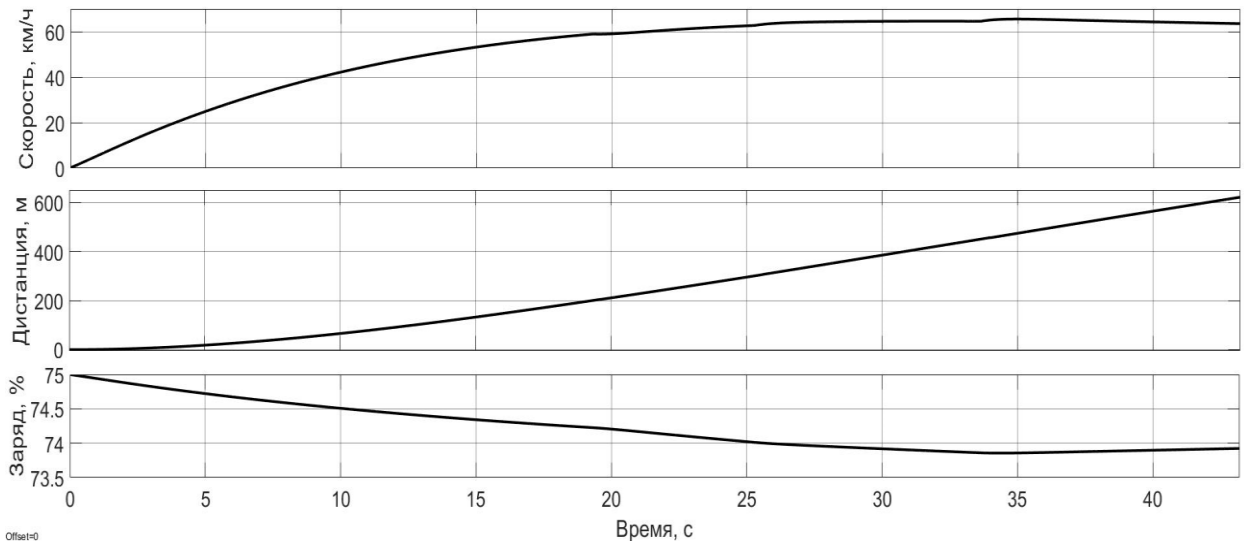


Рисунок 3.30 – Переходные процессы по скорости транспортного средства, току двигателя и заряду аккумуляторной батареи при изменении продольного профиля дорожного полотна алгоритму S для системы с алгоритмом нечеткой логики

Сравнительный анализ переходных процессов, представленных на рисунке 3.19 и 3.30 позволяет сделать вывод о том, что для системы с нечетким регулятором величина просадки скорости при набросе и сбросе нагрузки не превышает 1,54%, в то время как для системы с ПИД – регулятором значение таких динамических ошибок составляет 1,11%. Несмотря на ухудшение динамических свойств, применение нечеткого регулятора позволяет увеличить показатели энергоэффективности. 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.

Расход заряда аккумуляторной батареи при движении по алгоритму S для системы с нечетким регулятором на 0,36% меньше, чем для системы с

ПИД – регулятором. Рост экономии остаточного заряда аккумуляторной батареи осуществляется за счет некоторого снижения точности системы в динамических режимах за счет перевода системы в экономичный режим работы.

Следующий этап испытаний – цикл с изменением продольного профиля дорожного полотна, представленный на рисунке 3.10. Испытания проводились для трех значений линейной скорости – 40, 60 и 100. 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 батарей для скорости 100 км/ч и заряде батареи 75% и при скорости 40 км/ч и заряде батареи 25% для системы с ПИД – регулятором и нечетким регулятором.

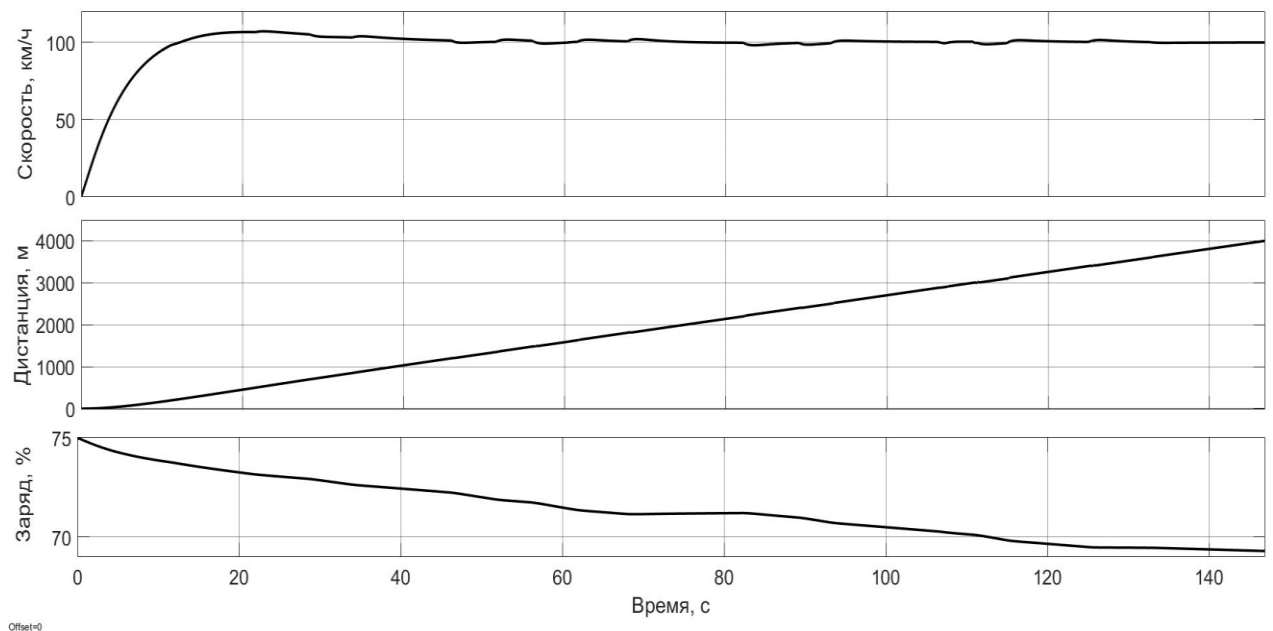


Рисунок 3.31 – Переходные процессы по скорости, пройденной дистанции и остаточному заряду батарей при прохождении цикла НАМИ системой управления на базе ПИД регулятора на скорости 100 км/ч и заряде батареи

75%

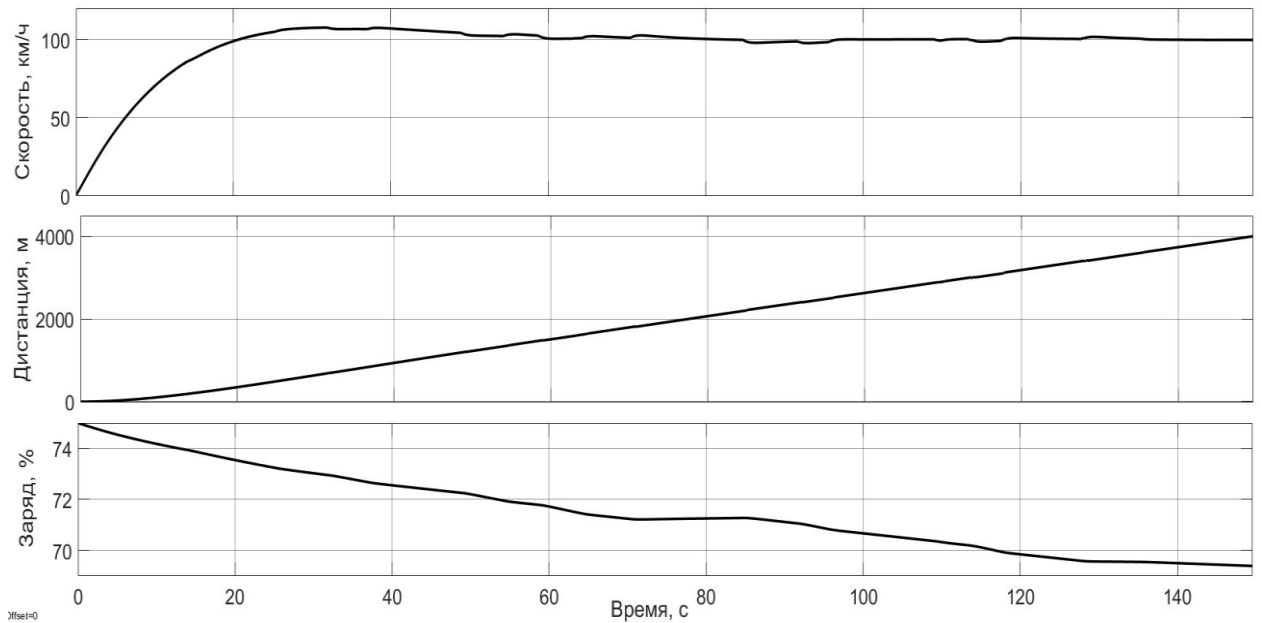


Рисунок 3.32 – Переходные процессы по скорости, пройденной дистанции и остаточному заряду батарей при прохождении цикла НАМИ системой управления на базе алгоритма нечеткой логики на скорости 100 км/ч и заряде батареи 75%

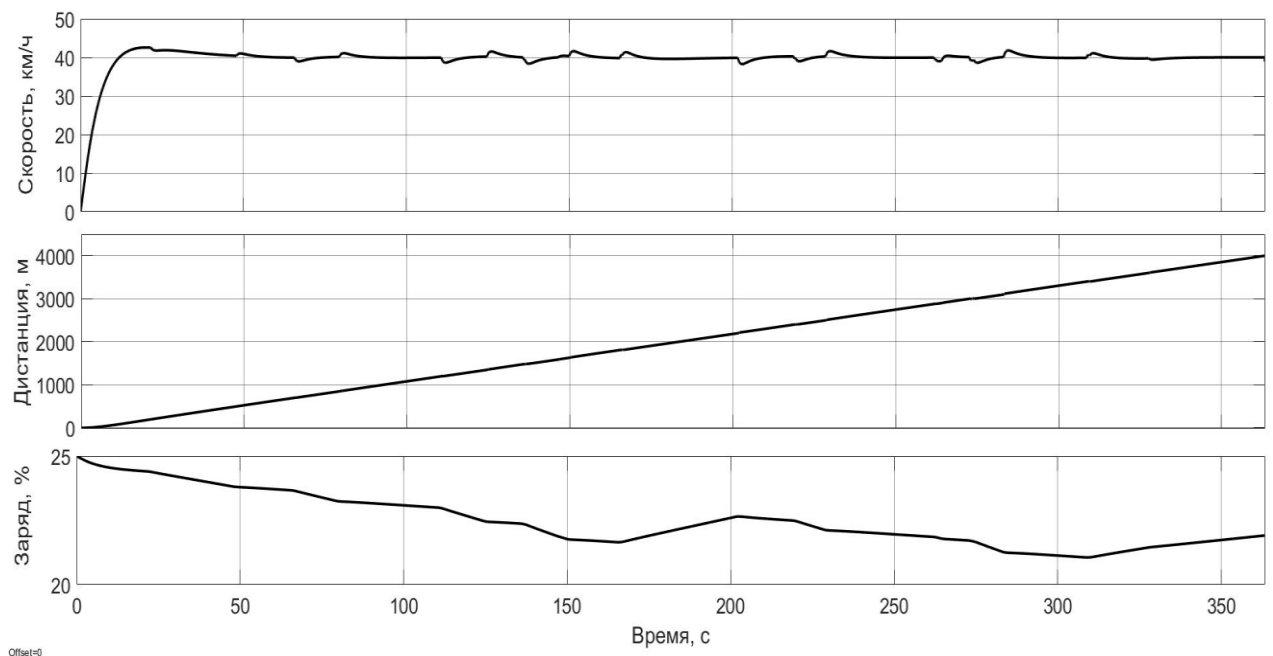


Рисунок 3.33 – Переходные процессы по скорости, пройденной дистанции и остаточному заряду батарей при прохождении цикла НАМИ системой управления на базе ПИД регулятора на скорости 40 км/ч и заряде батареи 25%

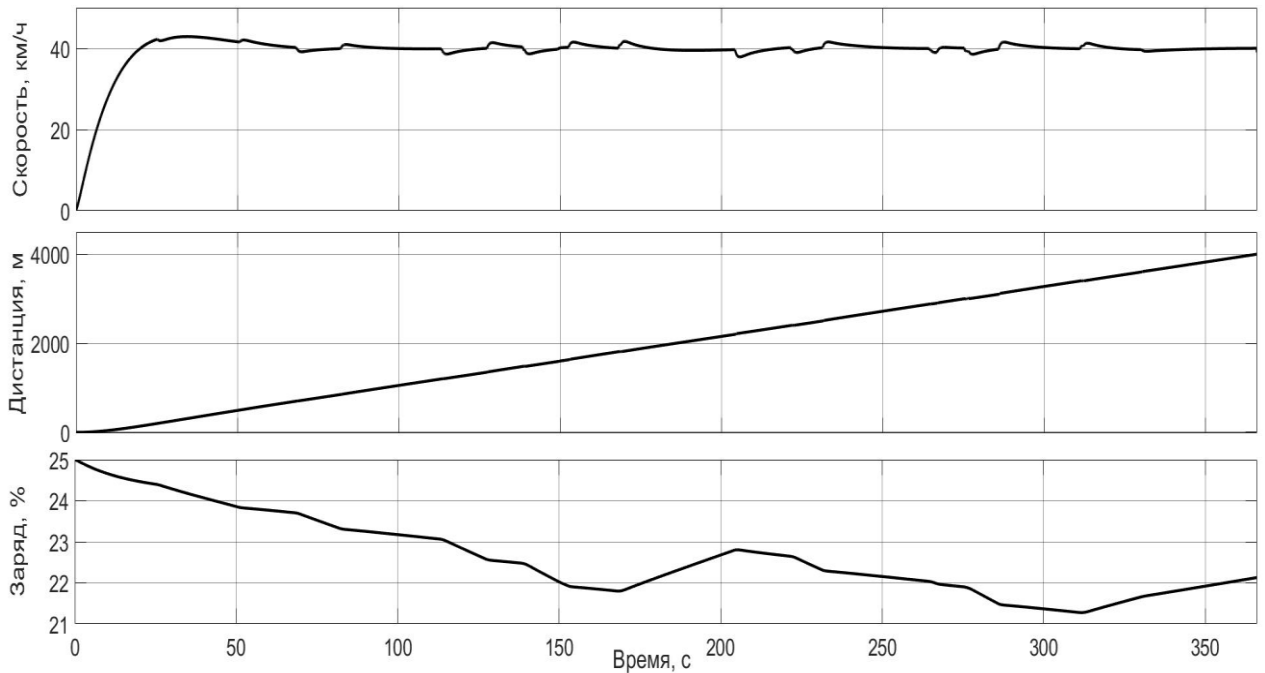


Рисунок 3.34 – Переходные процессы по скорости, пройденной дистанции и остаточному заряду батарей при прохождении цикла НАМИ системой управления на базе алгоритма нечеткой логики 40 км/ч и заряде батареи 25%

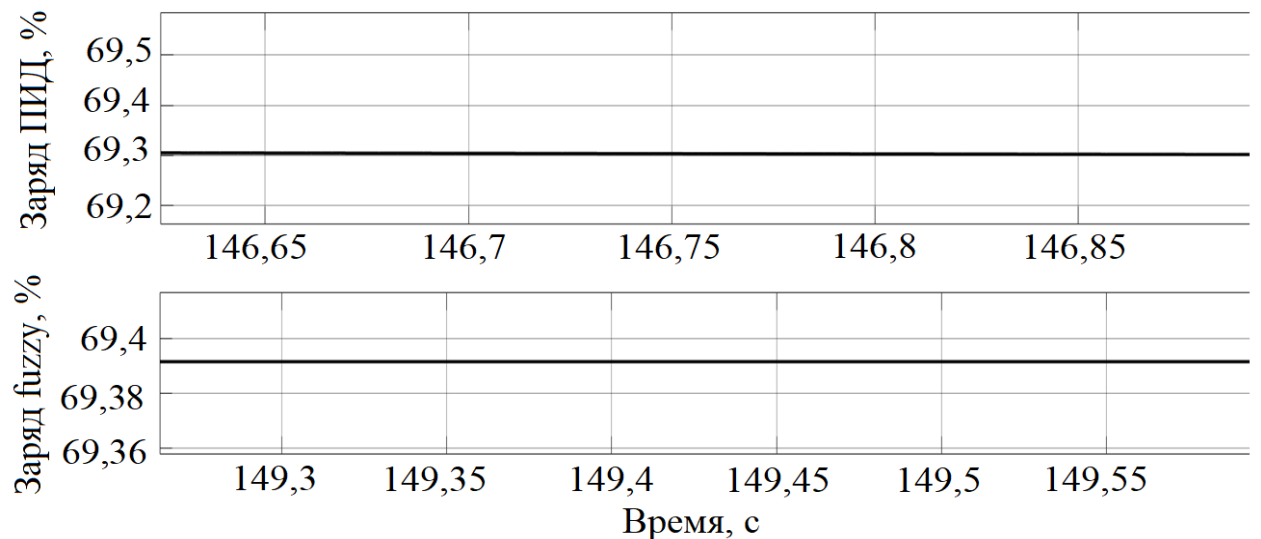


Рисунок 3.35 – Масштабированные переходные процессы по остаточному заряду батарей при прохождении цикла НАМИ системой управления на базе ПИД регулятора и на базе алгоритма нечеткой логики на скорости 100 км/ч и заряде батареи 75% соответственно

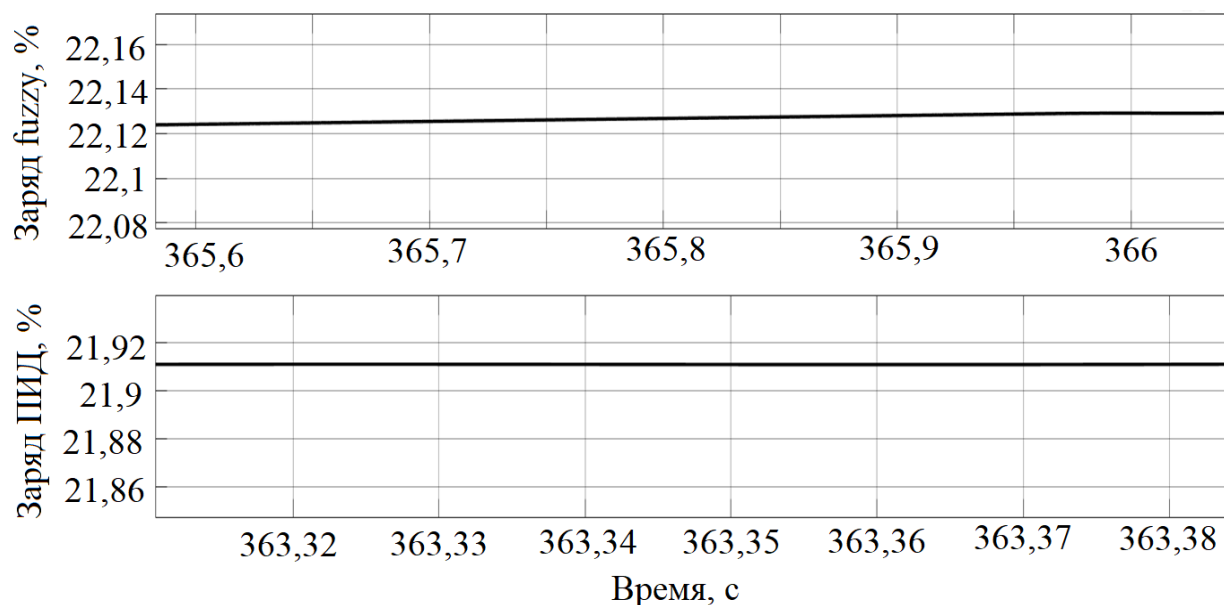


Рисунок 3.36 – Масштабированные переходные процессы по остаточному заряду батарей при прохождении цикла НАМИ системой управления на базе алгоритма нечеткой логики и на базе ПИД регулятора на скорости 40 км/ч и заряде батареи 25%

Результаты полного цикла испытаний приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – 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

Продолжение таблицы 3.6

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 3.6 позволяет сделать вывод, что для каждого из рассмотренных значений скорости максимальная экономия достигается при минимальном заряде аккумуляторной батареи. Значение экономии, рассчитанное по формуле () находится в диапазоне от 1,41 до 7,12%

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%. Переходные процессы по скорости, пройденной дистанции и остаточному заряду аккумуляторной батареи для 75% заряда на старте приведены на рисунке 3.37.

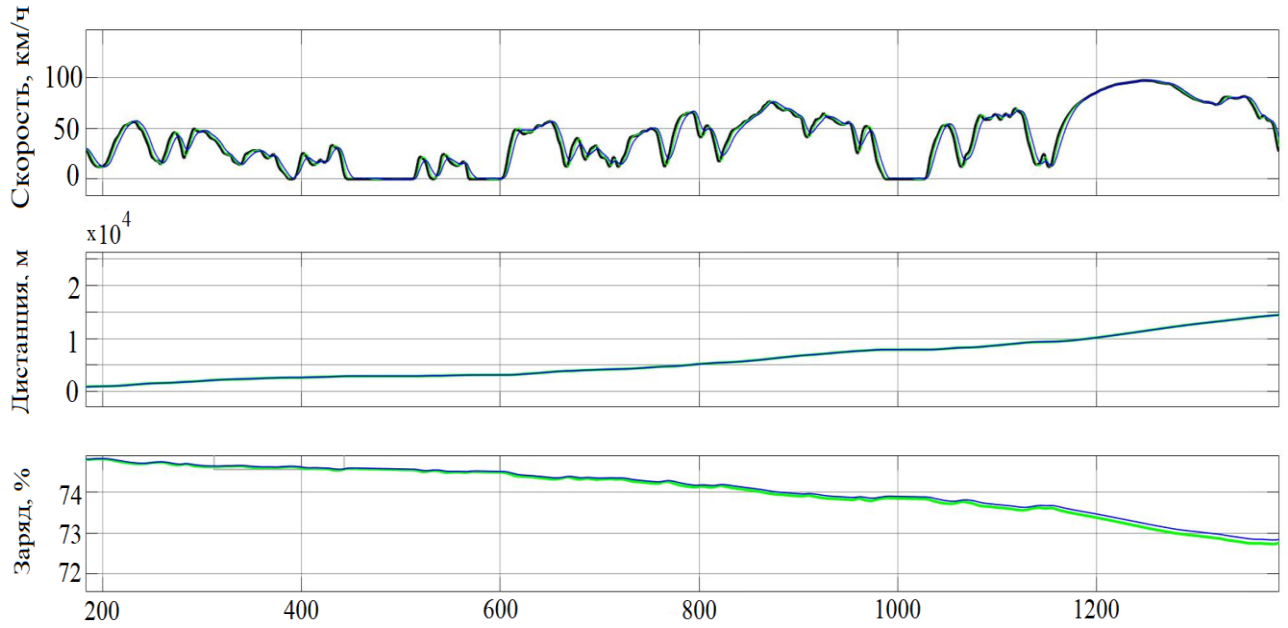


Рисунок 3.37 – Переходные процессы по скорости, пройденной дистанции и остаточному заряду батарей при прохождении цикла WLTC, где черный – сигнал задания линейной скорости, зеленый – система с ПИД регулятором, синий – система с нечетким регулятором

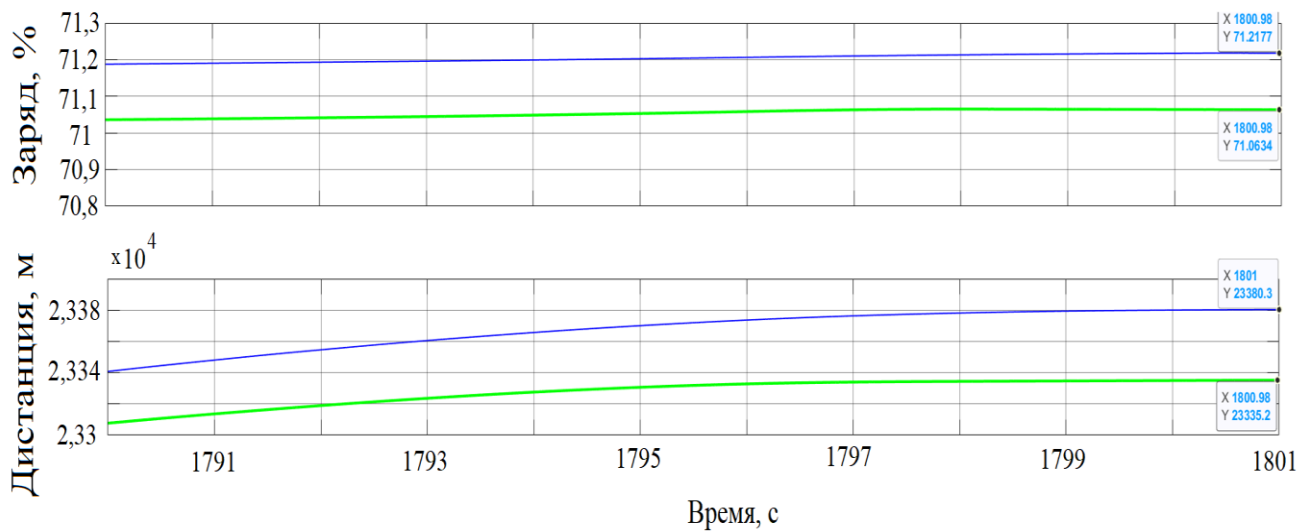


Рисунок 3.38 – Масштабированные переходные процессы по остаточному заряду батарей и пройденной дистанции при прохождении цикла WLTC, где зеленый – система с ПИД регулятором, синий – система с нечетким регулятором

Результаты испытаний по циклу движения WLTC приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – 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 3.7 позволяет сделать вывод, что для каждого из рассмотренных значений заряда аккумуляторной батареи на старте максимальная экономия достигается при 25%. Значение экономии, рассчитанное по формуле () находится в диапазоне от 3,9 до 4,11%.

Выводы по главе 3

В данной главе:

1. Разработана система стабилизации линейной скорости транспортного средства на базе ПИД – регулятора, рассчитанного по методике Циглера – Никольса.
2. Предложена методика испытаний электрического транспортного средства по циклу, составленному в соответствии с методическими указаниями НАМИ, представляющего собой изменение продольного профиля дорожного полотна.
3. Произведен выбор методики испытаний по циклу движения WLTC, который обусловлен анализом наиболее распространенных в мире циклов. Наиболее приближенным к реальному движению на городских дорогах общего пользования является именно цикл WLTC с наибольшим

максимальным ускорением (до $1,66 \text{ м/с}^2$) и наименьшим временем остановок – 13% от общего времени цикла. Высокая динамика способствует наибольшим энергозатратам на передвижение относительно других циклов.

4. Разработана система стабилизации линейной скорости транспортного средства на базе нечеткого регулятора, настроены функции распределения, построены поверхности отклика, выбран критерий оптимизации. Разработанная система позволяет с некоторым ухудшением динамических показателей работы машины снизить энергопотребление транспортного средства.

5. Проведено имитационное моделирование для оценки энергоэффективности рассмотренных систем. Определено значение относительной экономии заряда аккумуляторной батареи. 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%.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

4.1 Описание функциональной схемы испытательного стенда системы тягового электропривода безрельсового транспортного средства

Функциональная схема испытательного стенда представлена на рисунке 4.1.

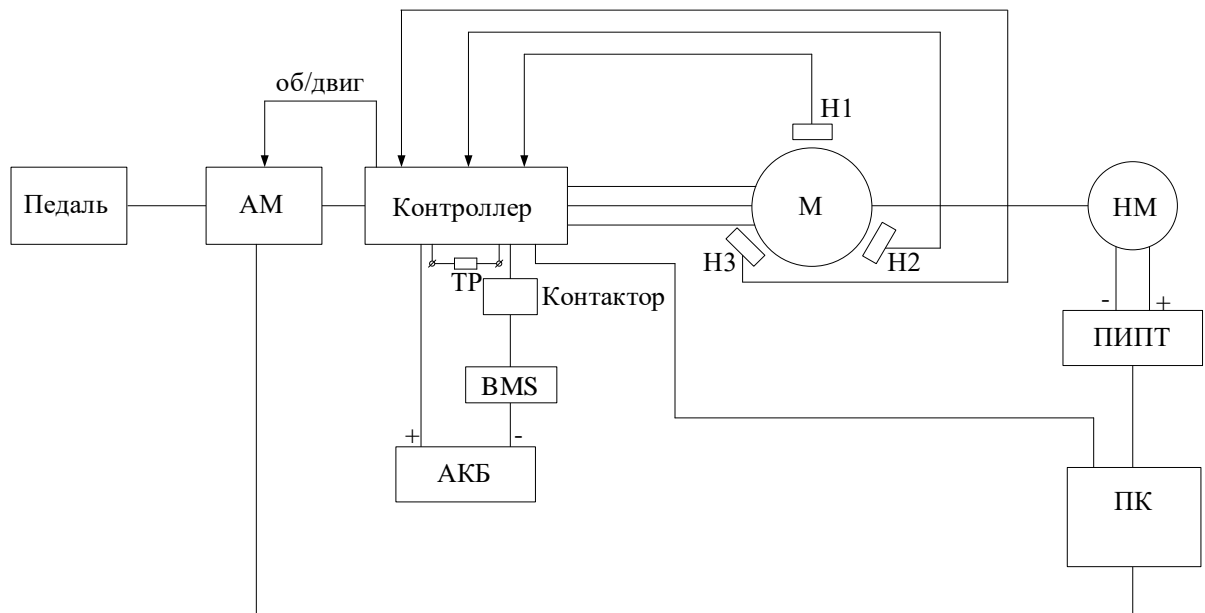


Рисунок 4.1 – Функциональная схема испытательного стенда

Испытательный стенд включает в себя:

- цифровую педаль;
- процессор Arduino Mega (АМ);
- бесколлекторный двигатель постоянного тока компании Golden Motor НРМ10-20KW (М);
- контроллер НРС500Н включает в себя также автономный инвертор напряжения. Данный преобразователь имеет внутренние датчики для отслеживания и исследования режимов работы привода;
- нагрузочную машину Magtrol (Hysteresis Dynamometer) НМ, представляющую собой гистерезисный тормоз;

- программируемый источник постоянного тока Sorensen DLM 16-185E;
- персональный компьютер (ПК);
- систему управления батареей (Battery Management System, BMS);
- аккумуляторную батарею (АКБ);
- тормозной резистор ТР;
- датчики Холла $H_1 - H_3$;

Для определения углового положения вала в двигатель встроены три датчика Холла. Для контроля температуры двигателя и его отключения в случае перегрева имеется встроенный датчик температуры. Сигналы с датчиков Холла и датчиков температуры обрабатываются контроллером и могут быть выведены на экран компьютера через USB-кабель с помощью прикладной программы Motor Control System. Интерфейс данной программы представлен на рисунке 4.2. С помощью данной программы возможно также программирование контроллера.

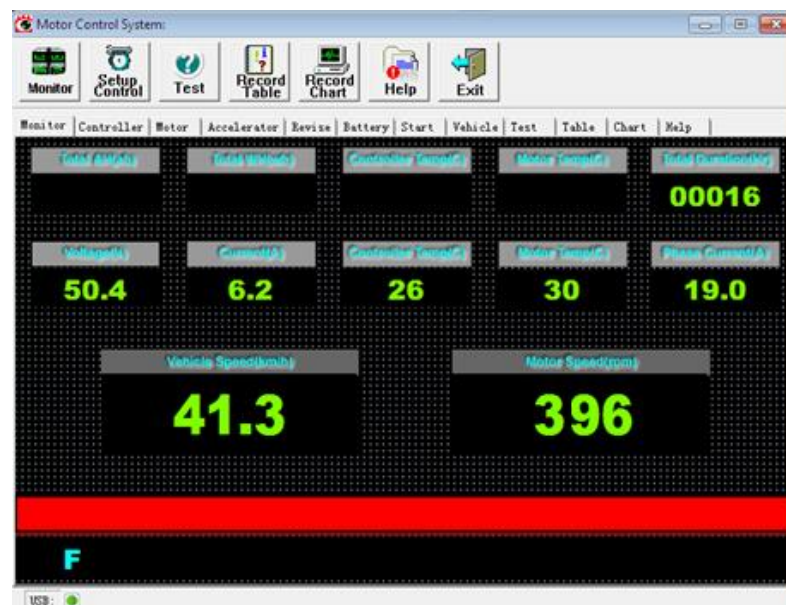


Рисунок 4.2 – Программное обеспечение MOTOR CONTROL SYSTEM для управления и снятия характеристик электродвигателя Golden Motor HPM10-20KW

В программе контроллера можно выбрать тип управления двигателем: с поддержанием момента либо с поддержанием скорости. Также возможно программирование следующих параметров:

- включение/выключение рекуперативного торможения;
- разрешено/запрещено реверсивное вращение;
- номинальное напряжение;
- защита от перезаряда;
- защита от переразряда;
- ток аккумуляторной батареи;
- пиковый фазный ток;
- максимальная частота вращения.

Характеристики контроллера НРС500Н представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики контроллера НРС500Н

Модель	НРС500Н
Напряжение	48 В
Постоянный ток	300 А
Максимальный фазный ток	500 А
Размеры (Д*Ш*В)	192x208x77 мм
Масса	2,9 кг

Регулирование момента сопротивления на двигателе осуществляется при помощи нагрузочной машины, ток в обмотке которой регулируется с помощью программируемого источника постоянного тока.

Внешний вид данной установки приведен на рисунке 4.3.

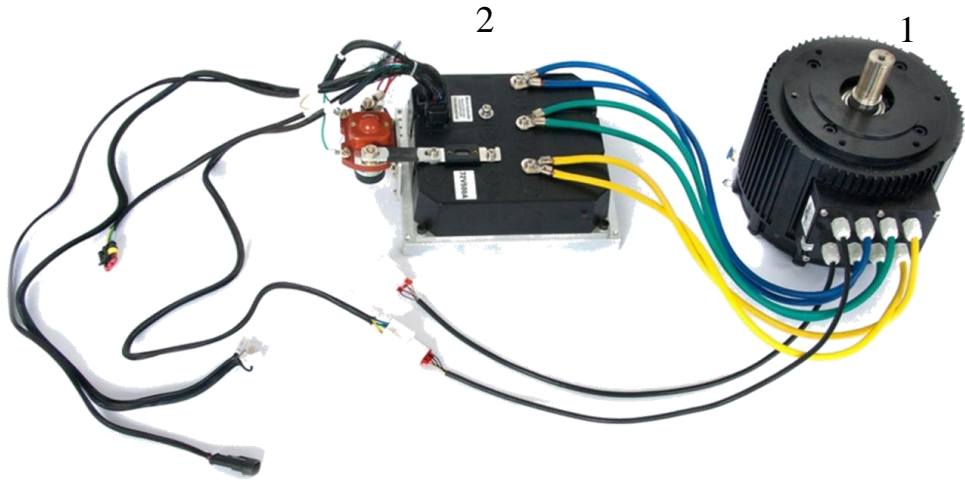


Рисунок 4.3 – Часть испытательного стенда

1 – Электродвигатель Golden Motor HPM10-20KW; 2 – Контроллер HPC500H

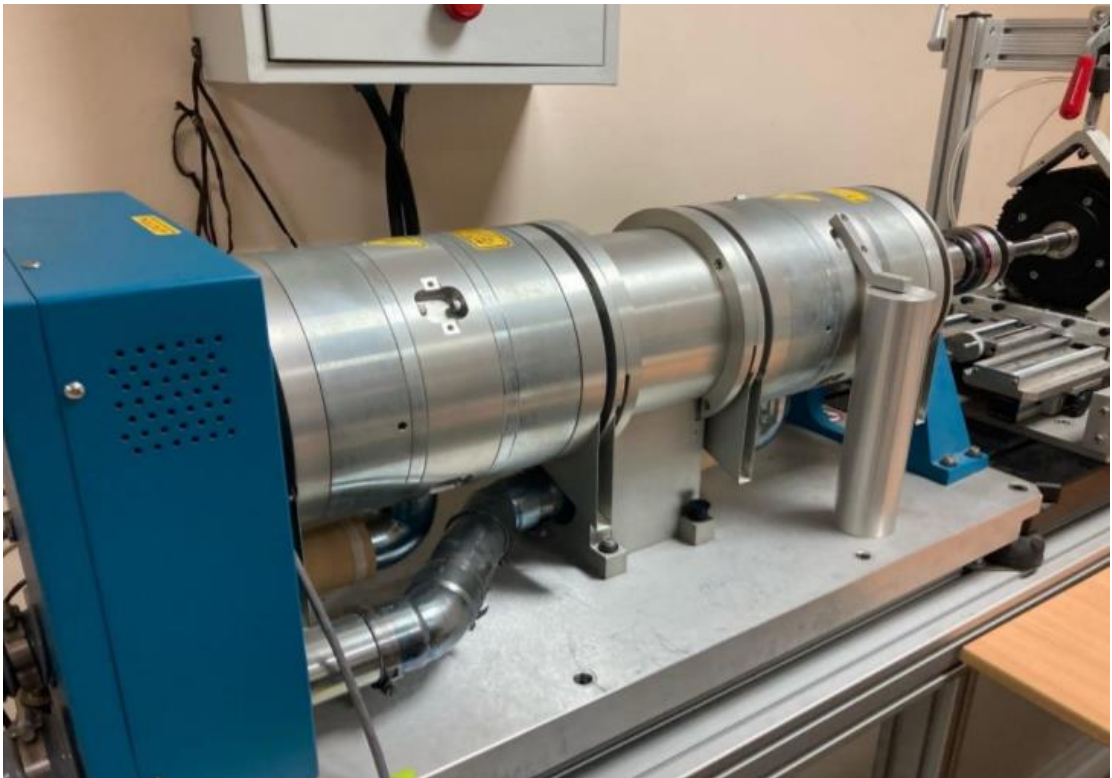


Рисунок 4.4 – Нагрузочная машина

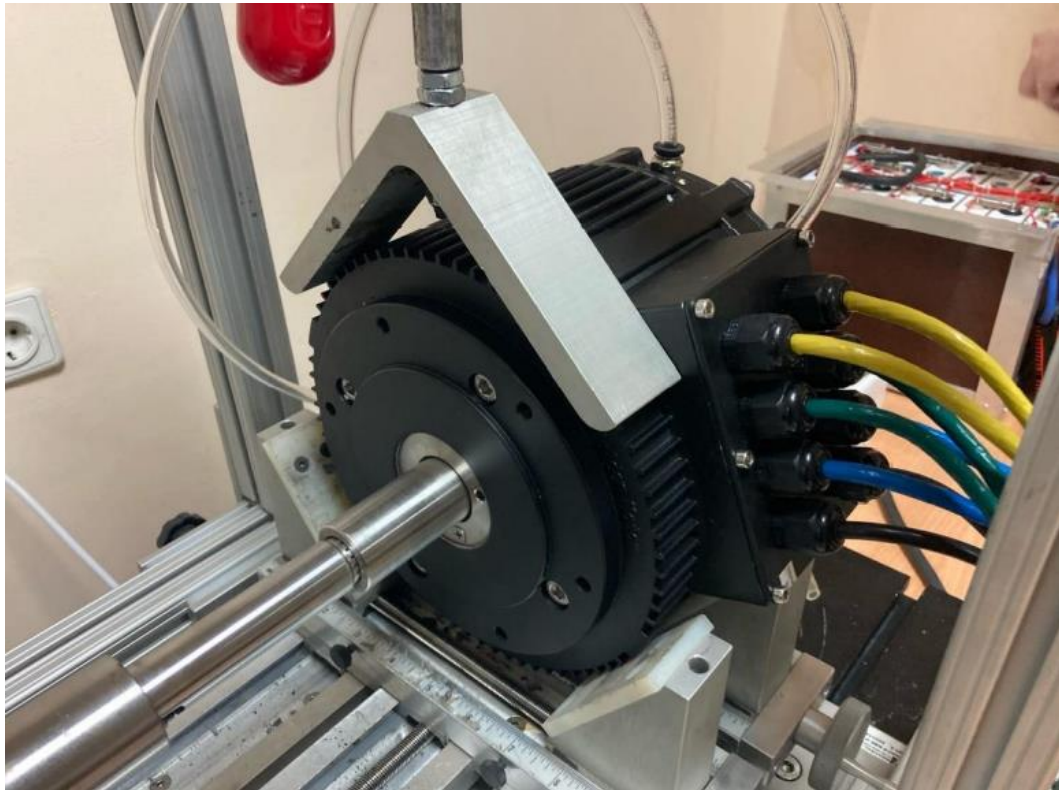


Рисунок 4.5 – Бесколлекторный двигатель постоянного тока, установленный на нагрузочный стенд



Рисунок 4.6 – Программируемый источник постоянного тока DLM 16-185E для питания обмотки нагрузочной машины

Программируемые DC-источники питания предназначены для обеспечения высокостабильного, непрерывно изменяемого выходного напряжения и тока для широкого спектра применений. Имеют выходное напряжение от 0-5 В до 0-600 В постоянного тока и диапазон тока от 0-5А до 0-450 А. Выходной среднеквадратичный шум составляет всего 10 мВ. Выход будет восстанавливаться до 1% от его установившегося напряжения в течение 1 мс для изменения ступенчатой нагрузки от 100% до 70% или от 70% до 100%.

4.2 Практическая реализация источника питания и нечеткого регулятора

Исходя из проведенного анализа тяговых источников тока, в качестве тяговых были выбраны литий-ионные аккумуляторные батареи. При анализе рынка накопителей энергии оптимальным вариантом был выбран один из типов литий-ионных аккумуляторов LiFePO_4 , параметры которого представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики аккумуляторной ячейки

Тип АКБ	Напряжение, В	Пиковый ток, А	Длительный ток, А	Емкость, А·ч	Вес, кг
LiFePO_4	3,2	400	270	95	1,88

Для того чтобы обеспечить необходимое напряжение тягового источника тока необходимо последовательно друг с другом соединить 16 аккумуляторных ячеек. Таким образом, тяговая аккумуляторная батарея будет иметь технические характеристики, представленные в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Технические характеристики аккумуляторной сборки

Тип АКБ	Напряжение, В	Пиковый ток, А	Длительный ток, А	Мощность, Вт·ч	Вес, кг
LiFePO_4	51,2	400	270	4560	30

Полученное количество ячеек необходимо надежно скомпоновать между собой для удобства безопасности проведения испытаний. Как говорилось ранее, для того чтобы продлить ресурс аккумуляторной батареи необходимо не допускать ее полного разряда.

Для обеспечения испытаний тяговой системы электрического транспортного средства необходимо обеспечить напряжение аккумуляторной сборки 48 В и емкость не менее 95 А·ч.

Одним из главных недостатков литий-ионных аккумуляторных батарей является их взрывоопасность. Врыв батареи может быть вызван коротким замыканием внутри аккумуляторной ячейки, перегревом аккумулятора, превышением максимально допустимых значений напряжения и тока в процессе заряда или разряда. Чтобы обезопасить себя во время испытаний необходимо скомпоновать аккумуляторные ячейки в один изолированный бокс, чертеж с указанием габаритных размеров которого представлен на рисунке 4.7.

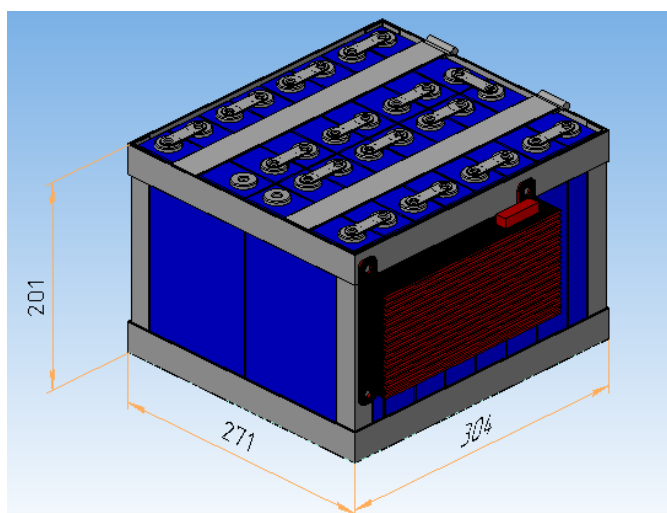


Рисунок 4.7 – Бокс для хранения аккумуляторной сборки

Реализовать бокс для хранения аккумуляторных ячеек было решено с помощью алюминиевого профиля толщиной 3 мм. Такая конструкция получится легкой, что является важным фактором, и надежной. Для предотвращения замыкания ячеек друг на друга, их необходимо изолировать

с помощью листов текстолита толщиной 0,5 мм. Стенки конструкции реализованы также с помощью текстолита, только толщиной 4 мм. Реализованная конструкция представлена на рисунке 4.8.

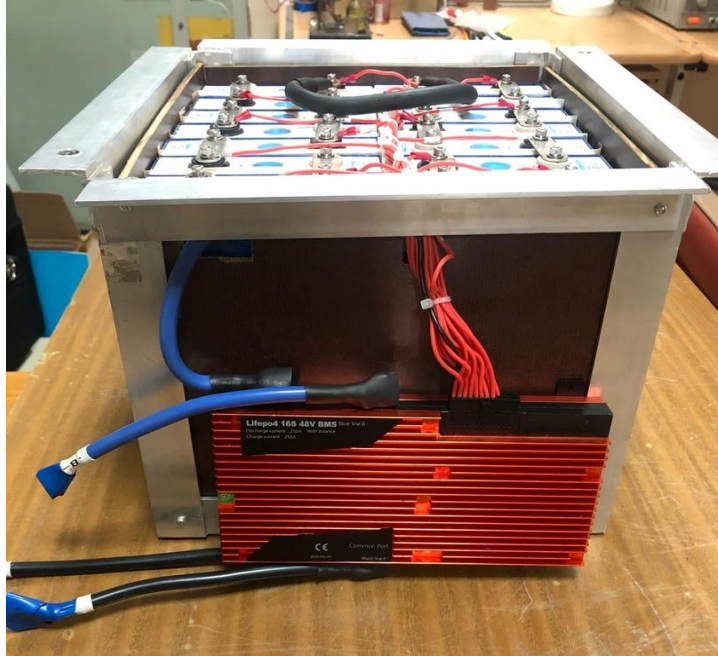


Рисунок 4.8 – Реализованный бокс для хранения тяговой аккумуляторной сборки

Как правило, в любой системе, включающей в себя несколько последовательно, параллельно или смешанно подключенных аккумуляторных ячеек, возможна разбалансировка заряда отдельных компонентов. Это может привести к перегреву, либо перезаряду какой-либо ячейки, что сокращает срок службы всей сборки аккумуляторов. При этом возможно возгорание или взрыв батареи. Это связано с тем, что не существует двух абсолютно одинаковых накопителей энергии, даже если они от одного производителя. Незначительная разница может заключаться в емкости или внутреннем сопротивлении ячейки, но при сборке батарей в один блок она только увеличивается. Корректная балансировка напряжения аккумуляторов является одним из путей увеличения безопасности эксплуатации блока батарей и увеличения их срока службы.

Проблему разбалансировки и не только поможет решить система управления батареей (Battery Management System, BMS). Помимо озвученной выше проблемы, такая система управления защищает блок батарей от повышенных нагрузок по току и напряжению, и обеспечивает корректный заряд, не допуская перезаряда отдельных ячеек. Все аккумуляторные батареи имеют свой рабочий диапазон напряжений, токов и температур и основная функция BMS – не позволять выходить параметрам за эти пределы.

Защита от перегрузок по току или короткого замыкания происходит посредством измерения напряжения, при коротком замыкании оно падает практически до нуля, плата быстро реагирует на это и отключает нагрузку. Защита от перегрева обеспечивается использованием терморезистора или других температурных датчиков. Эта функция используется редко, так как перегрев обычно связан с перегрузками по току или перезарядом, что предотвращают другие типы защиты. Функция балансировки бывает активной и пассивной. В случае пассивной балансировки аккумуляторные ячейки подзаряжают друг друга, тем самым выравнивая напряжение. При пассивной балансировке происходит разряд ячеек малым током на разрядные резисторы, подключенные параллельно каждой батарее, до одинакового уровня напряжения. Для тяговой аккумуляторной батареи предусмотрена плата системы управления, представленная на рисунке 4.9.

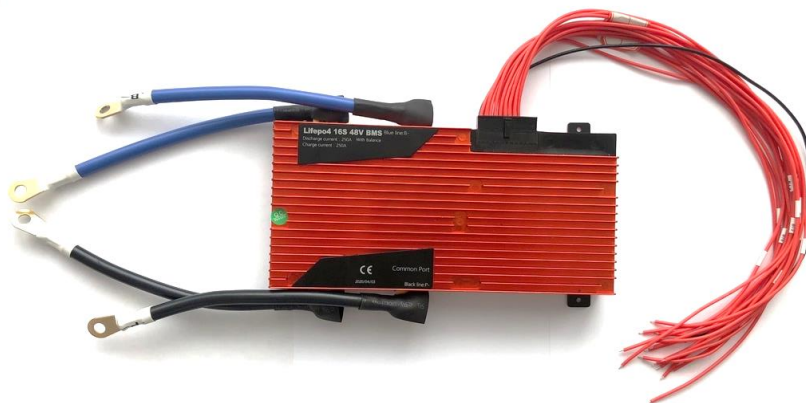


Рисунок 4.9 – Battery management system

Выбор платы BMS происходит по уровню напряжения, току разряда аккумуляторного блока и по количеству балансирующих каналов, которое определяет количество ячеек в сборке. Основные технические характеристики используемой системы управления представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Технические характеристики системы управления батареями

Тип BMS	Количество балансирующих каналов, шт	Напряжение, В	Ток разряда, А	Вес, кг
Плата для LiFePO4 (симметричная)	16	48	250	0,7

Зарядное устройство подбирается для осуществления максимально быстрого процесса заряда без нанесения вреда аккумуляторной батарее. Также, как и плата BMS, зарядное устройство должно обладать схемами защиты от перезаряда отдельных ячеек аккумуляторного блока и функцией балансировки. Для заряда блока аккумуляторных батарей, представленного выше, используется зарядное устройство, представленное на рисунке 4.10.



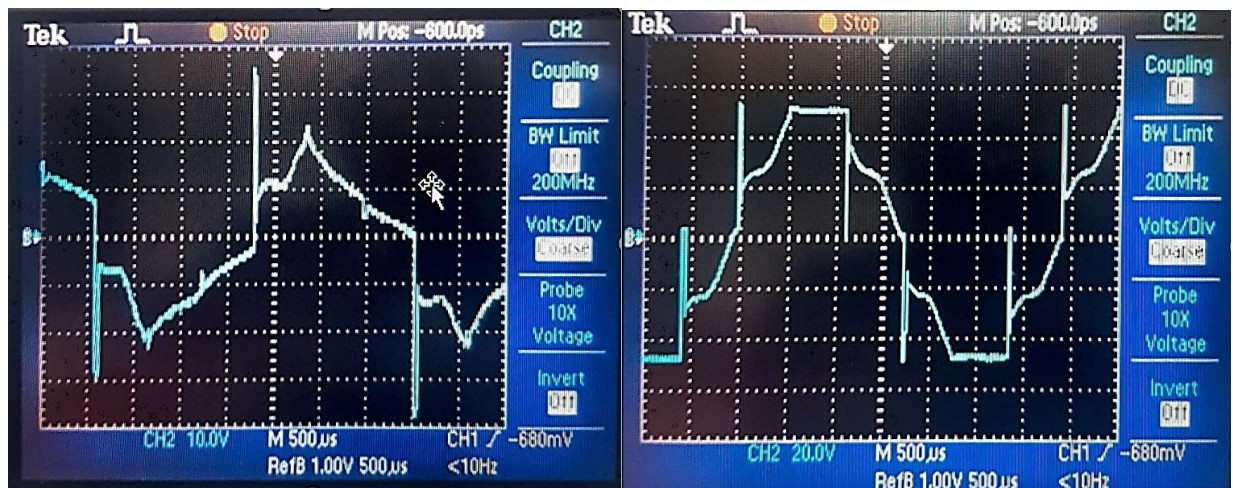
Рисунок 4.10 – Зарядное устройство

Зарядные устройства разрабатываются специально под каждый тип аккумуляторных батарей, учитывая химические особенности. Основные технические характеристики используемого зарядного устройства представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Технические характеристики зарядного устройства

Тип ЗУ	Ток заряда, А	Напряжение, В	Вес, кг
Для LiFePO4	Регулируемый от 2 до 12 А	58,4	2

В ходе проведения испытаний силовой установки транспортного средства, были получены осциллограммы напряжения на выходе контроллера НРС500Н, представленные на рисунке 4.11.



а

б

Рисунок 4.11 – Осциллограммы напряжения на выходе контроллера: а – фазное напряжение; б – линейное напряжение

Таким образом, имеются все необходимые составляющие для полноценной системы аккумулирования электроэнергии, которую можно использовать в испытательном стенде.

Реализация нечеткого регулятора осуществлялась через плату Arduino Mega, которая реплизована на микроконтроллере ATmega2560. Плата имеет 54 цифровых входов/выходов (14 из которых могут использоваться как

выходы ШИМ), 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта UART, кварцевый генератор 16 МГц, USB коннектор, разъем питания, разъем ICSP и кнопка перезагрузки. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля USB или подать питание при помощи адаптера AC/DC, или аккумуляторной батареи.

Таблица 4.6 – Характеристики Arduino Mega

Микроконтроллер	ATmega2560
Рабочее напряжение	5В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12В
Входное напряжение (предельное)	6-20В
Цифровые Входы/Выходы	54 (14 из которых могут работать также как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	16
Постоянный ток через вход/выход	40 mA
Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 mA
Флеш-память	256 КВ (из которых 8 КВ используются для загрузчика)
ОЗУ	8 КВ
Энергонезависимая память	4 КВ
Тактовая частота	16 MHz

Плата Arduino Mega способна получать питание как через подключение по USB разъему, так и от внешнего источника питания. Внешнее питание может быть подано через преобразователь напряжения AC/DC (блок питания)

или аккумуляторную батарею. Преобразователь напряжения подключается с помощью разъема 2.1 мм с положительным полюсом на центральном контакте. Провода от батареи подключаются к выводам Gnd и Vin разъема питания (POWER).

Платформа может работать при внешнем питании, находящимся в диапазоне от 6 В до 20 В. При напряжении питания ниже значения 7 В, вывод 5V может выдавать менее 5 В, при этом платформа будет работать нестабильно. При использовании напряжения выше значения 12 В регулятор напряжения может перегреться тем самым повредив плату. Рекомендуемый диапазон значения напряжения от 7 В до 12 В. Для обмена данными по USB используется микроконтроллер Atmega8U2, запрограммированный как конвертер USB-to-serial.

4.3 Обработка результатов эксперимента

На программируемом источнике постоянного тока формируется нагрузка, аналогичная предложенному испытательному циклу, представленному на рисунке 3.10.

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.

На рисунках 4.12 – 4.19 представлены характеристики, построенные по полученным архивам данных, которые отображают зависимости линейной скорости и заряда аккумуляторной батареи от времени при прохождении испытательного цикла для значения скорости 100 и 40 км/ч и заряда 75 и 25% соответственно, для системы с ПИД – регулятором и нечетким регулятором.

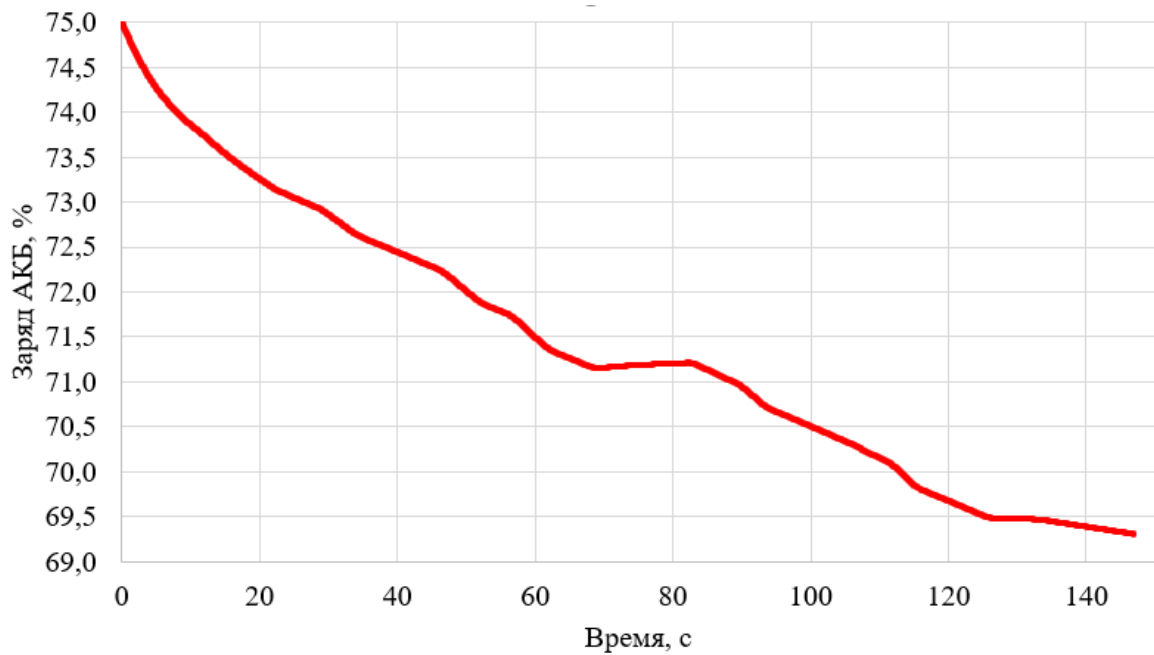


Рисунок 4.12 – Остаточный заряд батареи при прохождении испытательного цикла при начальном заряде 75% и скорости движения 100 км/ч для системы с ПИД – регулятором

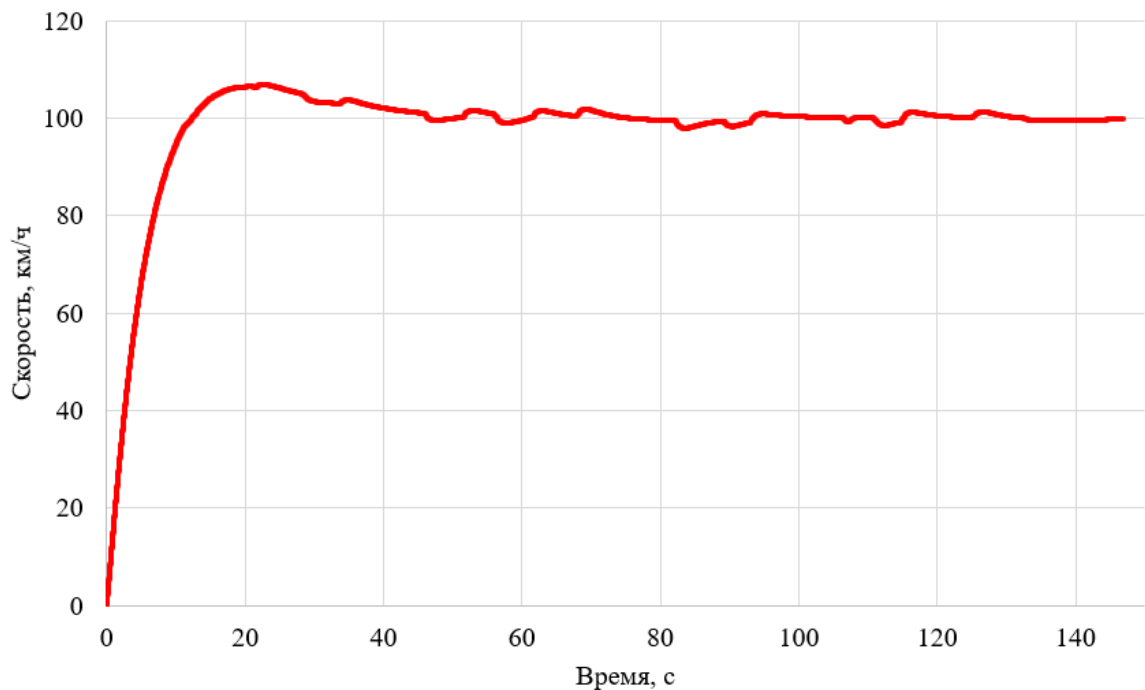


Рисунок 4.13 – Линейная скорость транспортного средства при прохождении испытательного цикла при начальном заряде 75% и скорости движения 100 км/ч для системы с ПИД–регулятором

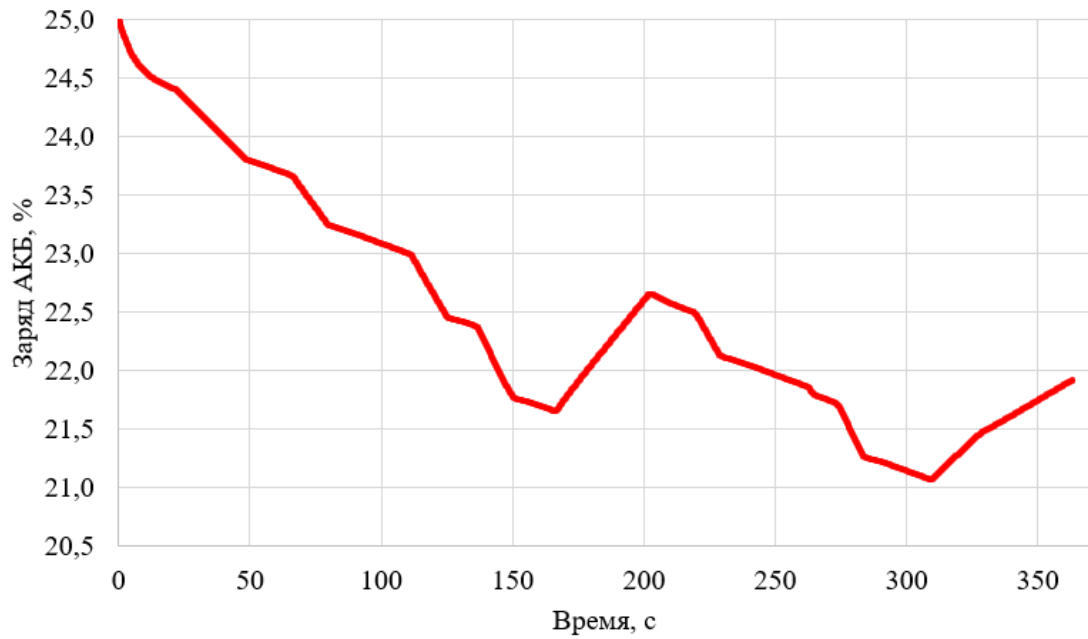


Рисунок 4.14 – Остаточный заряд батареи при прохождении испытательного цикла при начальном заряде 25% и скорости движения 40 км/ч для системы с ПИД-регулятором

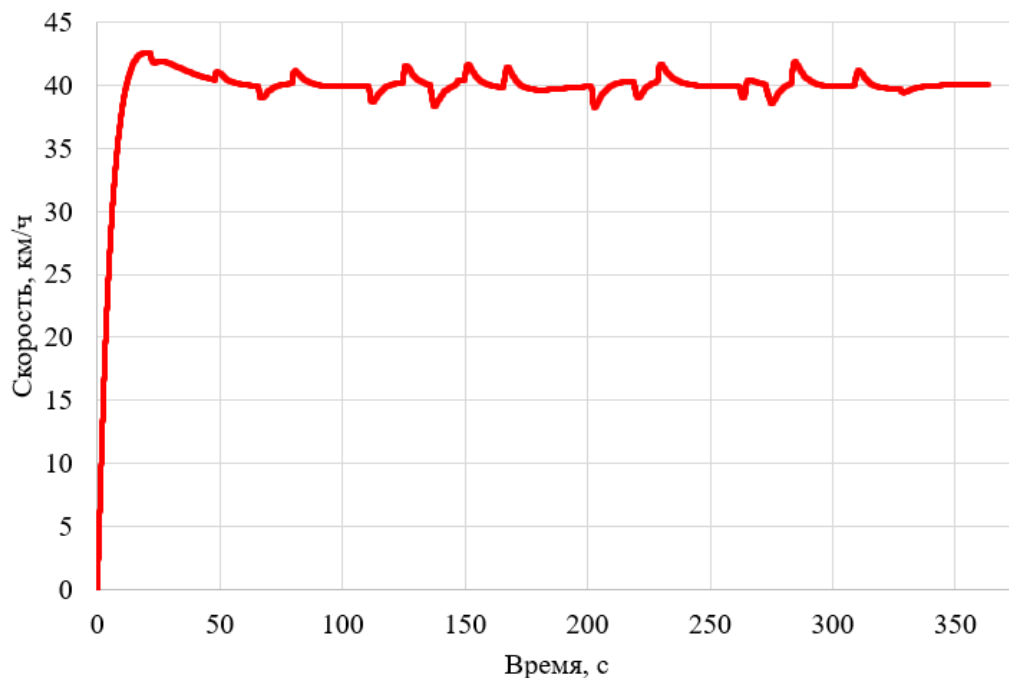


Рисунок 4.15 – Линейная скорость транспортного средства при прохождении испытательного цикла при начальном заряде 25% и скорости движения 40 км/ч для системы с ПИД-регулятором

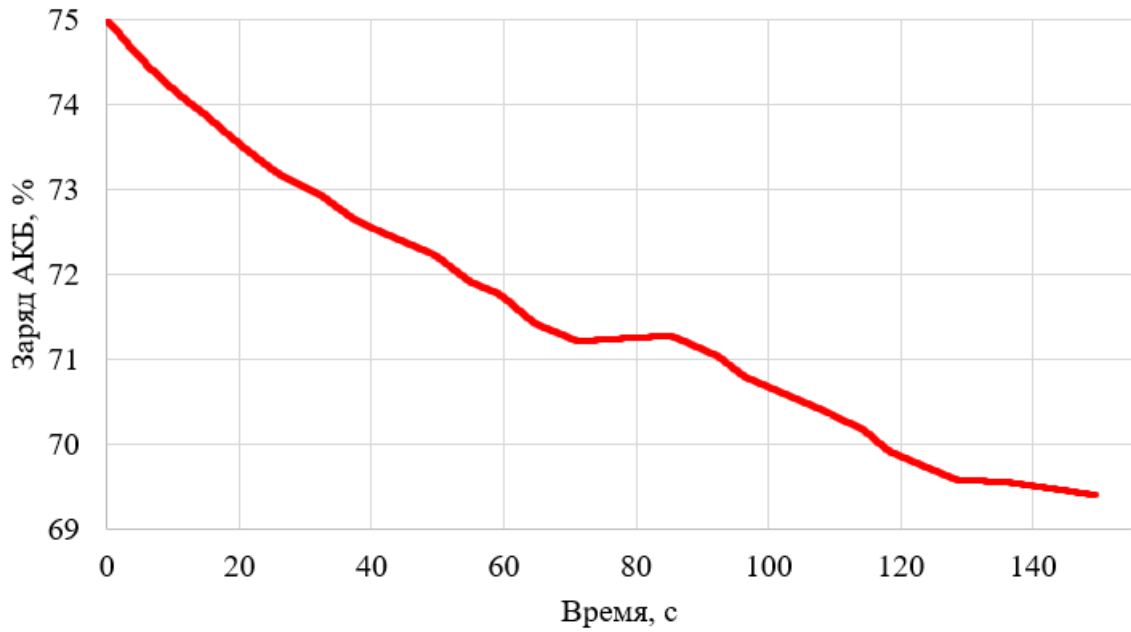


Рисунок 4.16 – Остаточный заряд батареи при прохождении испытательного цикла при начальном заряде 75% и скорости движения 100 км/ч для системы с нечетким регулятором

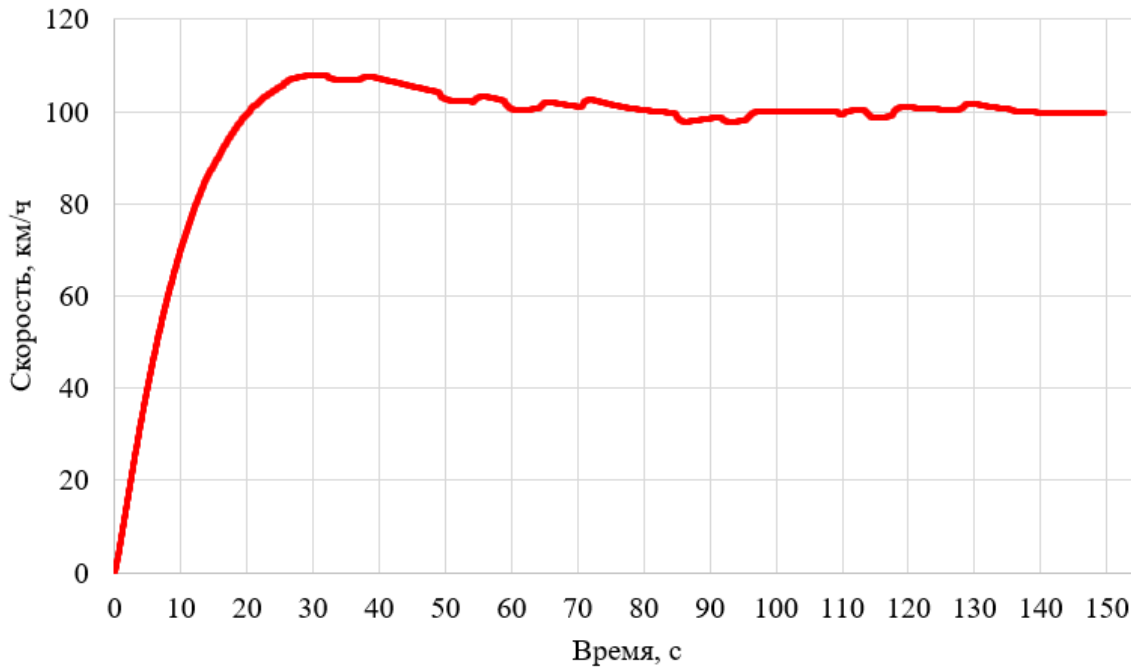


Рисунок 4.17 – Линейная скорость транспортного средства при прохождении испытательного цикла при начальном заряде 75% и скорости движения 100 км/ч для системы с нечетким регулятором

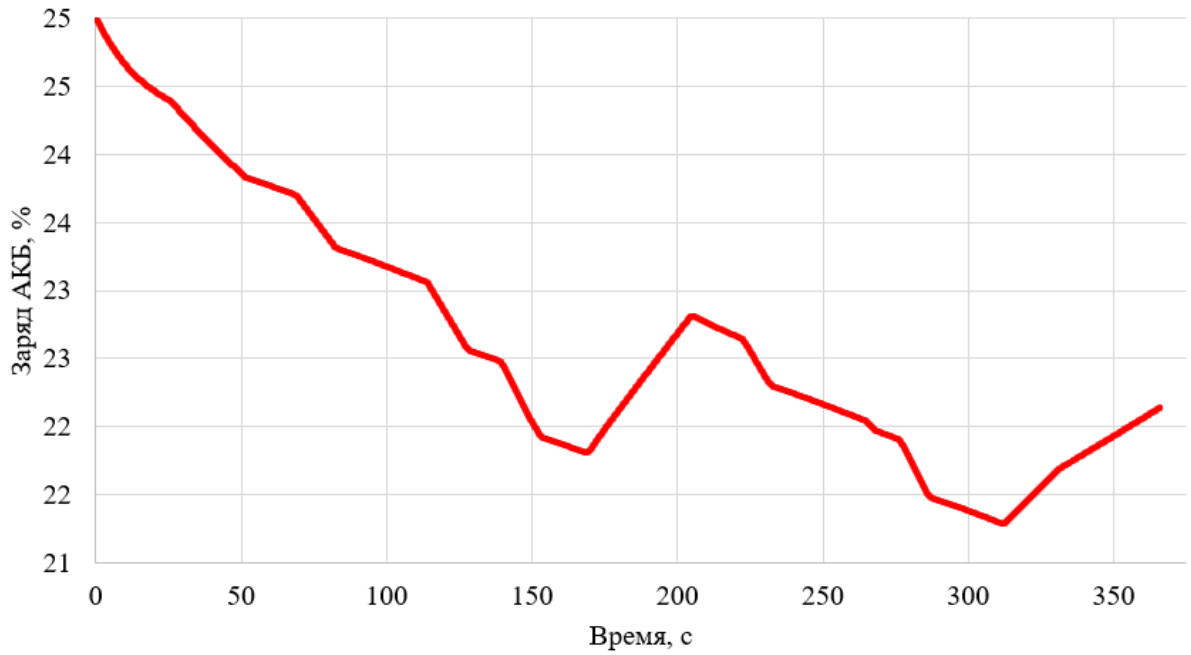


Рисунок 4.18 – Остаточный заряд батареи при прохождении испытательного цикла при начальном заряде 25% и скорости движения 40 км/ч для системы с нечетким регулятором

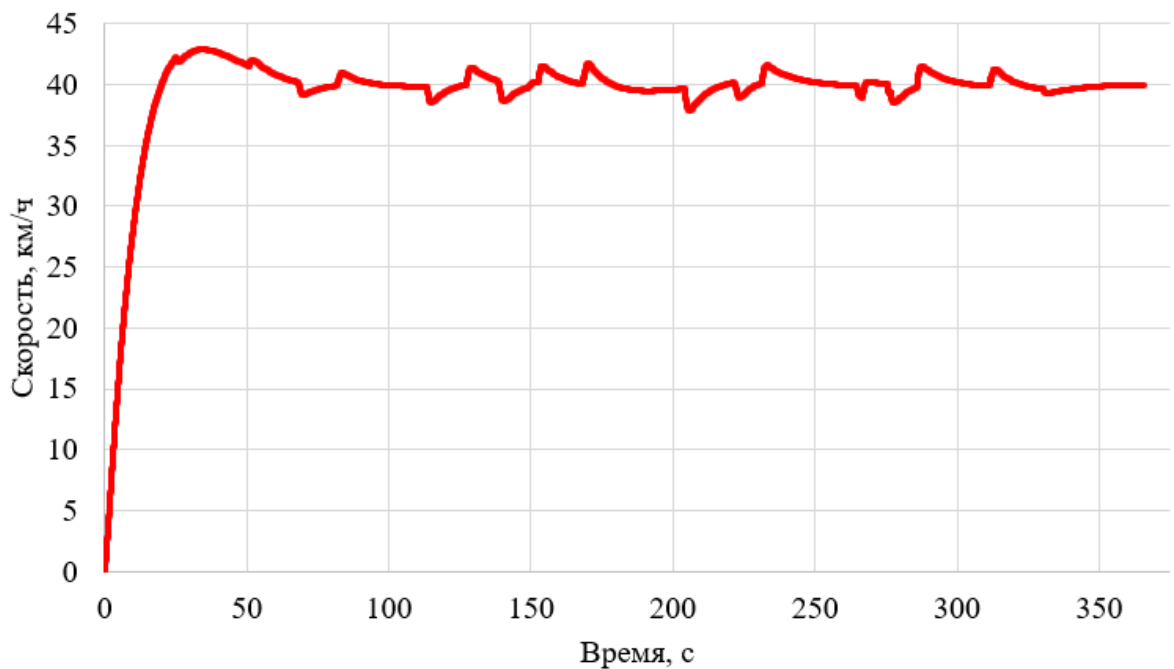


Рисунок 4.19 – Линейная скорость транспортного средства при прохождении испытательного цикла при начальном заряде 25% и скорости движения 40 км/ч для системы с нечетким регулятором

В таблице 4.7 представлен полный цикл результатов моделирования (М) и результатов эксперимента (Э).

Таблица 4.7 – Количественное сравнение результатов моделирования и эксперимента

Испытания на скорости 100 км/ч					
Заряд АКБ, %	Время ПИД, с М/Э	Время fuzzy, с М/Э	Расход ПИД, % М/Э	Расход fuzzy, % М/Э	Экономия, % М/Э
25	146,93/148,5	155,28/157	6,18/6,21	5,98/6,02	3,31/2,90
50	146,93/148	153,11/154	5,91/6,33	5,76/6,20	2,55/2,22
75	146,93/147,5	149,55/150,5	5,70/5,84	5,61/5,77	1,58/1,38
100	146,93/147,5	148,24/149,5	5,70/5,88	5,62/5,78	1,41/1,25
Испытания на скорости 60 км/ч					
Заряд АКБ, %	Время ПИД, с М/Э	Время fuzzy, с М/Э	Расход ПИД, % М/Э	Расход fuzzy, % М/Э	Экономия, % М/Э
25	243,14/246,5	251,24/254	3,78/4,01	3,58/3,88	5,29/4,98
50	243,14/246	247,11/250,5	3,84/4,14	3,65/3,94	4,94/4,67
75	243,14/246	246,58/248	3,94/4,22	3,79/4,08	3,88/3,62
100	243,14/245,5	246,11/247,5	3,94/4,27	3,86/4,15	2,14/2,01
Испытания на скорости 40 км/ч					
Заряд АКБ, %	Время ПИД, с М/Э	Время fuzzy, с М/Э	Расход ПИД, % М/Э	Расход fuzzy, % М/Э	Экономия, % М/Э
25	363,38/368,5	371,40/378,5	3,09/3,21	2,87/3,08	7,12/6,89
50	363,38/367	370,35/376,5	3,17/3,32	2,98/3,21	6,05/5,91
75	363,38/366,5	369,58/375,5	3,22/3,42	3,06/3,31	4,89/4,70
100	363,38/366	368,94/375	3,22/3,45	3,12/3,32	3,17/3,06

В таблице 4.8 приведено качественное сравнение результатов моделирования.

Таблица 4.8 – 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 4.7 и 4.8 позволяет сделать вывод, что значения, полученные в ходе эксперимента, соответствуют результатам моделирования с достаточной степенью точности.

Выводы по главе 4

В данной главе:

1. Предложена функциональная схема испытательного стенда для проверки результатов имитационного моделирования. Осуществлен выбор необходимого оборудования для реализации системы тягового электропривода транспортного средства.
2. Реализована аккумуляторная сборка с применением литий-ионных аккумуляторов LiFePO_4 , согласно обоснованию, приведенному во главе 1. Согласно требуемым параметра аккумуляторной батареи предложена конструкция аккумуляторной сборки.
3. Разработанные системы управления на базе ПИД – регулятора и нечеткого регулятора реализованы в физической модели безрельсового транспортного средства для проведения экспериментальных исследований и оценки результатов эффективности работы рассматриваемых алгоритмов.
4. Проведен сравнительный анализ результатов эксперимента и результатов имитационного моделирования. Данные эксперимента подтверждают, что применение нечеткого алгоритма позволяет повысить энергетическую эффективность транспортного средства на испытательном цикле НАМИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований предложены научно обоснованные решения по повышению энергетической эффективности системы тягового электропривода безрельсового транспортного средства.

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, представляющий собой физическую модель для исследования рабочих процессов в безрельсовом транспортном средстве. Выполнена интеграция разработанных алгоритмов в физическую модель и проведено их экспериментальное исследование по предложенной методике при движении по испытательному циклу НАМИ.

Имитационное моделирование прохождения испытательного полигона Euroring демонстрирует, что экономия энергии от применения электронного дифференциала составила 1,46 % по сравнению с механическим дифференциалом, мгновенная разница в значениях КПД достигала величины 5,1 %. Величина экономии заряда, согласно результатам имитационного моделирования, для при движении по циклу НАМИ для случая применения

алгоритма нечеткой логики с оптимизацией энергопотребления находится в диапазоне от 1,41 до 7,12%, для цикла движения WLTC в диапазоне от 3,9 до 4,11%, в сравнении с применением ПИД – регулятора в контуре стабилизации скорости движения. Экспериментальные данные имеют достаточную сходимость с данными имитационного моделирования. Что подтверждают относительные значения величин ошибки в результатах, полученных на базе имитационной и физической моделей безрельсового транспортного средства. Данные экспериментальных исследований подтверждают, что применение нечеткого алгоритма с оптимизацией энергопотребления 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенфельд В.Е. Основы электрической тяги / В.Е. Розенфельд, Е.В. Чеботарев, Н.Н. Сидоров, Н.А. Болдов; под ред. В. Е. Розенфельда. - Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1957. - 311 с.
2. Кутыловский, М. П. Электрическая тяга на городском транспорте / М.П. Кутыловский, Д. А. Сургучев. - Москва: Стройиздат, 1964. - 348 с.
3. Ефремов И.С. Теория и расчет электрического оборудования подвижного состава городского электрического транспорта / И.С. Ефремов, Г. В. Косарев. - Москва: Высшая школа, 1976. - 480 с.
4. Ефремов И.С. Теория и расчет тягового привода электромобиля / И.С. Ефремов - Москва: Высшая школа, 1984. - 383 с.
5. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. - Москва: Транспорт, 1982. - 528 с.
6. Феоктистов В.П. Анализ энергозатрат в перевозочном процессе на железнодорожном транспорте методом энергобаланса / Транспорт: наука, техника, управление. - Москва: ВИНТИ, 1992, №10. - С. 23 - 26.
7. Rufer A. Power-Electronic Interface for a Supercapacitor-Based Energy-Storage Substation in DC-Transportation Networks [Электронный ресурс] / Rufer A. // EPE Journal. - 2003. - Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/37436786_Power – загл. с экрана.
8. Варакин И.Н. Электробус и грузовик с электрохимическими конденсаторами в качестве единственного источника энергии [Электронный ресурс] /И.Н. Варакин, А.В. Дзенкевич, А.Д. Клементов - Режим доступа: <http://www.esma-cAppcom/FAQ/electrobus.pdf>.
9. Markel T. Energy storage system considerations for grid-charged hybrid electric vehicles [Электрон. ресурс] / Т. Markel, А. Simpson. - Режим доступа: <http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/38538.pdf> – загл. с экрана.
10. Markel T. Energy storage system requirements for hybrid fuel cell vehicles [Электронный ресурс] / Т. Markel, М. Zolot, К. В. Wipke, А. А. Pesaran. - Режим

доступа:

http://www.nrel.gov/transportation/energystorage/pdfs/aabc03_nrel_esfc_vr3.pdf – загл. с экрана.

11. Burke A. Review of ultracapacitor technologies for vehicle Applications [Электронный ресурс] / A. Burke. - Режим доступа: http://www.nesscAppcom/data_nesscap/papers/2001/Review%20of%20Ultracapacitor%20Technologies%20for%20Vehicle%20APPLICATION.pdf – загл. с экрана.

12. Kermani S. Predictive energy management for hybrid vehicle / Kermani S., Delprat S., Guerra T. M., Trigui R., Jeanneret B. // Control Engineering Practice. – Vol. 20 (2012). - P. 408 - 420.

13. Zilin Ma. Parameters Design for a Parallel Hybrid Electric Bus Using Regenerative Brake Model / Zilin Ma // Advances in Mechanical Engineering. – Vol. 2014. - Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/760815>.

14. Глушенков В.А. Тяговый привод троллейбуса с конденсаторным накопителем / В. А. Глушенков, М. А. Слепцов, А. А. Каледин. – Вестник ГЭТ России, 2004. – № 4 (61). - с. 2-6.

15. Щуров Н.И. Методы и средства экономии и повышения эффективности использования энергии в системе городского электрического транспорта: дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук: 05.09.03 / Щуров Николай Иванович. - Новосибирск, 2003. - 385 с.

16. Сопов В. И. Энергосберегающие мероприятия при эксплуатации трамваев и троллейбусов: коллективная монография / В. И. Сопов, Ю. А. Прокушев, А. А. Штанг; под. ред. В. Н. Аносова. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - С. 253 - 263.

17. М.В. Ярославцев Энергоэффективный тяговый привод городского безрельсового транспорта: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.09.03 / Ярославцев Михаил Викторович. - Новосибирск, 2016.

18. Штанг А.А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн.

наук: 05.09.03 / Штанг Александр Александрович. - Новосибирск, 2006. - 233 с.

19. Спиридонов Е.А. Повышение эффективности использования энергии в электротранспортных комплексах с накопительными устройствами: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.09.03 / Спиридонов Егор Александрович. - Новосибирск, 2009. - 165 с.

20. Аносов В.Н. Методы и средства повышения эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств : дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук: 05.09.03 / Аносов Владимир Николаевич. - Новосибирск, 2008. - 252 с.

21. Аносов В. Н. Повышение эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств: монография / В.Н. Аносов, В.М. Кавешников. - Новосибирск: Издательство НГТУ, 2014. - 218 с.

22. Аносов В.Н. Обоснование компоновки тяговой системы автономного электрического транспортного средства: сборник научных трудов / В.Н. Аносов, Н.С. Попов, В.И. Аниброев; под общ. ред А.В. Гадюкиной. - Новосибирск: Издательство НГТУ, 2019.

23. РАСПОРЯЖЕНИЕ ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ от 23 августа 2021 г. № 2290-р.

24. Larminie J. Electric vehicle technology explained / J. Larminie, J. Lowry. – Second Edition. 328 pages. Includes bibliographical references and index. ISBN 978-1-119-94273-3, TL220.L37 2012 629.2293 – dc23.

25. Espanet C. In-wheel motor for a small hybrid electric vehicle: design, realization and experimental characterization / C. Espanet // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). - 2012. - P. 892 - 898.

26. Jain M. Suitability analysis of in-wheel motor direct drives for electric and hybrid electric vehicles / M. Jain, S. S. Williamson // IEEE Electrical Power Energy Conference (EPEC). - 2009. - P. 1 - 5.

27. Zhitkova S. Design of an electrical motor with wide speed range for the in-wheel drive in a heavy-duty off-road vehicle / S. Zhitkova // International Conference on Electrical Machines (ICEM). - 2014. - P. 1076 - 1082.
28. Hicham El Hadraoui, Mourad Zegrari, Ahmed Chebak, Oussama Laayati, Nasr Guennouni. A Multi-Criteria Analysis and Trends of Electric Motors for Electric Vehicles. World Electric Vehicle Journal, MDPI, 28 p, World Electr. Veh. J. 2022, 13, 65. <https://doi.org/10.3390/wevj1304006>.
29. Qu R. Performance comparison of dual-rotor radial-flux and axial-flux permanent-magnet BLDC machines / R. Qu, M. Aydin, T. A. Lipo // IEEE International Electric Machines and Drives Conference, - 2003. IEMDC'03. Vol. 3. — IEEE. 2003. — P. 1948—1954.
30. Bader C. Electrical Propulsion Systems for Road Vehicles / C. Bader, H.G. Plust, - 1974.
31. Berman B. Propulsion Systems for Electric Cars / B. Berman, G. H. Gelb // IEEE Trans. Veh. Technol., 1974. vol. VT 23, P. 61 – 72.
32. Darshan U. COMPARISON OF ADVANCE AND CONVENTIONAL MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATION / U. Darshan, Thakar Dr. R.A. Patel., 978-1-7281-2068-3/19, 2019 IEEE.
33. Bader C. Advanced Motor Developments for Electric Vehicles / C. Bader, S. Wolfgang // IEEE Transactions On Vehicular Technology, - 1977. - P.123-128.
34. Mehrdad. Ehsani, Yimin Gao, and Stbastien Ga,” Characterization of Electric Motor Drives for Traction Applications”, IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468), ISBN: 0-7803-7906-3, pp 891 – 896.
35. M. Rahman Performance Analysis of Electric Motor. Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicle application / M. Rahman, M. Ehsani // Power Electronics in Transportation, 24 October 1996, DOI:10.1109/PET.1996.565909.
36. Benoudjit, A. New dual-airgap axial and radial-flux induction motor for on wheel drive electric propulsion systems / A. Benoudjit, N. Nait Said // POWERCON

- '98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.98EX151). Vol. 1. - 1998. – 615–619 vol.1.
37. Fei Xu. Characteristics analysis of multiple in-wheel-induction-motors drive system / Fei Xu, Liming Shi // 2011 IEEE International Conference on Industrial Technology. - 2011. - P. 121 - 126.
38. Громышева А. Д. Управление скоростью и моментом вентильного двигателя в приводе транспортного средства / А. Д. Громышева, И. Е. Овчинников, А. В. Егоров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2011. - 3 (73).
39. Y. Fan. Design, analysis and control of a permanent magnet in-wheel motor based on magnetic-gear for electric vehicles / Y. Fan [et al.] // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. - 2011. - P. 1-6.
40. Miyamasu M. Efficiency comparison between Brushless dc motor and Brushless AC motor considering driving method and machine design /M. Miyamasu, K. Akatsu // IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. - 2011. - P. 1830-1835.
41. Yee-Pien Yang. Design and control of axial-flux brushless DC wheel motors for electric Vehicles-part I: multiobjective optimal design and analysis /Yee-Pien Yang, Yih-Ping Luh, Cheng-Huei Cheung // IEEE Transactions on Magnetics. - 2004. - Vol. 40, no. 4. - P. 1873-1882.
42. Luk P. C. K. An In-Wheel Switched Reluctance Motor for Electric Vehicles / P. C. K. Luk, P. Jinupun // 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference. Vol. 3. - 2006. - P. 1-5.
43. Nanda G. A Survey and Comparison of Characteristics of Motor Drives Used in Electric Vehicles / G. Nanda, N. C. Kar // 2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. - 2006. - P. 811-814.
44. C. Bader Electrical Propulsion Systems for Road Vehicles / C. Bader, H. G. Plust // 3rd International Electric Vehicle Symposium. - 1974.

45. Сидоров, К.М. Перспективные системы тягового электрооборудования для транспортных средств / К.М. Сидоров, Т.В. Голубчик, В.Е. Ютт // Вестник МАДИ. - 2012. - № 1. - С. 56-63.
46. Баготский В.С. Химические источники тока / В.С. Баготский, А.М. Скундин. - М.: Изд-во Энергоиздат, 1981. - 360 с.
47. Таганова А.А. Герметичные химические источники тока: элементы и аккумуляторы, оборудование для испытаний и эксплуатации: справочник / А.А. Таганова, Ю.И. Бубнов, С.Б. Орлов. - СПб: Химиздат, 2005. - 264 с.
48. Хрусталева, Д. А. Аккумуляторы / Д.А. Хрусталева. – М.: Изд-во Изумруд, 2003. - 224 с.
49. Стойнов З.Б. Электрохимический импеданс / З.Б. Стойнов, Б.М. Графов, Б.С. Савова - Стойнова, В. В. Елкин. - М.: Изд-во «Наука», 1991. - 336 с.
50. Болотовский, В. И. Эксплуатация, обслуживание и ремонт свинцовых аккумуляторов / В.И. Болотовский, З.И. Вайсгант. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. - 196 с.
51. Roberge P.R. Non-destructive characterization of sealed nickel/cadmium battery cells with electrochemical impedance spectroscopy / P.R. Roberge, E. Hallop, G. Verville, J. Smit // J. Power Sources. – 1990. – № 32. – С. 261-270.
52. Скундин А.М., Современное состояние и перспективы развития исследований литиевых аккумуляторов / А.М. Скундин, О.Н. Ефимов, О.В. Ярмоленко // Успехи химии. - 2002 - №71 (4) - С. 378.
53. Каневский Л.С. Деградация литий-ионного аккумулятора и методы борьбы с ней / Л.С. Каневский, В.С. Дубасова // Электрохимия. - 2005. - №1. - С. 3-19.
54. Vangari M. Supercapacitors: Review of Materials and Fabrication Methods / M. Vangari, T. Pryor, L. Jiang // Journal of Energy Engineering. - 2013. - №139. - P. 72-79.
55. Miller J.R. Electrochemical Capacitors for Energy Management / J.R. Miller, P. Simon // Journal of Power Sources. – 2008. – №321. – P. 651-652.

56. Emission Test Cycles ECE 15 + EUDC / NEDC [Электронный ресурс] URL: http://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php (дата обращения: 10.10.2020).
57. Амосов А.А. Вычислительные методы для инженеров / Амосов А.А., Дубинский В.А., Копченова Н.В. - М.: Высш. шкч 1994. в 2 т. - 1994. - 544 с.: ил. 1 ЯВИ 5-06-000625-5.
58. Smart J.G. Extended Range Electric Vehicle Driving and Charging Behavior Observed Early in the EV Project / John G. Smart, Warren B. Powell // Conference: SAE World Congress 2013, The EV Project, DOI:10.4271/2013-01-1441
59. Haddoun F. SDTC neural network traction control of an electric vehicle without differential gears / Haddoun F. Khoucha M., Benbouzid H., Diallo D. // in Proc. IEEE VPPC, Arlington, TX, - 2007, P. 259-266.
60. Hori Y. Future vehicles driven by electricity and control research on four wheel motored –UOT electric march II / Hori Y. // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no. 5, 2004, P. 954-962.
61. Иоффе М.Л. Принцип Аккермана и его реализации в современных автомобилях. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, - 2021, № 9, С. 40–47, doi: 10.18698/0536-1044-2021-9-40-47.
62. Панкратов В.В., Адаптивные алгоритмы бездатчикового векторного управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов / В.В. Панкратов, Д.А. Котин. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. - 150 с.
63. Панкратов В. В. Избранные разделы теории автоматического управления : учеб. пособие / В.В. Панкратов, О.В. Нос, Е.А. Зима. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. - 223 с. (Серия «Учебники НГТУ»).
64. Леликов О.П. Основы расчета и проектирования деталей и узлов машин. Конспект лекций по курсу «Детали машин». - М.: Машиностроение, 2004. - 440 с.

65. Md Mahmud Control BLDC Motor Speed using PID Controller / Md Mahmud, S. M. A. Motakabber, A. H. M. Zahirul Alam, Anis Nurashikin Nordin // (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 11, No. 3, - 2020.
66. Amanda Danielle O. da S. Dantas , André Felipe O. de A. Dantas , João Tiago L. S. Campos ,Domingos L. de Almeida Neto , and Carlos Eduardo T. Dórea PID Control for Electric Vehicles Subject to Control and Speed Signal Constraints Received 1 June 2018; Accepted 19 July 2018; Published 1 August 2018.
67. Munyaneza O. Speed control design for a vehicle system using fuzzy logic and PID controller / Olivier Munyaneza, Bernard B. Munyazikwiye, Hamid Reza Karimi // Proceedings of 2015 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY) The Evergreen Resort Hotel (Jiaosi), Yilan, Taiwan, Nov. 18-20, - 2015.
68. Макаров И.М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов; Отд-ние информ. технологий и вычисл. систем РАН. - М.: Наука, 2006. - 334 с.
69. Круг Е.К. Цифровые регуляторы: научное издание / Е.К. Круг, Т.М. Александриди, С.Н. Дилигенский. - Москва; Ленинград: Энергия, 1966. - 504 с.
70. Аносов В. Н. 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. - Текст : непосредственный // Вопросы электротехнологии = Journal of electrotechnics : науч.-техн. журн.. - 2021. – № 4 (33). – С. 65–73.
71. Изерман Р. Цифровые системы управления: научное издание / Р. Изерман; пер.: С.П. Забродин, А.И. Титков, А.В. Шалашов. - Москва: Мир, 1984. - 541 с.
72. Gene F. Feedback Control of Dynamic Systems / Gene F., Powell D., Emami-Naeine A. // Addison-Wesley Publishing Company, 1987.

71. Местечкина Г. Рекомендации по применению DC/DC-преобразователей компании RECOM / Г. Местечкина // Источники питания. - 2007. - № 1. - С. 22-25.
72. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника / Г.А. Месяц. - Москва: Наука, 2004. - 74 с.
73. Иванов А.М., Кристальный С.Р., Попов Н.В., Спинов А.Р. Испытания колёсных транспортных средств: учебное пособие / А.М. Иванов, С.Р. Кристальный, Н.В. Попов, А.Р. Спинов. - М.: МАДИ, 2018. - 124 с.
74. Ветров Ю. Топливная экономичность. // Авторевию. - 2014.- №10.
75. EmissionTestCyclesECE 15 + EUDC / NEDC [Электронный ресурс] URL: http://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php (дата обращения: 10.10.2017).
76. Federal Test Procedure Revisions [Электронный ресурс] URL: <http://www.epa.gov/OMS/sftp.htm> (дата обращения: 15.10.2017).
77. WLTC methodology [Электронный ресурс] URL: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2011/wp29grpe/WLTP-DHC-06-03r1e.pdf> (дата обращения: 10.10.2020).
78. Автомобиль с комбинированной силовой установкой. Результаты и методика испытаний / А.Л. Карунин, С.В. Бахмутов, В.В. Селифонов, М.Е. Вайсблум, Е.Е. Баулина, К.Е. Карпухин // Автомобильная промышленность. - 2007. - № 7. - с. 6 - 9.
79. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 “О безопасности колесных транспортных средств”, Проспект - Москва, 2011. - 856 с.
80. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID Control, The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2005. - 461 p. - ISBN 978-1556179426.
81. L.A. Zadeh Fuzzy sets, Information and Control 8, 338 - 353, 1965, p. 16.
82. Lv, Y.-M.; Yuan, H.-W.; Liu, Y.-Y.; Wang, Q.-S. Fuzzy logic-based Energy management system of battery-ultracapacitor composite power supply for HEV. In Proceedings of the 2010 First International Conference on Pervasive Computing,

Signal Processing and Applications, Harbin, China, 17-19 September 2010; pp. 1209-1214.

83. Sathishkumar P.; Piao S.; Khan M.A.; Kim D.H.; Kim M.S.; Jeong D.K.; Lee C.; Kim H.J. A Blended SPS-ESPS Control DAB-IBDC Converter for a Standalone Solar Power System. *Energies* 2017, 10, 1431.

84. Hussain S.; Ali M.U.; Park G.-S.; Nengroo S.H.; Khan M.A.; Kim H.-J. A Real-Time Bi-Adaptive Controller-Based Energy Management System for Battery–Supercapacitor Hybrid Electric Vehicles. *Energies* 2019, 12, 4662.

85. Yin H.; Zhou W.; Li M.; Ma C.; Zhao C. An adaptive fuzzy logic-based Energy management system on battery / ultracapacitor hybrid electric vehicles. *IEEE Trans. Transp. Electrif.* 2016, 2, 300-311.

86. Khan M.A.; Krishna T.N.V.; Sathishkumar P.; Sarat G.; Kim H.-J. A hybrid power supply with fuzzy controlled fast charging strategy for mobile robots. In *Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technology Robotics (ICT-ROBOT 2016)*, Busan, Korea, 7-9 September 2016.

87. Ali M.U.; Kamran M.A.; Kumar P.S.; Himanshu; Nengroo S.H.; Khan M.A.; Hussain A.; Kim H.-J. An Online Data-Driven Model Identification and Adaptive State of Charge Estimation Approach for Lithium-ion-Batteries Using the Lagrange Multiplier Method. *Energies* 2018, 11, 2940.

88. Salmasi F.R. Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2007, 56, 2393-2404.

89. Gao C.; Zhao J.; Wu J.; Hao X. Optimal fuzzy logic-based Energy management system of battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles. In *Proceedings of the 2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, Guilin, China, 12–15 June 2016; pp. 98-102.

90. Hellendoorn H.; Palm R. Fuzzy system technologies at Siemens R & D. *Fuzzy Sets Syst.* 1994, 63, 245-269.

91. Marzougui H.; Kadri A.; Martin J.-P.; Amari M.; Pierfederici S.; Bacha F. Implementation of Energy management system of hybrid power source for electrical vehicle. *Energy Convers. Manag.* 2019, 195, 830-843.
92. Yin H.; Zhao C.; Li M.; Ma C. Optimization based energy control for battery/SC hybrid energy storage systems. In *Proceedings of the IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 10–13 November 2013*; pp. 6764-6769.
93. Zheng C.; Li W.; Liang Q. An Energy management system of hybrid energy storage systems for electric vehicle applications. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2018, 9, 1880-1888.
94. Sabri M.F.M.; Danapalasingam K.A.; Rahmat M.F.A. Improved fuel economy of through-the-road hybrid electric vehicle with fuzzy logic-based energy management strategy. *Int. J. Fuzzy Syst.* 2018, 20, 2677-2692
95. Shengzhe Z.; Kai W.; Wen X. Fuzzy logic-based control strategy for a battery/supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles. In *Proceedings of the 2017 Chinese Automation Congress (CAC), Jinan, China, 20–22 October 2017*; pp. 5598-5601.
96. Ma K.; Wang Z.; Liu H.; Yu H.; Wei C. Numerical investigation on fuzzy logic control Energy management system of parallel hybrid electric vehicle. *Energy Procedia* 2019, 158, 2643-2648.
97. Sellali M.; Betka A.; Drid S.; Djerdir A.; Allaoui L.; Tiar M. Novel control implementation for electric vehicles based on fuzzy-back stepping approach. *Energy* 2019, 178, 644-655.
98. Singh K.V.; Bansal H.O.; Singh D. A comprehensive review on hybrid electric vehicles: Architectures and components. *J. Mod. Transp.* 2019, 27, 77-107.
99. Xiong R.; Chen H.; Wang C.; Sun F. Towards a smarter hybrid energy storage system based on battery and ultracapacitor - A critical review on topology and energy management. *J. Clean. Prod.* 2018, 202, 1228-1240.

100. Khan M.A.; Krishna T.N.V.; Sathishkumar P.; Sarat G.; Kim H.-J. A hybrid power supply with fuzzy controlled fast charging strategy for mobile robots. In Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technology Robotics (ICT-ROBOT 2016), Busan, Korea, 7–9 September 2016.
101. Kasimalla V.K.; Velisala V. A review on energy allocation of fuel cell/battery / ultracapacitor for hybrid electric vehicles. *Int. J. Energy Res.* 2018, 42, 4263-4283.
102. Кучер Е.С., Блинов А.А., Сидоров Г.С., Попов Н.С. Сигнально-адаптивная система управления асинхронным электроприводом - Текст : непосредственный // *Электротехника*, 2022, №5, стр. 24-29.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
КАНДИДАТСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ И ДОКУМЕНТЫ АВТОРСКОГО
ПРАВА**

“УТВЕРЖДАЮ”

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»

кандидат экономических наук, доцент

С.С. Чернов

« 5 » _____ 2022 г.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Попова Н.С.
«Повышение энергетической эффективности системы тягового
электропривода безрельсового транспортного средства»

Настоящим актом подтверждается, что основные результаты диссертационной работы аспиранта кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок (ЭАПУ) Новосибирского государственного технического университета Попова Никиты Сергеевича, в том числе алгоритмы управления тяговым электроприводом, используются в учебном процессе кафедры ЭАПУ НГТУ:

- 1) при проведении лекционных и практических занятий по дисциплине «Автоматическое управление системами мехатроники» для магистрантов факультета мехатроники и автоматизации, обучающихся по направлению 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника», магистерская программа: Мехатронные и автоматизированные комплексы и системы;
- 2) в научно исследовательской работе бакалавров и магистрантов.

Декан ФМА НГТУ,
к.т.н., доцент

 М.Е. Вильбергер

Заведующий кафедрой ЭАПУ НГТУ,
к.т.н., доцент

 Д.А. Котин

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022617250

**Программа расчета параметров регулирования
задающего воздействия для оптимального разряда
аккумуляторных батарей электромобиля**

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(RU)**

Авторы: **Аносов Владимир Николаевич (RU), Попов Никита
Сергеевич (RU)**

Заявка № 2022616754

Дата поступления **19 апреля 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **19 апреля 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94e6bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 2.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов