

На правах рукописи



ДЕДОВ СЕРГЕЙ ИГОРЕВИЧ

**Повышение энергоэффективности силовой
гибридной установки автономного
транспортного средства**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск 2022

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

- Научный руководитель: **Щуров Николай Иванович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой Электротехнических комплексов.
- Официальные оппоненты: **Пантелеев Василий Иванович**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Сибирский
федеральный университет», кафедра
Электроэнергетики, заведующий кафедрой;
Лукутин Борис Владимирович,
доктор технических наук, профессор, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
Исследовательский Томский политехнический
университет», Отделение электроэнергетики и
электротехники, профессор.
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Москва.

Защита диссертации состоится «12» сентября 2022 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

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

Автореферат разослан «__» июля 2022 г.

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



Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные тенденции развития автомобильной индустрии направлены на увеличение выпуска транспортных средств, оснащенных гибридной или полностью электрической энергоустановкой. По постановлению Правительства Российской Федерации №2290р утверждена концепция развития производства и использования электрического автомобильного транспорта на период до 2030 г. Согласно концепции, на первом этапе в период с 2021 по 2024 гг. одним из ключевых показателей является производство не менее 25 тыс. электротранспортных средств (ЭТС), а на втором - в период с 2025 по 2030 гг. производство ЭТС в количестве не менее 10% от общего объема производимых транспортных средств.

По аналитическому прогнозу Международного энергетического агентства (МЭА) в 2020 г. парк электромобилей увеличился на 3 млн. штук и превысил 10 млн. Также МЭА рассмотрено два сценария развития рынка до 2030 г. – Stated Policies Scenario (Сценарий нынешней политики) и Sustainable Development Scenario (Сценарий устойчивого развития). Согласно первому сценарию, годовые продажи электромобилей достигнут 14 млн. в 2025 г. и 25 млн. в 2030 году, а мировой парк составит 140 млн. единиц. Сценарий устойчивого развития предполагает, что продажи электромобилей к 2030 г. превысят 45 млн. единиц в год, а глобальный парк вырастет до 245 млн.

Существенный рост продаж обусловлен следующими факторами:

1. Снижением стоимости блока накопителей (БН) электрической энергии, как правило, представленного модулями, собранными из отдельных литиевых аккумуляторов (ячеек);
2. Адаптацией режимов работы БН под различные климатические условия;
3. Развитием инфраструктуры зарядных станций;
4. Поддержкой государственными программами.

Исходя из прогноза МЭА, цена литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) будет падать до 2030 г., а впоследствии дальнейшее увеличение темпов производства и оптимизация технологического процесса не будет давать значительного результата. При этом в докладе отмечается, что до 2030 г. ЛИА останутся основным типом, используемых на электротранспортных средствах (ЭТС).

В настоящее время аккумуляторная батарея (АБ) определяет значительную часть от стоимости электромобиля и составляет 25-40% со средним сроком службы в 5 лет при эксплуатации в рекомендованных производителем режимах. Отличительной особенностью режимов работы АБ в составе ЭТС является неравномерная нагрузка, связанная с дорожными условиями, а также возможность возвращения части энергии при рекуперативном торможении. Таким образом, широкое применение АБ в составе различных типов ЭТС требует решения задач по эффективному управлению режимами разряда и заряда, а также определения оптимальных режимов работы без ухудшения динамических свойств.

Срок службы АБ является важным экономическим и технологическим фактором, влияющим на темпы внедрения автономных ЭТС. Поэтому изучение вопросов, связанных с увеличением срока службы и повышением эффективности

использования АБ в составе электромобиля является в настоящее время актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Л.С. Каневским, В.С. Дубасовой проведены исследования по определению основных факторов, вызывающих уменьшение ресурса ЛИА. Основные факторы и механизмы старения представлены в работе Н. Huebing, L. Languang и др. Поиском наилучших схемных и конструктивных решений автономных транспортных средств, а также алгоритмами управления занимались S. Kermani, S. Delprat, В.А. Глушенков, М.А. Слепцов, М. Zilin и др.

Зарубежными исследователями W. Jiayuan, S. Zechang, V.-H. Duong, H.A. Bastawrous, M. Garmendia, I. Gandiaga, G. Perez определена скорость старения ЛИА в зависимости от различных циклов движения. J. Wang, Ping Liu, M. Safari, C. Delacourt, J. Groot, Wu Xiaogang и Wenbo Wang исследовались процессы старения ЛИА в зависимости от токов нагрузки, температуры и глубины разряда.

В Новосибирском государственном техническом университете под руководством проф. Н.И. Щурова выполнены работы по исследованию вопросов энергосбережения и энергоэффективности на электротранспорте. В работах А.А. Штанга, Е.А. Спиридонова и М.В. Ярославцева рассмотрены вопросы применения накопительных устройств на транспорте.

Анализ результатов научных исследований показал, что учет влияния различных факторов в системе управления батареей (Battery management system, BMS) ЭТС позволит увеличить ее ресурс.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности использования энергоресурса тяговых литий-ионных аккумуляторных батарей электромобиля.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи исследования:**

1. Провести комплексную оценку тягового привода электромобиля с целью выявления узла, обладающего наименьшим сроком эксплуатации. Проанализировать основные типы ЛИА, применяемые в качестве блока накопителя ЭТС и выявить наиболее перспективные по технико-экономическим показателям. Определить ключевые факторы, влияющие на скорость деградации ЛИА.

2. Выполнить анализ методик определения ресурса ЛИА и нагрузочных циклов, имитирующих движение ЭТС. Для исследования выбрать цикл, наиболее полно отражающий процесс движения ЭТС в различных условиях. Провести расчет токовых диаграмм для ячейки типового аккумулятора электромобиля.

3. Разработать план эксперимента по результатам обработки токовых диаграмм выбранного нагрузочного цикла, а именно – выявить усредненные и максимальные нагрузки, выбрать шаг дискретизации факторов, определить форму и амплитуду токов нагрузки. Провести серию опытов по циклированию аккумуляторов на специализированном исследовательском комплексе и определить изменения физико-химических свойств. Выполнить корреляционный анализ параметров испытываемых аккумуляторов и значений варьируемых факторов. Выявить наиболее тяжелые режимы работы.

4. Синтезировать математическую модель тягового привода электромобиля в вычислительной среде MATLAB Simulink учитывающую уменьшение емкости ЛИА. Модернизировать имитационную модель типовой накопительной установки электромобиля путем гибридизации основного (ОНЭ) и буферного накопителя энергии (БНЭ), оптимизирующего режим работы ЛИА. Сопоставить результаты моделирования деградации ЛИА для типовой и гибридной установок.

Объектом исследования является тяговый привод автономного электротранспортного средства с ЛИА.

Предметом исследования являются энергетические и эксплуатационные характеристики электрического накопителя энергии на базе ЛИА автономного транспортного средства.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Проведена статистическая обработка стандартизированных ездовых циклов, в ходе которой определен режим, наиболее полно учитывающий особенности реального процесса движения. Получены зависимости токовых нагрузок БН электромобиля различной энергоемкости от режимов движения в варьируемых условиях.

2. Создан специализированный исследовательский комплекс и программа управления, позволяющие проводить ресурсные испытания аккумуляторов типоразмера 18650 с регистрацией основных эксплуатационных параметров. Исследовательский комплекс позволяет проводить автоматизированное тестирование одновременно до 30 ячеек, при этом программы их испытаний могут различаться нагрузочным профилем.

3. В процессе масштабного многофакторного эксперимента получен значительный массив данных, использованных для установления корреляции между сроком службы ЛИА и такими факторами, как: величина тока заряда и разряда, длительность режима разряда и общее время нахождения в работе.

4. Предложено техническое решение по усовершенствованию накопительной установки электромобиля, заключающееся в гибридизации основного и буферного накопителей энергии. На основе синтезированной математической модели проведена оценка технического решения в вычислительной среде MATLAB Simulink путем сопоставления степени деградации ОНЭ в составе типовой и гибридной накопительной установки.

Практическая значимость. На основе разработанной в диссертации методики и специализированного исследовательского комплекса становится возможным имитировать токовые нагрузки электромобиля, изменяющиеся по величине и длительности, что позволяет детально и полно исследовать процесс деградации ЛИА.

Используя представленные в работе математические и физические модели можно прогнозировать и осуществлять корректировку режимов ресурсных испытаний ЛИА.

В диссертационной работе:

1. Представлена имитационная математическая модель, которая позволяет исследовать различные стратегии тестирования АБ в зависимости от характера нагрузки;

2. Разработан физический исследовательский комплекс, позволяющий на практике провести масштабные многофакторные исследования по определению энергоресурса ЛИА при различных нагрузочных режимах.

3. Предложена методика, позволяющая по четырем критериям прогнозировать срок службы литиевого аккумулятора.

Теоретическая значимость:

1. Разработаны рекомендации по повышению ресурса и регулированию режимов работы ЛИА в составе тягового привода электромобиля, позволяющие увеличить срок службы без снижения динамических свойств ЭТС.

2. Синтезирована имитационная математическая модель тягового привода электромобиля с типовой и гибридной накопительной установкой, позволяющая выполнять гибкую настройку параметров исследуемого ЭТС, нагрузочного профиля, типов применяемых аккумуляторов и их взаимодействия с окружающей средой.

3. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для модернизации BMS, учитывающей данные, полученные в результате тестирования литиевых ячеек, с целью корректировки токовых нагрузок. Предложенное техническое решение позволит увеличить срок службы ЛИА без значительного удорожания и усложнения конструкции накопительной системы.

Методы исследования. Исследования выполнены с использованием стратегии системного анализа, методов математической статистики, законов электротехники, теории электрической тяги, математического и имитационного моделирования в вычислительной среде MATLAB Simulink с целью изучения влияния различных факторов на срок службы ЛИА. Результаты экспериментального исследования ресурса АБ получены путем проведения активного полного факторного эксперимента на разработанном специализированном исследовательском комплексе. Результаты опытов согласуются с существующими исследованиями, направленными на изучение ресурса ЛИА, и дополняют их для применения в системах с динамическим энергообменом и неравномерной нагрузкой.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа основных факторов, вызывающих деградацию ЛИА;
2. Результаты статистической обработки и сравнения энергетических параметров различных стандартизированных циклов, применяемых для описания реального процесса движения электромобиля;

3. Итоги разработки и тестирования специализированного исследовательского комплекса для проведения нагрузочных испытаний ЛИА;

4. Выводы по результатам проведения серии опытов по исследованию энергоресурса ЛИА согласно различным нагрузочным профилям на основе полного факторного эксперимента;

5. Основные итоги имитационного математического моделирования типовой и гибридной накопительной системы электромобиля, а также целесообразность внедрения БНЭ в состав тягового привода.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием теоретических положений, опирающихся на классические труды в области

теоретической электротехники, корректностью принятых допущений при исследованиях, согласованностью результатов математического и имитационного моделирования, а также результатами физического эксперимента.

Для оценки достоверности выводов диссертации использованы методы математической статистики, математического моделирования, физического эксперимента со значимым числом выборок энергетических параметров.

Внедрение результатов работы. Результаты НИР, направленные на получение корреляционных зависимостей срока службы ЛИА и различных факторов, позволили создать исследовательский комплекс для тестирования АБ и получить регрессионное уравнение, связывающее величину потери емкости с такими факторами, как: значения зарядно-разрядных токов, длительности режима разряда и общего времени работы. На разработанном исследовательском комплексе по заказу компании ООО «Новосибирский завод конденсаторов» проводятся ресурсные испытания опытной партии литий-никель-марганец-кобальт-оксидных (Li-NMC) аккумуляторов форм фактора 18650 и емкостью 3700 мА·ч. Отдельные результаты работы исследования будут использованы при модернизации программного обеспечения тестовых систем «Анализатор ХИТ серии АСК75.10.20.х» российского производства (компания ООО «ЯРОСТАНМАШ», г. Москва) в виде двух модификаций: на 2 канала (АСК75.10.20.2) и на 12 каналов (АСК75.10.20.12). Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе дисциплины «Накопители энергии в электротранспортном комплексе». Созданная имитационная математическая модель тягового привода электромобиля может применяться в курсе «Теория электрической тяги».

Личный вклад автора. Проведены все этапы исследования, разработка и создание исследовательского комплекса, планирование и проведение активного полного факторного эксперимента, вывод новых корреляционных зависимостей, синтез имитационной математической модели и проведение имитационного моделирования, подготовка публикаций, научных докладов и рукописи диссертации.

Соответствие паспорту специальности

Тема и содержание диссертации соответствует научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» по следующим пунктам областей исследования: п. 2 «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем», п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Апробация результатов диссертации.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и заседаниях: международная конференция

«Актуальные проблемы и перспективы машиностроения» «АИМЕ», 2021; международная конференция «Информационные технологии в бизнесе и производстве» «ИТВИ», 2020 и 2021 г.; XII Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы», 2021 г.; XX международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам, 2018 и 2019 г.; Международная научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов “Aspire to Science”, 2019 г.; Научная студенческая конференция “Интеллектуальный потенциал Сибири (РНСК)”, 2018г.

Диссертационная работа подготовлена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований (20-38-90210 Аспиранты) на тему “Исследование процесса деградации тяговой литиевой аккумуляторной батареи в условиях неравномерной нагрузки на транспортном комплексе” и итогов Научной сессии НГТУ 2020 г. на тему “Исследование влияния стохастической нагрузки на параметры литиевых аккумуляторов в транспортном комплексе”.

Публикации по теме диссертации. Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в 12-ти научных работах, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 7 статей в научных журналах, входящих в систему цитирования «Scopus» и/или «Web of Science», 8 докладов на международных и всероссийских конференциях, также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка из 109 использованных источников и трех приложений. Работа изложена на 121 странице машинописного текста, иллюстрируется 52 рисунками и 24 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена проблематика и актуальность темы работы. Сформулированы цель и задачи, приведены использованные методы исследований. Представлены основные положения, выносимые на защиту, изложены сведения о новизне, научной и практической значимости, реализации и апробации работы.

В первой главе рассмотрен тяговый привод электромобиля как сложная электротехническая система (рисунок 1). Структурная схема включает в себя БЗУ – бортовое зарядное устройство, ТЭД/Г – тяговый электродвигатель/генератор, ЭУР – электрический усилитель руля, УУ АБ – устройство управления АБ, СУ ЭТС – система управления электромобилем, CAN-шина – система цифровой связи управления электрическими устройствами ЭТС.

Расход энергии при функционировании ЭТС складывается из полезной мощности и мощности потерь. Основными потребителями являются тяговый привод, вспомогательные цепи и системы обеспечения комфорта.

Тяговый привод электромобиля подвержен нагрузке, часто изменяющейся по величине и направлению. Возможность возврата части энергии во время рекуперативного торможения позволяет значительно увеличить энергоэффективность тяговой установки. Однако форсированные режимы работы ЭТС с кратковременными подзарядками негативно сказываются на сроке службы аккумулятора. При этом аккумуляторные ячейки, входящие в состав БН

электромобили подвержены разной скорости старения. Поэтому возникает необходимость непрерывного мониторинга параметров и управления каждой ячейкой аккумулятора для точного прогноза срока службы и оптимизации их режима работы с помощью BMS. К основным задачам BMS относятся оптимизация энергопотребления и заряда, обеспечение безопасности, реализация телекоммуникационных алгоритмов и балансировки ячеек.

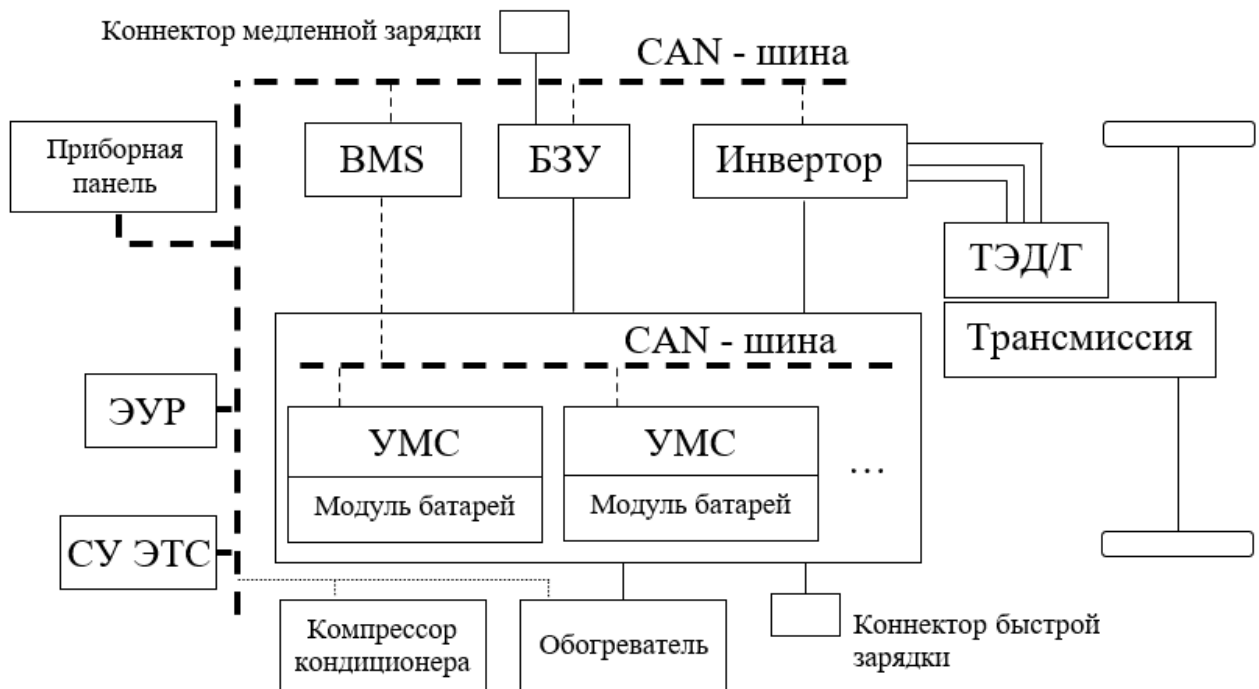


Рисунок 1 - Структурная схема тягового привода электромобиля

В настоящее время АБ определяет значительную часть от стоимости электромобиля и достигает 25-40% со средним сроком службы в 5 лет при эксплуатации в рекомендованных производителем режимах. Оптимизация конструкции и режимов работы АБ путем модернизации BMS и использования различных типов ЛИА позволит повысить ресурс электромобилей.

В результате анализа тяговых источников тока получено, что наибольшую значимость представляет изучение литий-железо-фосфатного (LFP) аккумулятора в составе БН электромобиля. Рассмотрены основные факторы и механизмы, оказывающие значительное влияние на скорость деградации ЛИА – величина тока заряда и разряда, реверсивный характер нагрузки, цикличность режимов заряда и разряда, температурный диапазон, а также глубина разряда. Причем, совокупность факторов оказывает влияние на срок службы ЛИА, отличающееся от стандартных моделей деградации.

Во второй главе рассмотрен стандартный тест АБ на ресурс (ГОСТ Р ИСО 12405-4-2019), а также стандартизированные ездовые циклы, используемые для имитации реального движения на дороге – новый европейский цикл движения (NEDC), комплекс процедур агентства по охране окружающей среды США, Всемирный согласованный цикл испытаний легковых автомобилей (WLTC) и Китайский цикл испытаний легковых автомобилей (CLTC-P/C). В результате анализа получено, что для исследования целесообразно применить WLTC по следующим

причинам: более широкое представление разнообразных режимов движения ЭТС с использованием 4-х имитационных фаз (Low, Medium, High и Extra High); высокая динамика цикла, соответствующая реальному процессу движения; применимость в различных регионах, обусловленная спецификой создания цикла на основе реальных заездов по всему миру и весовых коэффициентах.

Проведена статистическая обработка цикла WLTC с позиции относительных токов (1), возникающих в ячейке БН различной энергоемкости (рисунок 2).

$$I_{отн} = I_{ячейки} / Q_{ячейки} \quad (1)$$

Для каждой фазы WLTC определены минимальная, средняя и максимальная длительность режима тяги, торможения и остановки (таблица 1), а также средние и максимальные значения относительных токов для БН энергоемкостью 24 кВт·ч (таблица 2).

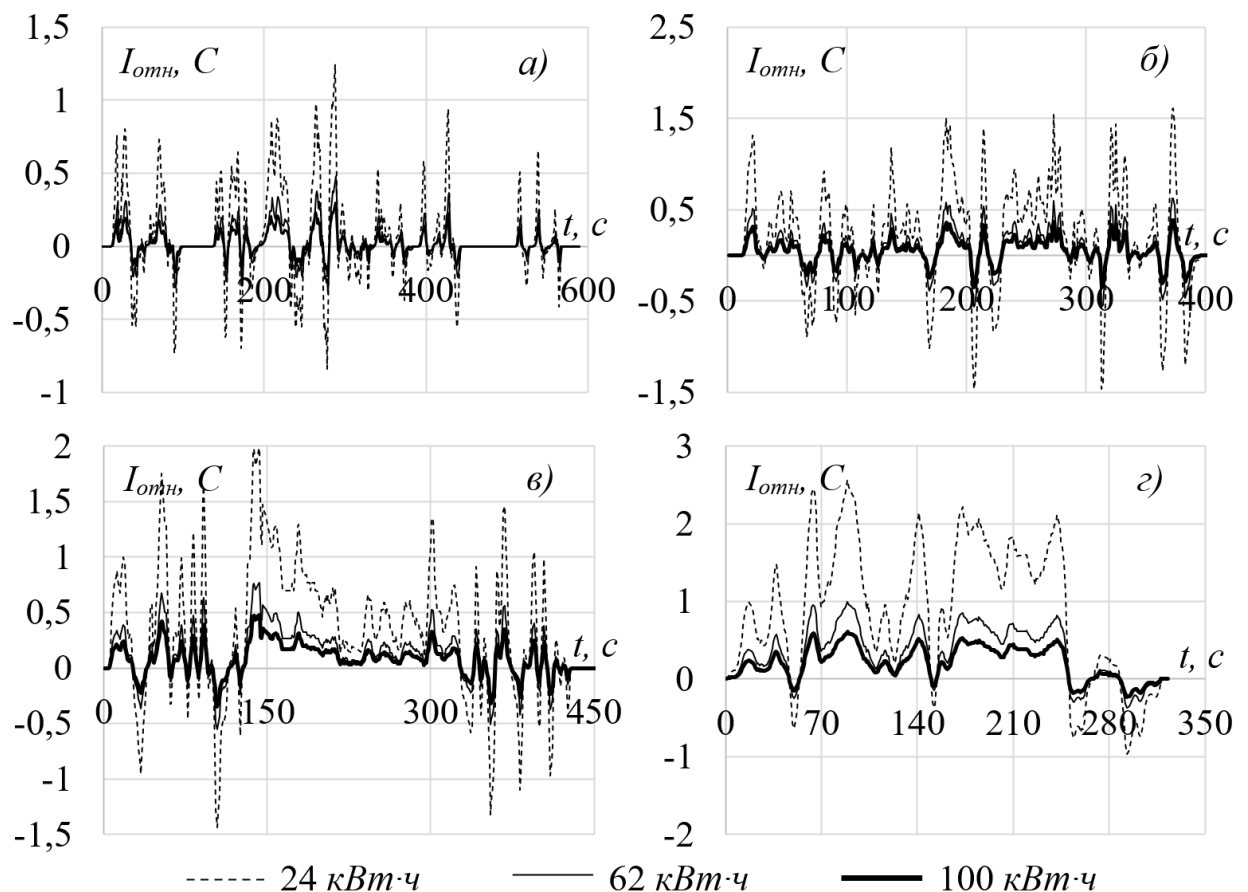


Рисунок 2 – Диаграммы относительных токов ячейки БН в фазах цикла WLTC
а) Low, б) Medium, в) High, г) E. High

Таблица 1 – Минимальная, максимальная и средняя длительность фаз цикла

Фаза	Тяга, сек			Торможение, сек			Остановка, сек		
	T_{min}	T_{cp}	T_{max}	T_{min}	T_{cp}	T_{max}	T_{min}	T_{cp}	T_{max}
Low	1	8,55	40	1	5,09	15	2	24	66
Medium	3	16,29	56	2	6,41	17	33	33	33
High	3	22,47	201	1	5,93	14	26	33	40
E. high	24	66,25	98	3	13,00	29	6	6	6

Таблица 2 – Средние и максимальные значения токов в фазах WLTC

Фаза	Тяга		Торможение	
	I_{cp}, C	I_{max}, C	I_{cp}, C	I_{max}, C
Low	0.30	1,5	0.20	0,8
Medium	0.53	1,56	0.44	1,5
High	0.65	2	0.44	1,48
E. High	1.24	2,54	0.45	1

При сопоставлении полученных данных установлено, что тенденция, направленная на увеличение энергоемкости устанавливаемых АБ, приводит к снижению токовой перегрузки отдельных ячеек, и, как следствие, повышению их энергоресурса. Однако недостатками такого решения является значительное увеличение массогабаритных показателей, ухудшение энергоэффективности и удорожание БН и электромобиля в целом.

В третьей главе представлен разработанный и созданный исследовательский комплекс (рисунок 3), включающий в себя 30 зарядно-разрядных модулей с возможностью поточечного воспроизведения нагрузочного цикла для ячеек формфактора 18650. Управление осуществляется с помощью 10 микроконтроллеров Atmel ATmega328P, каждый из которых регулирует токовую нагрузку на трех модулях. Каждый модуль может обеспечить заряд и разряд АБ током до 10 А с произвольной формой. В процессе циклирования проводится запись значений токов, напряжений и температур на ПК с помощью трех USB-самописцев.

Управляющая программа имеет два уровня. Задачей верхнего уровня является выбор токов заряда либо разряда. На нижнем уровне обеспечивается формирование сигналов на управляющих выходах, а также запуск АЦП для измерений. Разрешение на включение и задание направления тока аккумулятора задаются дискретными сигналами. Формирование уставок тока выполняется широтно-импульсной модуляцией на основе встроенных таймеров микроконтроллера.

Алгоритм (рисунок 4) реализует один из двух режимов управления: калибровку и моделирование работы накопителя электромобиля. Выбор режима проводится в состоянии инициализации при загрузке микроконтроллера по величине внешнего управляющего сигнала.

В случае выбора режима калибровки выполняется последовательность операций, описанная в ГОСТ Р ИСО 12405-1-2013. После загрузки микроконтроллера в режиме тестирования аккумуляторов последовательно реализуются следующие состояния:

1. Заряд постоянным током при необходимости;
2. Пауза для стабилизации напряжения после протекания тока через аккумулятор;
3. Принятие решения и переход в состояние разряда;
4. В состоянии разряда производится имитация нагрузки на аккумулятор при движении электромобиля в выбранном нагрузочном цикле;
5. Пауза для стабилизации напряжения после протекания тока через аккумулятор.

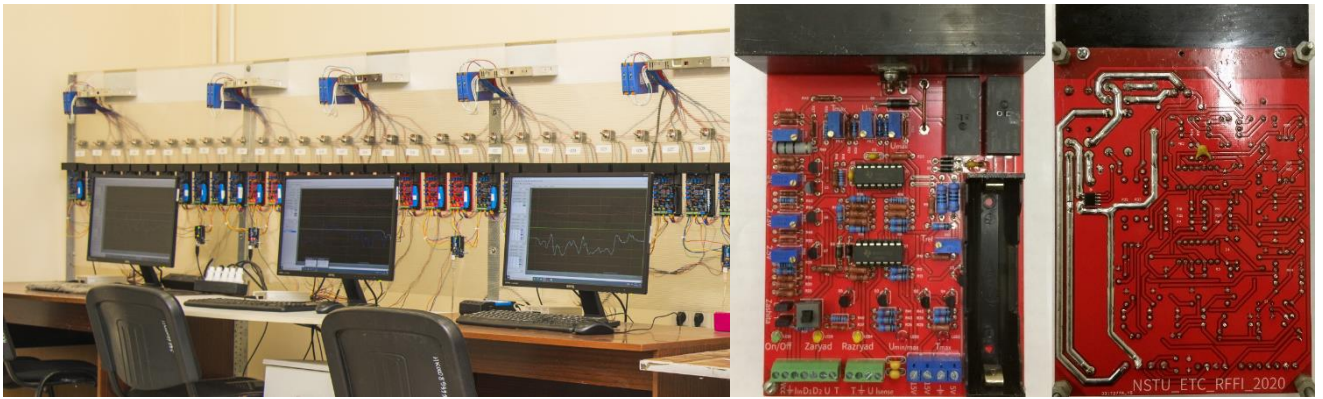


Рисунок 3 – Комплекс по исследованию аккумуляторных батарей

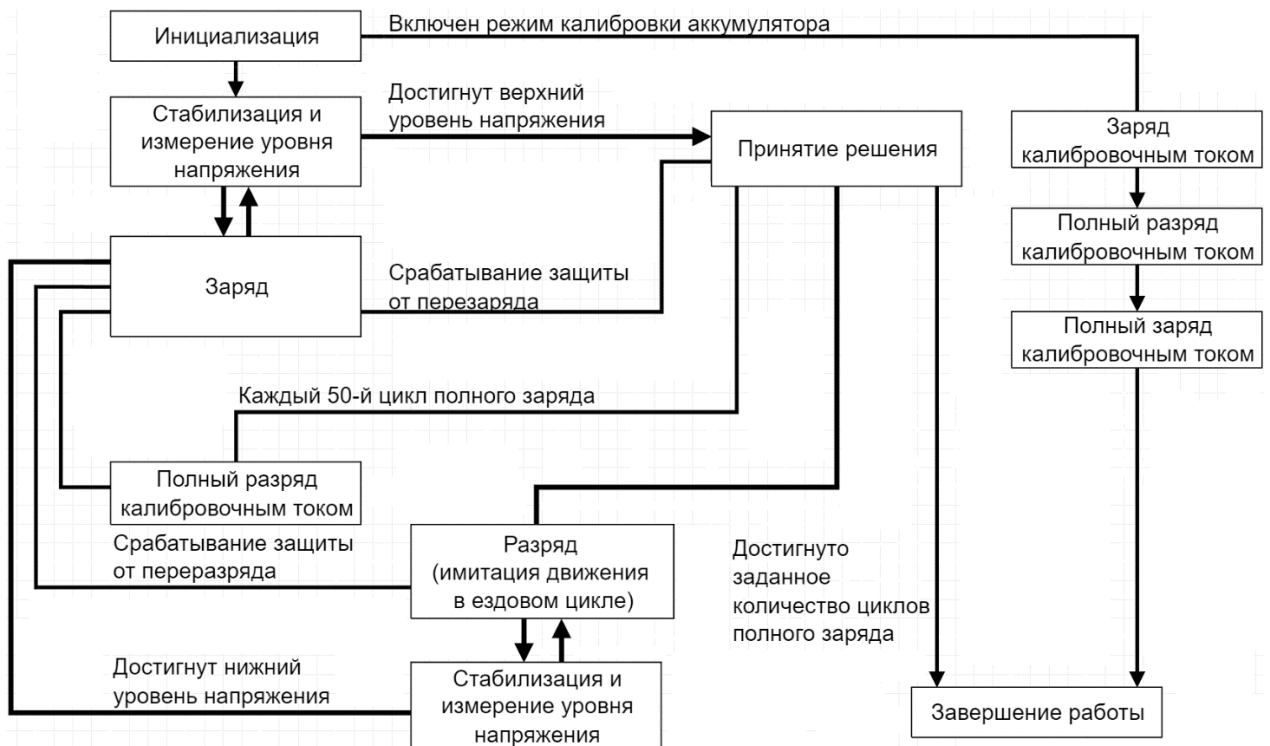


Рисунок 4 - Блок-схема алгоритма тестирования аккумуляторов

Для исследования влияния токовых нагрузок на срок службы литиевых аккумуляторов, возникающих при эксплуатации ЭТС при различной динамике, проведена масштабная серия опытов согласно полному факторному эксперименту. В качестве исследуемых факторов приняты:

- 1) Ток в ячейке в режиме тяги $I_{тяг}$;
- 2) Ток ячейки в режиме торможения $I_{торм}$;
- 3) Длительность режима тяги $t_{тяг}$;
- 4) Длительность нахождения ячейки в работе T ;
- 5) Количество реверсов $N_{пер}$.

Токовая нагрузка в БН электромобиля представлена в виде чередующихся режимов тяги и торможения (рисунок 5), полученная в результате тягово-энергетического расчета. Длительность режима торможения для всех опытов принята равной 5 с., температура окружающей среды варьировалась в диапазоне 10...26°C. Для компенсации влияния случайных воздействий проводимые опыты дублировались на трех ячейках.

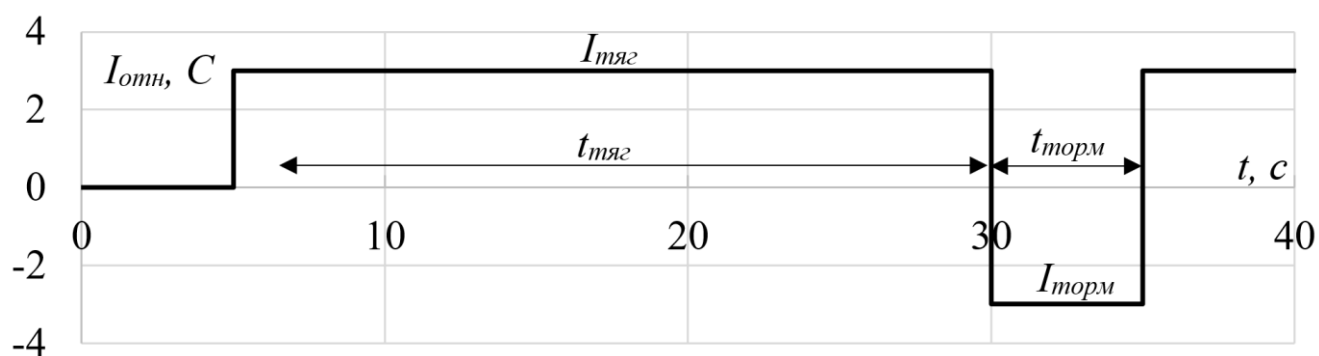


Рисунок 5 – Эквивалентная токовая диаграмма на примере опыта 3-20-3-5

Матрица эксперимента с принятыми уровнями уставок факторов представлена в таблице 3. Тестирование проводилось на LFP ячейках модели 1865HC16P с номинальной емкостью равной 1,6 А·ч и стандарта Grade A. Уровни уставок по напряжению и току следующие: $U_{\text{макс}} = 3,65\text{В}$ - максимальное напряжение без нагрузки (стабилизированное), $U_{\text{мин}} = 2,5\text{В}$ - минимальное напряжение без нагрузки (стабилизированное), $U_{\text{макс.заряд}} = 4,8\text{В}$ - максимальное напряжение под нагрузкой, $U_{\text{мин.разряд}} = 1,5\text{В}$ - минимальное напряжение под нагрузкой, $I_{\text{заряд}} = 0,5\text{С}$ - ток заряда до $U_{\text{макс}}$.

Таблица 3 – Матрица эксперимента

№ опыта	$I_{\text{тяги}}, \text{С}$	$t_{\text{тяги}}, \text{с}$	$I_{\text{торм}}, \text{С}$	$T_p, \text{сут}$	Формат записи
1	1	65	0,5	25	1-65-05-5
2	1	65	3	25	1-65-3-5
3	1	20	0,5	25	1-20-05-5
4	1	20	3	25	1-20-3-5
5	3	65	0,5	25	3-65-05-5
6	3	65	3	25	3-65-3-5
7	3	20	0,5	25	3-20-05-5
8	3	20	3	25	3-20-3-5

Всего протестировано 24 ячейки, длительность опытов составила 80 дней, общее число выполненных измерений емкости – 270, количество зарядно-разрядных циклов – 13,5 тыс. Полученные результаты измерений остаточной емкости аккумуляторных ячеек во время циклирования и линии тренда представлены на рисунке 6. Окончание срока службы (EOL) определяется при потере 20% от номинальной емкости, что обусловлено переходом к резкому снижению энергетических и мощностных показателей.

Все ячейки с током тяги равным 1С вне зависимости от длительности и тока торможения показали малую степень деградации (менее 10%) после продолжительного тестирования. Анализ результатов тестирования показал, что наибольшее влияние на величину уменьшения емкости оказывает величина и длительность токовой нагрузки в режиме тяги. Увеличение тока рекуперации после длительного разряда током 1С незначительно влияет на срок службы, а при 3С уменьшает его в два раза. Обратная корреляция наблюдается при длительности

режима тяги равном 20 сек., что может быть связано с увеличением количества подзарядов, и как следствие длительности разряда до достижения минимального напряжения. Однако анализ имитационных циклов движения показал, что подобные переключения токовой нагрузки практически не встречаются.

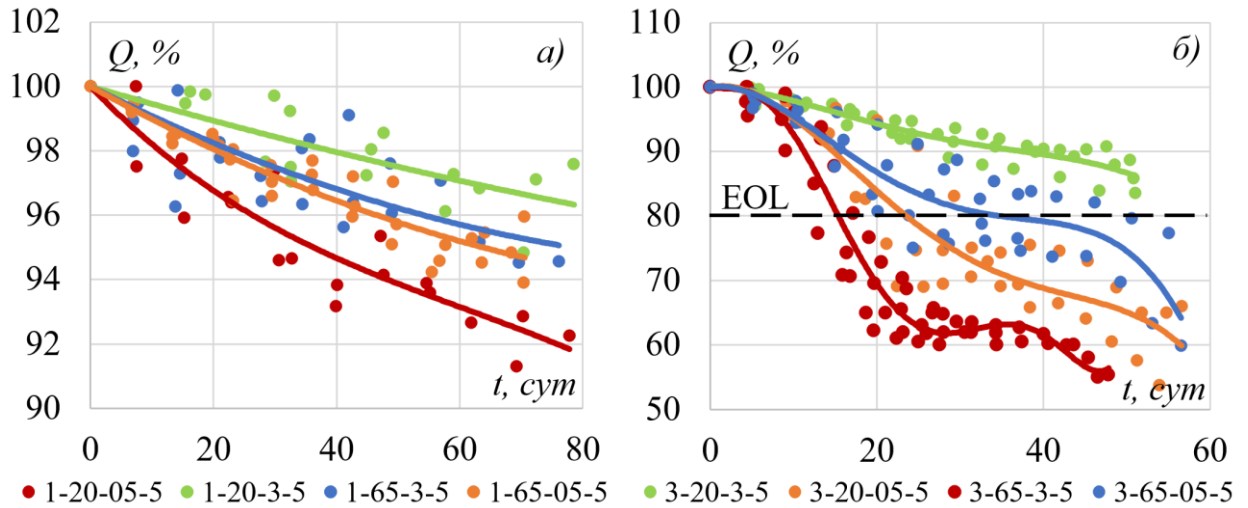


Рисунок 6 – Изменение емкости ячеек:

а) опыты с током тяги 1С, б) опыты с током тяги 3С

По полученным результатам проведения серии опытов получены коэффициенты уравнения регрессии. Для описания связи характеристики величины потери емкости ΔQ до окончания срока службы (20%) в зависимости от тока тяги, тока рекуперации, длительности режима тяги и общей длительности нахождения в работе принята модель в виде полинома:

$$\Delta Q = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4 \quad (2)$$

где b_0, b_1, b_2 и т.д. – коэффициенты полинома;

x_1, x_2, x_3, x_4 – безразмерное значение фактора тока тяги, тока рекуперации, длительности режима тяги и общего времени работы.

Полученные коэффициенты регрессии приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Коэффициенты уравнения регрессии

b_0	5,67	b_4	5,67	b_{23}	2,44	b_{124}	0,47
b_1	4,52	b_{12}	0,47	b_{24}	0,09	b_{134}	1,67
b_2	0,09	b_{13}	1,67	b_{34}	1,52	b_{234}	2,44
b_3	1,52	b_{14}	4,52	b_{123}	2,12	b_{1234}	2,12

Для проверки гипотезы адекватности уравнения регрессии с использованием F -критерия Фишера определена дисперсия адекватности:

$$S_{ad}^2 = \frac{S_R \cdot n}{f} = \frac{6,84 \cdot 3}{11} = 1,86$$

где S_R – остаточная сумма квадратов;

n – количество повторных опытов;

f – количество степеней свободы, $f = N - (k + 1) = 11$;

Табличное значение критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости и числах степеней свободы для числителя 11 и знаменателя 16 равно $F_T = 2,42$. Т.к. $F_P < F_T$, представленную модель можно признать адекватной.

В четвертой главе на основе результатов проведенного эксперимента установлено, что для увеличения срока службы БН необходимо минимизировать воздействие разрядных токов выше 1С. Для этого предложено гибридизировать накопительную установку электромобиля путем внедрения БНЭ с высокими мощностными показателями и ресурсом по количеству циклов заряда-разряда. При совместной работе ОНЭ обеспечивает энергию на перемещение с низкой динамикой и собственные нужды, а БНЭ отдает энергию, накопленную в результате рекуперативного торможения во время пиковых нагрузок.

Проведено имитационное математическое моделирование тягового привода электромобиля, относящегося к III классу по удельной установленной мощности, со стандартной и гибридной накопительной установкой. Рассмотрен эффект сглаживания токовой нагрузки для ОНЭ энергоемкостью 24 кВт·ч. В качестве БНЭ принят модуль на базе ЛТО ячеек емкостью 10 А·ч с номинальным током заряда-разряда равным 10С и возможностью кратковременных перегрузок до 62С. На основе статистических данных об ежегодном пробеге автомобилей принято, что в течение дня электромобиль проезжает цикл WLTC дважды (46 км).

Основное сопротивление движению:

$$w = 12 + 0.0018 \cdot V^2, \text{ Н/кН} \quad (2)$$

где V – скорость ЭТС, км/ч.

Для определения режима движения и мощности ТЭД выполняется сравнение текущего ускорения и ускорения замедления при выбеге:

$$\left. \begin{aligned} a > a_{\text{выб}}, P_{\text{ТЭД}} &= \frac{F_{\text{тяг}} \cdot V}{3.6 \cdot \eta_{\text{ТЭД}} \cdot \eta_{\text{ИП}} \cdot \eta_{\text{Тр}}} \\ a = a_{\text{выб}}, P_{\text{ТЭД}} &= 0 \\ a < a_{\text{выб}}, P_{\text{ТЭД}} &= \frac{F_{\text{торм}} \cdot V \cdot \eta_{\text{ТЭД}} \cdot \eta_{\text{ИП}} \cdot \eta_{\text{Тр}}}{3.6} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $F_{\text{тяг}}$ и $F_{\text{торм}}$ – сила, развиваемая ТЭД в режиме тяги и торможения, Н;

$\eta_{\text{ТЭД}}$ – КПД ТЭД;

$\eta_{\text{ЗП}}$ – КПД трансмиссии;

$\eta_{\text{ИП}}$ – КПД импульсного преобразователя;

a – ускорение ЭТС, м/с²;

$a_{\text{выб}}$ – ускорение замедления ЭТС при выбеге, м/с²;

Токовая нагрузка определяется исходя из динамики ЭТС и мощности собственных нужд:

$$I_{LFP} = \frac{P_{TЭД}}{U_1 \cdot \eta_{ПР1}} + \frac{P_{СН}}{U_1 \cdot \eta_{ПР2}}, \text{ A} \quad (4)$$

где U_1 – выходное напряжение ОНЭ, В;

$\eta_{ПР1}$ и $\eta_{ПР2}$ – КПД тягового преобразователя и преобразователя собственных нужд;

$P_{СН}$ – мощность собственных нужд, Вт.

По результатам расчета зависимость мощности собственных нужд от температуры окружающей среды, складывающейся из мощности компрессора кондиционера, обогревателя, вентиляции, системы освещения и контроллера, представлена соотношением:

$$P_{СН} = \begin{cases} -131.25 \cdot T_a + 1875, & -20 \leq T_a < 11 \\ 300, & 11 \leq T_a \leq 27 \\ 240 \cdot T_a - 5700 & 27 < T_a \leq 40 \end{cases}, \text{ Вт} \quad (5)$$

где T_a – температура окружающей среды, °С.

В модели с гибридной накопительной установкой ток в ОНЭ ограничивается в зависимости от текущего значения уровня заряда БНЭ:

$$\left. \begin{aligned} \text{Если } SOC_{LTO} \geq 100\%, I_{LFP}^{low} = -\infty, I_{LFP}^{up} = f(SOC_{LTO}) \\ \text{Если } SOC_{LTO} < 100\%, I_{LFP}^{low} = 0, I_{LFP}^{up} = f(SOC_{LTO}) \\ \text{Если } SOC_{LTO} < 20\%, I_{LFP}^{low} = 0, I_{LFP}^{up} = \infty \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где SOC_{LTO} – уровень заряда БНЭ;

I_{LFP}^{low} , I_{LFP}^{up} – нижняя и верхняя граница величины тока ОНЭ, А;

$f(SOC_{LTO})$ – функция регулирования верхней границы по току:

$$f(SOC_{LTO}) = -1,25 \cdot SOC_{LTO} + 125, \text{ A}$$

На рисунках 7 и 8 приведены фрагменты диаграмм напряжений и токов ОНЭ и БНЭ для стандартной и гибридной энергоустановки.

Результаты изменения емкости ОНЭ в зависимости от величины пробега ЭТС приведены на рисунке 9. Изменение емкости БНЭ составило менее 1%.

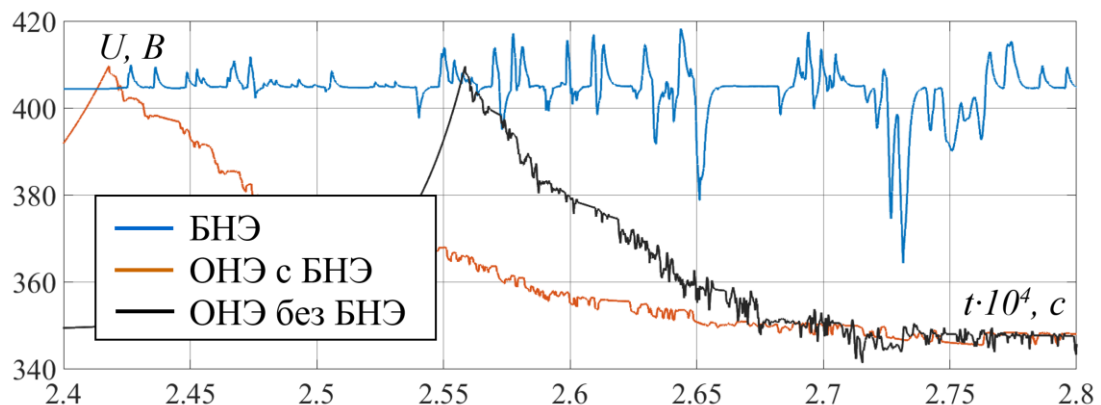


Рисунок 7 – Фрагмент диаграммы напряжений ОНЭ и БНЭ

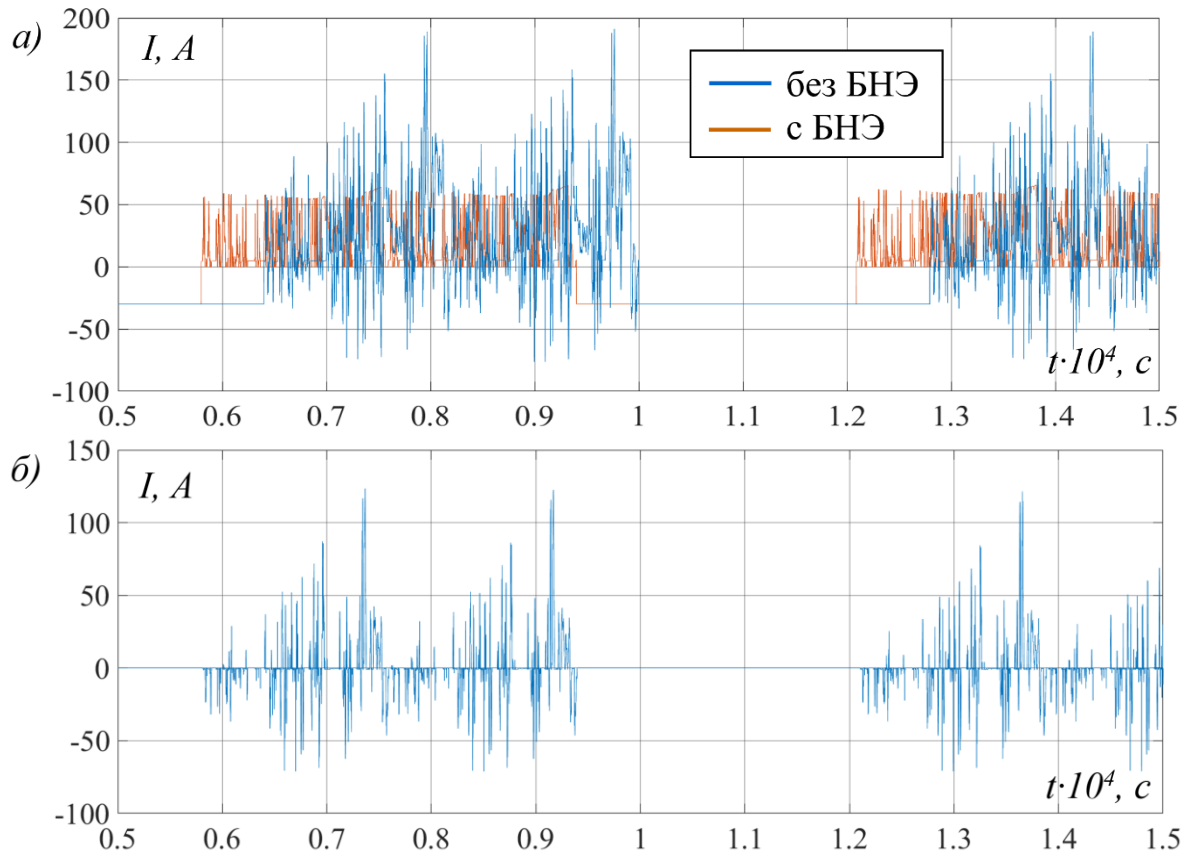


Рисунок 8 – Диаграмма токов,
а) ОНЭ, б) БНЭ

По результатам моделирования движения автомобиля согласно ездовому циклу WLTC на базе стандартной накопительной установки дальность пробега до окончания срока службы составила 230 тыс. км, а гибридная накопительная установка – 290 тыс. км. Таким образом, применение гибридной накопительной установки позволяет увеличить срок службы БН автомобиля на 26% при движении согласно циклу WLTC.

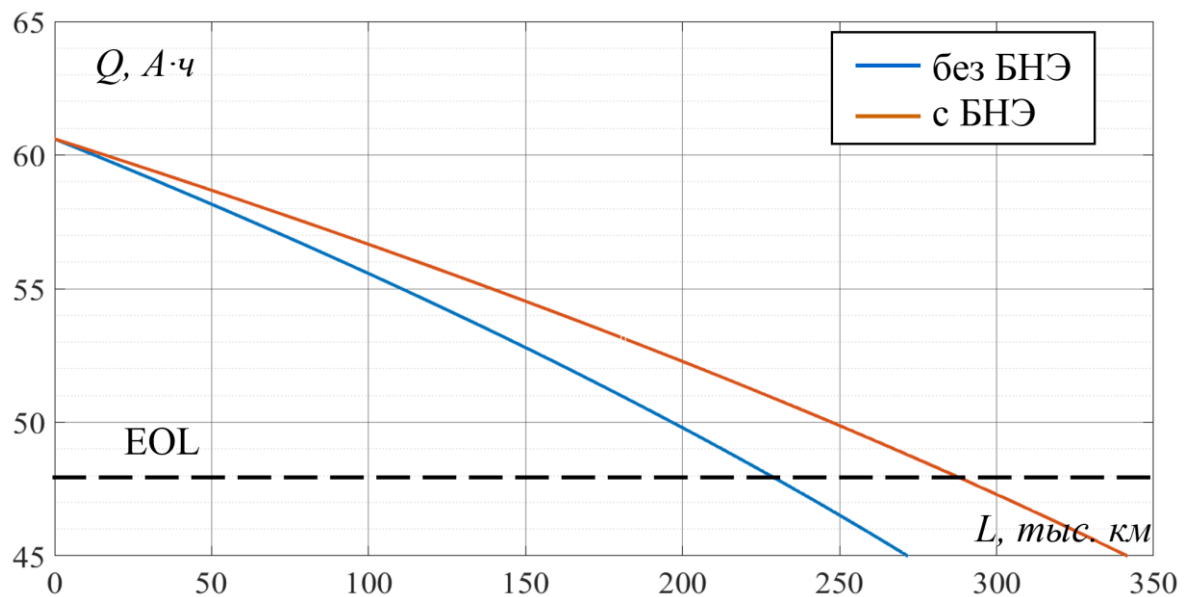


Рисунок 9 – Изменение емкости ОНЭ в зависимости от длины пробега

В заключении приводятся основные выводы и результаты по диссертационной работе. В **приложении А** представлены результаты измерения остаточной емкости LFP ячеек на специализированном исследовательском комплексе. В **приложении Б** представлены справка и акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс НГТУ. В **приложении В** представлено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В ходе выполнения диссертационной работы решены все поставленные задачи.

1. Установлено, что аккумулятор электромобиля является наиболее критичным звеном, требующим оптимизационных решений с целью увеличению срока службы. Значительный эффект по снижению скорости деградации ЛИА может быть достигнут внесением конструктивных изменений и улучшением алгоритмов работы BMS. Определены основные факторы, влияющие на срок службы ЛИА в составе БН электромобиля – величина зарядно-разрядных токов, реверсивность и цикличность нагрузки, глубина разряда и температурный диапазон. В результате анализа выявлено, что совокупное воздействие факторов оказывают влияние на срок службы, отличающееся от стандартных моделей старения. Из этого следует необходимость более детального подхода к исследованию деградации ЛИА в транспортном комплексе.

2. Проведен анализ нагрузочных циклов, применяемых для ресурсной оценки ЛИА (ГОСТ Р ИСО 12405-4-2019), а также стандартизированных ездовых циклов, имитирующих реальное движение ЭТС (NEDC, EPA, WLTC и CLTC). В результате анализа установлено, что наибольшим удельным расходом энергии обладает WLTC ($119,29 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/(\text{т}\cdot\text{км})$ без учета и $93,54 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/(\text{т}\cdot\text{км})$ с учетом рекуперации). Кроме этого, фазы цикла (Low, Medium, High и E. High) позволяют имитировать движение электромобиля с разной динамикой – нахождение в плотном транспортном потоке с частыми переключениями из режима тяги в режим рекуперации ($N_{\text{пер}}=33$ за 589 сек.), загородный режим движения с длительным разгоном до скорости $V_{\text{max}}=131 \text{ км/ч}$ и ее удержанием и т.д. Выполнен статистический анализ значений токов для фаз данного цикла, которые возникают в ячейке БН электромобиля. Определены средние и максимальные относительные значения токов и длительности режимов тяги и рекуперации, характеризующие каждую фазу цикла.

3. Разработана исследовательская установка, позволяющая проводить автоматизированные ресурсные испытания до 30 аккумуляторов типоразмера 18650 с регистрацией основных эксплуатационных параметров. Возможность поточечного воспроизведения нагрузочного цикла с токами заряда-разряда до 10 А обеспечивает необходимую и достаточную детализацию всех тестовых испытаний.

Для определения ресурсосберегающих режимов работы аккумулятора выполнен полный факторный эксперимент. Установлено, что наибольшее влияние на величину снижения емкости оказывает величина тока и длительность режима тяги. Увеличение тока рекуперации после длительного разряда током 1 С

незначительно влияет на срок службы (260 и 290 дней при токах рекуперации 0,5С и 3С соответственно), а при токах разряда порядка 3С сокращают его в значительной степени (34 и 16 дней при токах рекуперации 0,5С и 3С соответственно). При длительности режима тяги равном 20 сек. наблюдается положительный эффект от величины зарядного тока (23 и 60 дней при токах рекуперации 0,5С и 3С соответственно), что связано с увеличением количества актов подзаряда, и, как следствие, увеличением длительности разряда до достижения минимального напряжения.

4. Для оптимизации режимов работы ЛИА в составе БН электромобиля предложено использование БНЭ емкостью 10 А·ч и массой 70 кг, сглаживающего график нагрузки и принимающего энергию рекуперации. Проведено имитационное математическое моделирование тягового привода электромобиля с типовой и гибридной накопительной установкой. В результате сравнения результатов моделирования продолжительной эксплуатации ЛИА установлено, что при движении согласно циклу WLTC применение предложенной гибридной накопительной установки повышает срок службы на 26%, увеличивая дальность пробега электромобиля без замены БН с 230 до 290 тыс. км.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Щуров Н.И., Штанг А.А., Дедов С.И., Сяоган У. Анализ влияния режимов движения электромобилей на процесс старения тяговых аккумуляторов на основе цикла WLTC // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. - 2020. - №13 (8). - С. 977-990. - doi: 10.17516/1999-494X-0279.

2. Сяоган У, Ли Сюэфэн, Щуров Н.И., Штанг А.А., Ярославцев М.В., Дедов С.И. Определение уровня заряда литий-ионного аккумулятора на основе алгоритма расширенного фильтра Калмана // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. - 2020. - №13 (4). - С. 420-437. - doi: 10.17516/1999-494X-0242.

3. Щуров Н.И., Дедов С.И. Определение токовых нагрузок электромобиля на основе стандартизированного цикла WLTC // Электроника и электрооборудование транспорта. - 2021. - №1. - С. 12-16.

Статьи в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus и/или Web of Science:

4. Shchurov N.I., Dedov S.I., Malozyomov B.V., Shtang A.A. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex // Energies. - 2021. - №14(23). - С. 1-33. - DOI: 10.3390/en14238072.

5. Shchurov N.I., Dedov S.I. Determination of the charge and discharge modes duration effect on the LiFePO₄ cells resource in the electric power source // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - №1061. - С. 1-6. - DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012006.

6. Abramov E.Y., Dedov S.I. Laboratory facility development for studying the heavy charge and discharge modes effect on the degradation of lithium-ion batteries //

Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - №2032. - С. 1-7. - DOI 10.1088/1742-6596/2032/1/012092.

7. Yaroslavtsev M. V., Shtang A. A., Dedov S.I., Xiaogang W. / Calculation of Hybrid Bus Power Demands by Standard Driving Cycles // 2018 19th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). - IEEE, 2018. - P. 469-472. doi: 10.1109/EDM.2018.8435023.

8. Yaroslavtsev M.V., Shtang A.A., Dedov S.I. Automated calculation of economic feasibility of using various types of passenger public transport in Russian conditions // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - №1333. - С. 1-6. - DOI: 10.1088/1742-6596/1333/7/072004.

9. Shtang A.A., Yaroslavtsev M.V., Dedov S.I., Xiaogang W. / Comparison of energy consumption of different types of passenger public transport in Russian operational conditions // 20 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). - IEEE, 2019. - P. 705- 710. DOI: 10.1109/EDM.2019.8823400.

10. Shurov N.I., Dedov S.I. Determination of the combined power source parameters in a hybrid small class share taxi based on modelling energy consumption process // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. - №1661. - С. 1-8. - DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012193.

В прочих работах по теме диссертации:

11. Щуров Н.И., Дедов С.И. Анализ влияния режимов заряда-разряда на старение LiFePO₄ аккумулятора электромобиля // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы». — Оренбург, 2021. — С.33-39.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

12. Свидетельство № 2022614086. Программа управления устройством для определения электрических параметров и срока службы аккумуляторов / Абрамов Е.Ю, Дедов С.И, Спиридонов Е.А, Штанг А.А, Щуров Н.И, Ярославцев М.В // Заявл. 15.03.2022; зарегистр. 17.03.2022. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Отпечатано в типографии

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

Формат 60x84 1/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 1155. Подписано в печать 05.07.2022 г.