

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
“НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ”

На правах рукописи



ДЕДОВ СЕРГЕЙ ИГОРЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИЛОВОЙ ГИБРИДНОЙ
УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Щуров Николай Иванович

Новосибирск - 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ПРИМЕНЕНИЕ ЛИТИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В КАЧЕСТВЕ ТЯГОВОГО ИСТОЧНИКА ТОКА.....	14
1.1 Анализ энергетической установки электромобиля	14
1.2 Анализ рынка применяемых аккумуляторов на электротранспортных средствах.....	18
1.3 Механизмы старения литиевых ячеек.....	20
1.3.1 Механизмы старения анодных материалов	22
1.3.2 Механизмы старения катодных материалов	24
1.4 Характеристика аккумуляторной батареи и влияние различных факторов ...	25
1.4.1 Влияние фактора температуры на скорость деградации аккумулятора .	28
1.4.2 Влияние уровня заряда на скорость деградации аккумулятора.....	31
1.4.3 Влияние глубины разряда на скорость деградации аккумулятора	32
1.4.4 Влияние зарядно-разрядных токов на скорость деградации аккумулятора.....	34
Выводы по первой главе	36
ГЛАВА 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ В НАКОПИТЕЛЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ	38
2.1 Методы определения ресурса литиевого аккумулятора	38
2.1.1 Стандартизированная процедура оценки ресурса литиевого аккумулятора.....	38
2.1.2 Анализ современных ездовых циклов.....	41
2.2 Обработка стандартизированного цикла WLTC	47
2.3 Расчет нагрузки блока накопителей.....	49

2.4 Сравнение результатов для блоков накопителей различной энергоемкости..	53
Выводы по второй главе	57
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ СТЕНДЕ.....	58
3.1 Разработка зарядно-разрядного модуля	58
3.2 Алгоритм управления зарядно-разрядными модулями	63
3.3 Создание и тестирование испытательного стенда.....	65
3.4 Планирование полного факторного эксперимента	68
3.5 Результаты тестирования	70
3.6 Обработка результатов тестирования	72
3.7 Формирование регрессионного уравнения	74
Выводы по третьей главе	77
ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ ЛИТИЕВОГО АККУМУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ	79
4.1 Тяговая установка электромотоцикла	79
4.2 Моделирование процессов деградации аккумулятора электротранспортного средства..	80
4.2.1 Синтез модели электротранспортного средства со стандартной накопительной установкой	80
4.2.2 Синтез модели электротранспортного средства с гибридной накопительной установкой	89
4.3 Анализ результатов моделирования.....	93
Выводы по четвертой главе	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	99

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А Результаты тестирования литий-железо-фосфатных ячеек на специализированном исследовательском стенде	112
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт и справка о внедрении результатов диссертационной работы.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Современные тенденции развития автомобильной индустрии направлены на увеличение выпуска транспортных средств, оснащенных гибридной или полностью электрической энергоустановками. По постановлению Правительства Российской Федерации №2290р утверждена концепция развития производства и использования электрического автомобильного транспорта на период до 2030 г. [1]. 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. [2].

Существенный рост продаж обусловлен следующими факторами:

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

Исходя из прогноза МЭА, цена литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) будет падать до 2030 г., 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 ЭТС.

В настоящее время аккумуляторная батарея (АБ) определяет значительную часть от стоимости электромобиля и составляет 25-40% [3] со средним сроком службы до 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 потерь 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. Каневским Л.С., Дубасовой В.С. [4] проведены исследования по определению основных факторов, вызывающих уменьшение ресурса ЛИА. Основные факторы и механизмы старения представлены в работе Xuebing Han, Languang Lu и др. [5]. Поиск наилучших схемных и конструктивных решений автономных транспортных средств, а также алгоритмами управления занимались S. Kermani, S. Delprat, В.А. Глушенков, М.А. Слепцов, Zilin Ma, S. Kermani и др. [6-8]

Зарубежными исследователями Wang Jiayuan, Sun Zechang, Van-Huan Duong, Hany Ayad Bastawrous, M. Garmendia, I. Gandiaga, G. Perez определена скорость старения ЛИА в зависимости от различных циклов движения [9-11]. Ping Liu, M. Safari, C. Delacourt, J. Groot, Wu Xiaogang и Wenbo Wang [12-15] исследовались процессы старения ЛИА в зависимости от токов нагрузки, температуры и глубины разряда.

В Новосибирском государственном техническом университете под руководством 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. [16-20]

Анализ результатов научных исследований показал, что учет влияния различных факторов в системе управления батареей (Battery management system, BMS) ЭТС позволит увеличить ее ресурс. [21-25]

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 размах варьирования факторов, определить форму и амплитуду токов нагрузки. Провести серию опытов по циклированию на специализированном исследовательском комплексе и определить изменения физико-химических свойств аккумулятора. 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 уменьшения емкости ЛИА. Модернизировать типовую накопительную установку электромобиля путем гибридизации основного (ОНЭ) и буферного накопителя энергии (БНЭ), оптимизирующего режим работы ЛИА. Сопоставить результаты моделирования деградации ЛИА в типовой и гибридной установке.

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.

Методология и методы исследований. 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.

Научная новизна 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 результатов работы.

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 ЛИА.

Теоретическая значимость научно-исследовательской работы:

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.

На защиту выносятся:

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. Результаты 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.

Реализация результатов. 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: зарядно-разрядные токи, длительности режима разряда и общего времени работы. На разработанном исследовательском стенде 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 модель тягового привода электромобиля может применяться в курсе “Теория электрической тяги”.

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».

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.

Апробация результатов.

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”.

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 модели и проведение имитационного моделирования, подготовка публикаций, научных докладов и рукописи диссертации.

Публикации. 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, 8 докладов на международных и всероссийских конференциях, также получено свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 109 наименований и трех приложений. Текст диссертации содержит 121 страницу, 52 рисунка, 24 таблицы.

ГЛАВА 1 ПРИМЕНЕНИЕ ЛИТИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В КАЧЕСТВЕ ТЯГОВОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

1.1 Анализ энергетической установки электромобиля

На современном этапе развития транспортной отрасли ключевой технологией, позволяющей сократить энергопотребление и выбросы парниковых газов, являются ЭТС. Уменьшение запасов невозобновляемых энергоресурсов, повышение стоимости энергоносителей и обострение экологических проблем обуславливают актуальность вопросов повышения энергоэффективности. Согласно федеральному закону «Об энергосбережении и энергетической эффективности» N 261-ФЗ, энергетическая эффективность – это «характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта» [26]. Для ЭТС полезным эффектом является осуществление транспортной работы с обеспечением комфортных условий.

В общем виде тяговый привод легкового ЭТС представлен на функциональной схеме, показанной на рисунке 1.1.

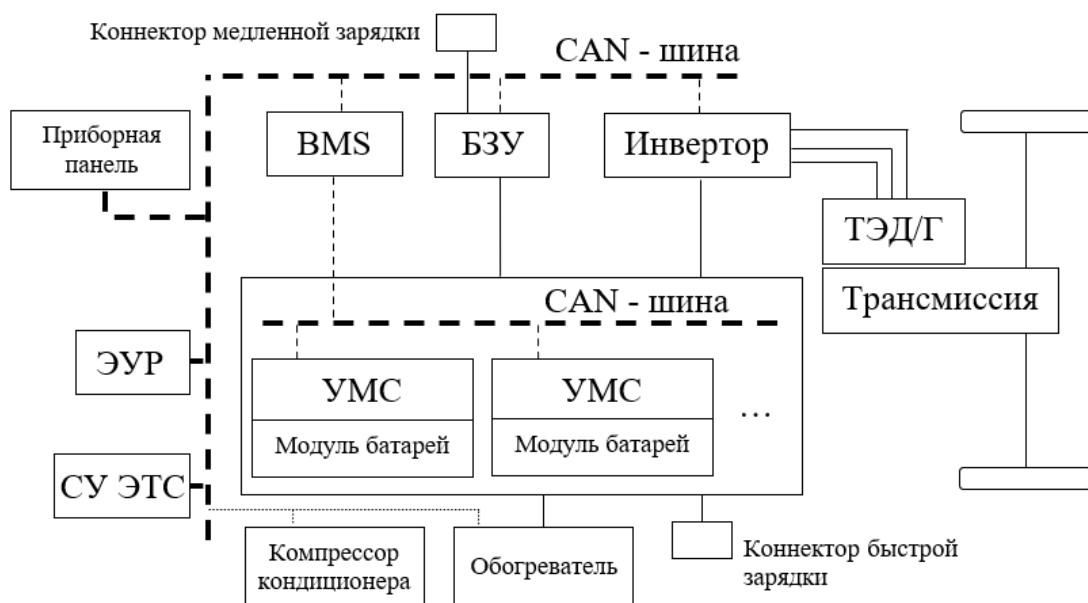


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема тягового привода электромобиля

На рисунке 1.1 обозначено: БЗУ – бортовое зарядное устройство, УМС – устройство мониторинга состояния модуля батарей; ТЭД/Г – тяговый электродвигатель/генератор, ЭУР – электрический усилитель руля, BMS – система управления АБ, СУ ЭТС – система управления электромобилем, CAN-шина – система цифровой связи управления электрическими устройствами ЭТС.

Расход энергии при функционировании ЭТС суммируется из полезных мощностей и потерь. Основными потребителями являются тяговый привод, вспомогательные цепи и системы обеспечения комфорта. Таким образом баланс мощности ЭТС:

$$P_0 = P_m + P_{cn} + \Delta P_0 \quad (1)$$

где ΔP_0 – механические и электрические потери мощности в тяговом двигателе, преобразователе собственных нужд, зубчатой передаче, проводниках и т.д.

P_m – механическая мощность, реализуемая на ободу колеса;

P_{cn} – мощность собственных нужд и вспомогательных цепей. К ним относят силовые цепи компрессора кондиционера, обогревателя, системы управления батареей, электромобилем, усилителем руля, приборная панель водителя, освещение и др.

Баланс мощностей в различных режимах движения ЭТС представляются соотношением:

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= P_{cn} + \Delta P_0 + P_m - \text{тяги}; \\ P_0 &= P_{cn}, \quad \Delta P_0 + P_m = 0 - \text{выбег}; \\ P_0 &= P_{cn} + \Delta P_0 - P_m - \text{рекуперативное торможение.} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Электромобиль представляет собой сложную техническую систему, подверженный нагрузке, часто изменяющейся по величине и направлению [27]. Возможность возврата части энергии во время рекуперативного торможения позволяет значительно увеличить энергоэффективность тяговой установки электромобиля [28-32]. Однако форсированные режимы работы ЭТС с кратковременными подзарядками негативно сказываются на сроке службы

аккумулятора [33 - 35]. При этом аккумуляторные ячейки, входящие в состав БН электромобиля подвержены разной скорости старения. Поэтому возникает необходимость непрерывного мониторинга параметров и управления каждой ячейкой АБ для точного прогноза срока службы и оптимизации их режима работы. Поэтому в состав тягового привода внедряется высокоинтеллектуальная BMS (рисунок 1.2), решающая следующие задачи:

- **Мониторинг параметров ячеек** в режиме заряда и разряда. Фиксируются напряжение и температура, затем данные передаются контроллеру управления ячейками. Как правило, устанавливаются интегральные схемы, оснащенные алгоритмами мониторинга и последующего срабатывания предохранительных механизмов при возникновении нештатных ситуаций. На этом этапе BMS должна гарантировать невозможность перезаряда, недостаточного заряда и переразряда ячеек.

- **Оптимизация энергопотребления.** В отличие от системы мониторинга, отслеживающей уровни заряда и степень деградации ячеек, на этом этапе работа BMS заключается в поддержании параметров уровня заряда и степени деградации в пределах заданных значений. В режимах заряда и разряда BMS определяет допустимую величину тока для отдельных ячеек. Кроме этого, при разряде не допускается уменьшение напряжения АБ ниже заданного значения, для чего происходит обмен информацией о состоянии с контроллером ТЭД/Г.

- **Безопасность электромобиля** является первоочередной задачей, т.к. необнаруженный тепловой разгон может привести к аварии. Поэтому BMS фиксирует температуры отдельных ячеек для недопустимости перегрева. В стандартах ISO 26262 содержатся основные требования, предъявляемые системам, обеспечивающим безопасность транспортных средств [36];

- **Оптимизация заряда аккумулятора.** Со временем элементы БН деградируют, и BMS должна учитывать ухудшение параметров отдельных ячеек, изменяя уставки минимального и максимального напряжения.

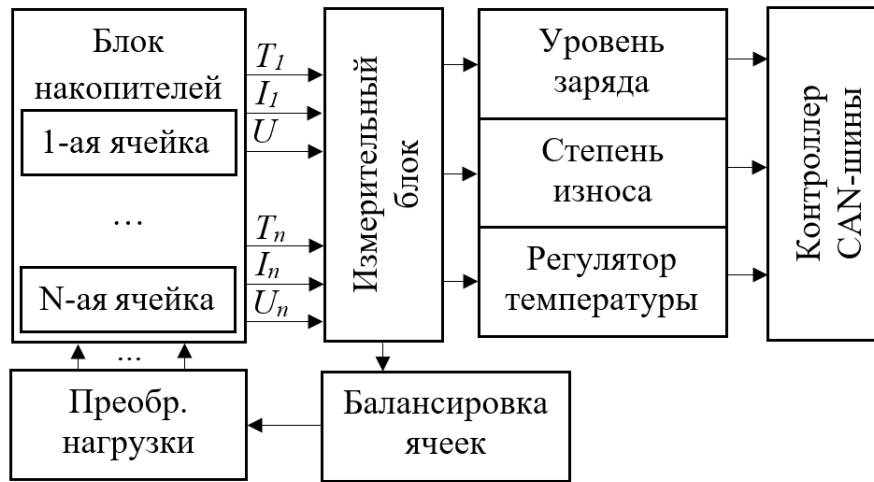


Рисунок 1.2 – Устройство системы управления БН электромобиля

Основные алгоритмы, входящие в BMS:

- **Балансировка ячеек.** Ячейки, входящие в состав БН электромобиля теряют емкость с разной скоростью. Из-за этого ячейки с высокой степенью деградации разряжаются и заряжаются быстрее, чем остальные, и БН не используется с максимальной эффективностью. Для согласования разных емкостей используют активную и пассивную балансировку ячеек. Пассивная балансировка заключается в отводе энергии с ячеек, зарядившихся быстрее на резистивную нагрузку. В методе активной балансировки применяются двунаправленные DC/DC преобразователи под управлением BMS через интерфейс SPY. Матричный коммутатор подключается к преобразователям, регулирующим ток каждой ячейки как во время заряда, так и во время разряда, не допуская перезаряд и переразряд;

- **Коммуникационные алгоритмы.** Для эффективного функционирования различные компоненты тягового привода электромобиля запрашивают параметры БН. К примеру, BMS взаимодействует с контроллером ТЭД для проверки потребляемого тока. Аналогично BMS осуществляет информационный обмен с внешним зарядным устройством для передачи необходимой информации о токе и выходном напряжении БН. Также, система контролирует начало и окончание зарядки, и при возникновении ошибок, не соответствующих спецификации, происходит отключение и остановка заряда. Информационный обмен строго

регламентирован и может использовать протоколы: CAN, J1939, CHAdeMO и др. [37-39]

В настоящее время АБ определяет значительную часть от стоимости электромобиля и достигает 25-40% [3] 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.

1.2 Анализ рынка применяемых литиевых аккумуляторов на электротранспортных средствах

ЛИА получили широкое распространение благодаря высокой энергоэффективности и удельной мощности, компактными массогабаритными показателями, быстрому заряду, широкому диапазону рабочих температур, отсутствию эффекта памяти и низкому уровню саморазряда. Эти свойства делают их подходящими для применения в тяговой установке ЭТС.

По результатам анализа применяемых ЛИА в составе тягового привода современных электромобилей (рисунок 1.3) выявлены основные типы – литий-железо-фосфатные (LFP, lithium iron phosphate), литий-никель-марганец-кобальт-оксидные (NMC, lithium nickel manganese cobalt oxide) и литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные (NCA, lithium nickel cobalt aluminum oxide) аккумуляторы [40].

Начиная с 2019 г. наблюдается тренд, направленный на увеличение доли LFP-ячеек. Автомобильные концерны выступили с планами использования LFP-ячеек из-за их меньшей стоимости и дополнительной безопасности. По прогнозам аналитиков BNEF, Roskill и др. доля LFP батарей в электромобилях составит до 40% к 2030 г. [41, 42]

По данным, представленным в отчете Bloomberg [43], средневзвешенная стоимость ЛИА уменьшилась более чем на 1000\$. Начиная с 2015 г. снижение цены значительно замедлилось (рисунок 1.4), однако наблюдается убывающая

тенденция. По прогнозу, к 2024 г., несмотря на колебания кратковременные изменения, стоимость ЛИА составит менее 100\$, что является порогом, при котором электромобили обеспечивают маржинальность, сравнимую с классическими автомобилями с ДВС.

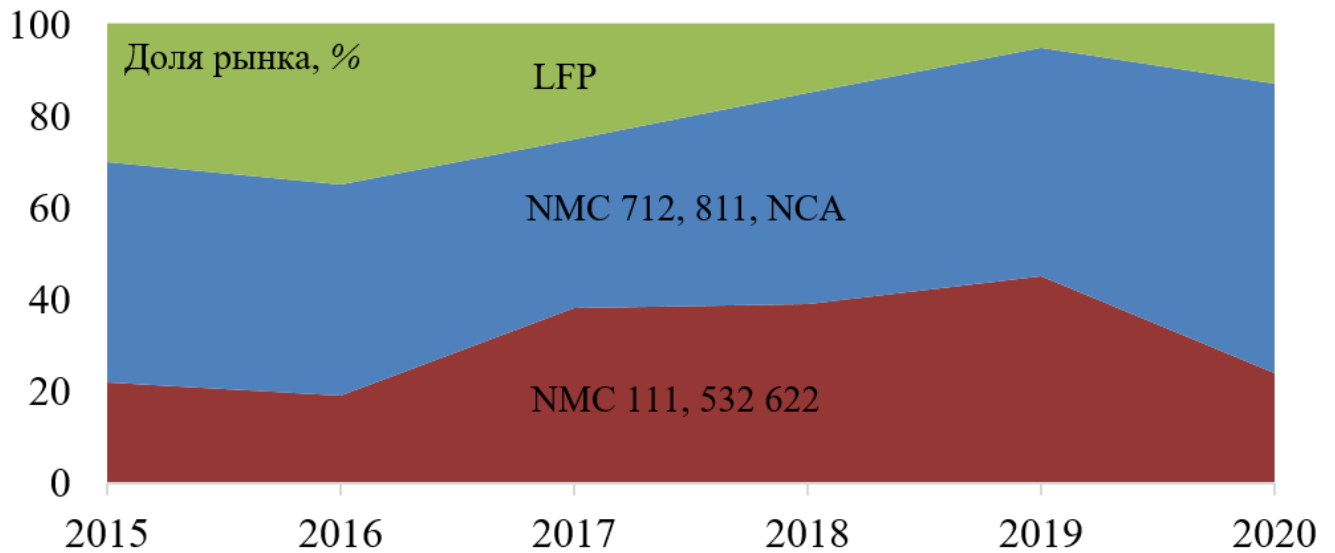


Рисунок 1.3 – Доли рынка различных типов ЛИА

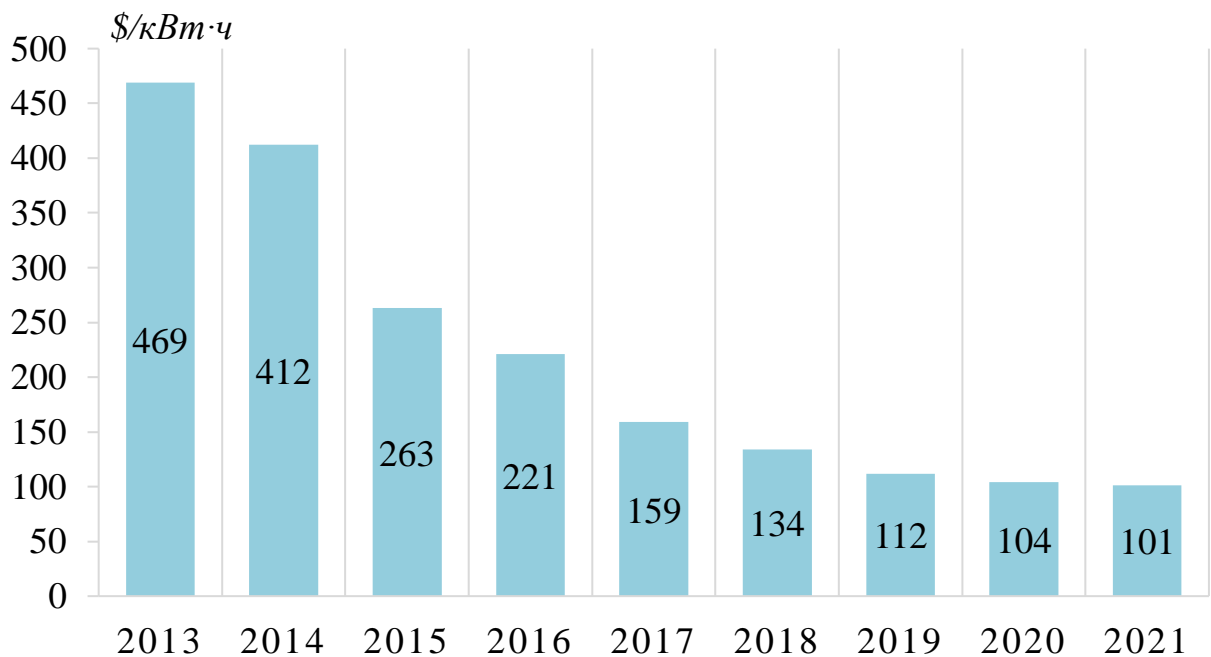


Рисунок 1.4 – Изменение средневзвешенной стоимости ЛИА

1.3 Механизмы старения литиевых ячеек

В настоящее время выделяют несколько показателей, характеризующих работоспособность и уровень деградации АБ. Уровень заряда аккумулятора (State of charge, SOC) является мерой количества заряда в батарее по сравнению с количеством, которое она может удерживать при максимальном или номинальном заряде. На максимальный уровень могут влиять такие факторы, как температура и степень деградации батареи. Таким образом, состояние батареи (State of health, SOH) является еще одним важным аспектом BMS тягового привода ЭТС. SOH – показатель степени деградации батареи; он используется для прогнозирования срока службы и прогнозирования состояния отказа. SOH определяется по следующему соотношению:

$$SOH = \frac{Q_p}{Q_f} \cdot 100\% \quad (3)$$

где Q_p – текущая доступная емкость АБ;

Q_f – емкость АБ в первоначальном состоянии.

Как правило, если емкость АБ падает ниже 80% от ее первоначальной величины, то АБ считают непригодной для использования в прикладных целях. Это связано с экспоненциальным снижением емкости по достижении уровня в 80%.

И SOC, и SOH не являются измеряемыми величинами, поэтому важно, чтобы они оценивались точно, поскольку неправильная оценка может снизить производительность АБ и сократить срок службы из-за перезаряда и глубокого разряда.

Принципиальная схема работы ЛИА изображена на рисунке 1.5. Слева изображен отрицательный электрод из графита. Его структура характеризуется наличием слоев, между которыми могут внедряться ионы лития (черные точки). Справа изображен положительный электрод из литий-марганцевой шпинели, в

структуру которой также могут внедряться ионы лития. В качестве электролита используют растворы солей лития в неводных растворителях [44, 45].

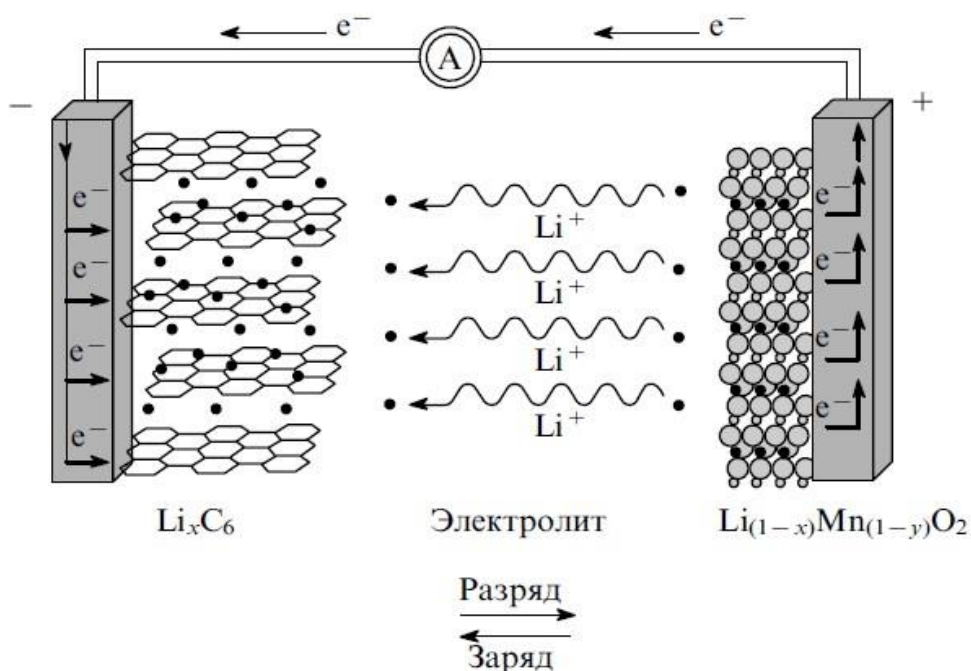


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема работы ЛИА на примере ЛМО ячейки

Характеристики ЛИА подчиняются закономерностям, общим для всех типов аккумуляторов. Идеальный аккумулятор должен быть полностью обратимым: все электричество должно расходоваться только на токообразующие реакции заряда и разряда. В реальном аккумуляторе всегда имеют место некоторые процессы (электрохимические и химические) помимо токообразующих реакций. На эти посторонние процессы (обычно, необратимые) расходуется определенное количество электричества. В результате при каждом цикле разрядная емкость оказывается меньше, чем количество электричества, израсходованное на предыдущей стадии заряда. Кроме того, по мере циклирования емкость снижается от цикла к циклу. Природа необратимых процессов в аккумуляторах разных электрохимических систем различна.

В настоящее время существует много видов коммерческих интеркаляционных материалов, которые можно использовать в тяговых ЛИА для электромобилей [46]. Некоторые типичные катодные материалы включают оксид лития-марганца (ЛМО,

LiMn₂O₄), фосфат лития-железа (LFP, LiFePO₄), слоистый оксид металла, такой как Li[Ni_xCo_yMn_{1-x-y}]O₂ (NCM), и материалы, богатые литием. Материалы анода включают графит (C), Li₄Ti₅O₁₂ (LTO) и некоторые сплавы анодных материалов, такие как Si.

В настоящее время существует только несколько типов ЛИА с определенными комбинациями анода и катода, включая LFP/C, LMO/C, NCM/C, NCM/LTO и т. д. (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Сравнительная характеристика ЛИА

Параметр		Размерность	Тип ЛИА					
			LCO/ C	LMO/ C	NCM/ C	LFP/C	NCA/ C	NCM/ LTO
Напряжение	Ном.	<i>B</i>	3,6	3,8	3,6	3,3	3,6	2,4
	Макс.		4,2	4,2	4,2	3,6	4,2	2,8
Удельная энергоемкость		<i>Bт·ч/ кг</i>	150- 200	100- 150	150- 220	90-120	200- 260	50-80
Удельная мощность		<i>Bт/кг</i>	420	400	500	1000	520	3000- 5100
Ток заряда		-	0,7- 1C	до 3C	0,7-1C	1C	0,7C	до 5C
Ток разряда		-	1C	до 10C	до 2C	1C	1C	до 10C
Количество циклов		-	500- 1000	300- 700	1000- 2000	1000- 2000	500	3000- 7000
Диапазон рабочих температур	Мин.	<i>°C</i>	-20	-20	-20	-20	-20	-30
	Макс.		+150	+250	+210	+60	+150	+50

Элемент LFP/C имеет длительный срок службы и высокую степень безопасности, но малую удельную энергию и мощность. Ячейка LMO/C имеет большую плотность энергии и удельную мощность, но малый срок эксплуатации. Ячейка NCM/C имеет высокую плотность энергии и низкую безопасность; в основном используется в ЭТС, преимущественно в легковых автомобилях. Ячейка NCM/LTO имеет высокую мощность, высокую безопасность и длительный срок службы, но низкую плотность энергии из-за низкого напряжения; и она часто

используется в электромобилях с быстрым зарядом и гибридных транспортных средствах [47].

1.3.1 Механизмы старения анодных материалов

В настоящее время в большинстве коммерческих ЛИА используются углеродистые аноды, как правило, из материалов на основе графита. Как показано на рисунке 1.6 окно электрохимически стабилизированного напряжения обычного жидкого органического электролита составляет около 1–4,5 В [48, 49], в то время как рабочее напряжение графитового анода составляет около 0,05 В [50, 51], что находится за пределами окна стабилизированного напряжения обычных электролитов.

В процессе заряда и разряда происходит потребление ионов лития в сочетании с разложением электролита, образуя пассивирующий защитный слой на поверхности графитового анодного электрода, который обычно называют пленкой SEI (Solid electrolyte interface) [52-54]. Теоретически пленка SEI переносит только ионы лития и предотвращает перенос электронов. Таким образом, предотвращается дальнейшее разложение электролита, и ЛИА с углеродистыми анодами стабильно работают в цикле. Пленка SEI в основном образуется во время первых нескольких процессов заряда, особенно во время первого цикла, что приводит к быстрому снижению емкости аккумулятора [55]. При заряде и разряде АБ объем графитового материала анода будет изменяться примерно на 10% из-за внедрения и извлечения ионов лития [56]. Из-за изменения объема [57] пленка SEI может треснуть, что приводит к контакту и реакции между литированным графитом и электролитом, вызывающей расход запасов электролита и ионов лития [58]. Вследствие этого происходит непрерывное образование и утолщение пленки SEI, постоянное снижению доступной емкости аккумулятора, а также постоянное увеличение внутреннего сопротивления аккумулятора [59].

Образование и постоянное утолщение пленки SEI на поверхности графитового анода является одной из основных причин старения ЛИА [60, 61]. Кроме того, отложение лития из-за низкотемпературного заряда, быстрого заряда или перезаряда также может привести к потере запаса электролита и ионов лития [62, 63]. Совместная интеркаляция ионов Li с молекулами растворителя может привести к расслаиванию частиц графита, что приводит к потере активного материала. Коррозия токоприемника и разложение связующего могут привести к потере активного материала [56]. Эти побочные реакции могут привести к деградации аккумулятора.

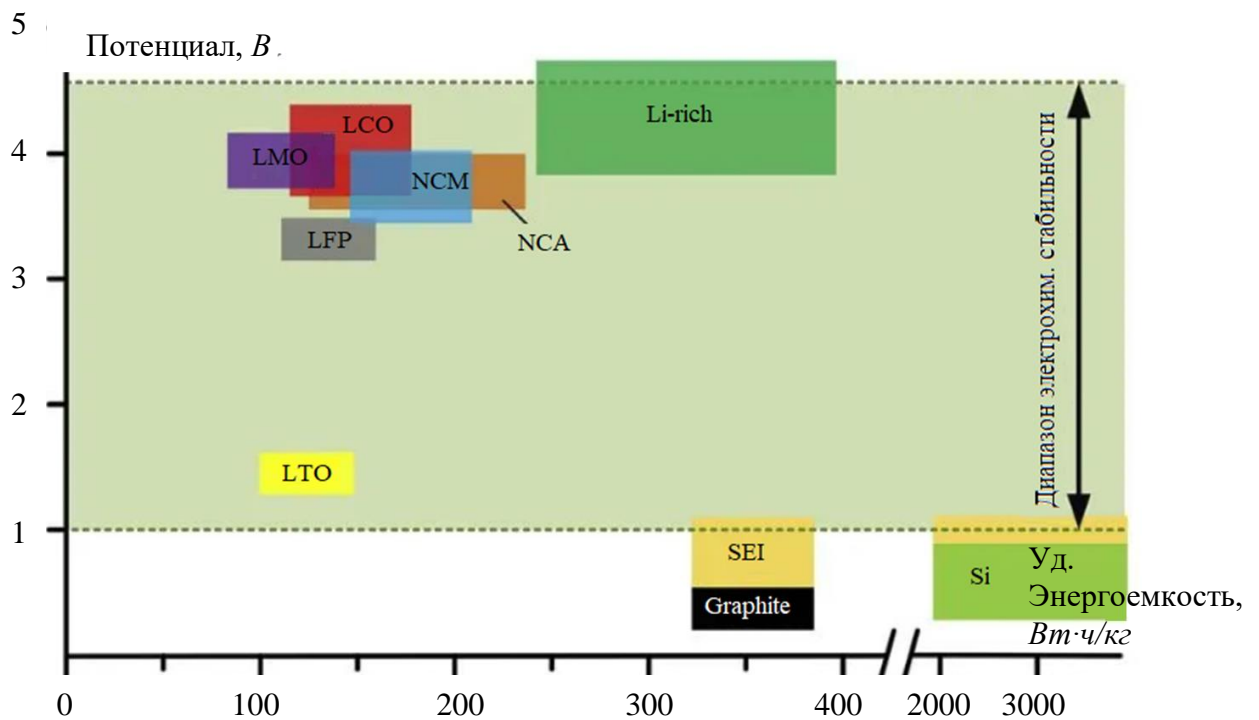


Рисунок 1.6 – Потенциал и удельная энергоемкость активных материалов в ЛИА

1.3.2 Механизмы старения катодных материалов

В настоящее время в большинстве коммерческих мощных ЛИА для электромобилей используются катодные материалы из шпинелевого анода LMO, оливинового анода LFP или многослойного анода NCM.

Оливиновый катод LFP имеет низкое напряжение и высокое сопротивление, что приводит к низкой удельной энергоемкости. Преимуществами же являются длительный срок службы, срок хранения, низкая цена и степень безопасности. В настоящее время это один из наиболее широко используемых катодных материалов для ЛИА, особенно в коммерческих ЭТС [64]. Ионы железа относительно стабильны, однако ионы железа частично растворяются в электролите, что приводит к малой потере активных материалов (LAM, loss of active materials) катода. Ионы железа также могут восстанавливаться на поверхности анода и катализировать образование SEI, что приводит к увеличению внутреннего сопротивления и потере ионов лития (LLI, loss of lithium ion inventory). По сравнению с катодом LMO-ячеек, срок службы ЛИА с катодом LFP значительно дольше. Аккумуляторы, состоящие из катода LFP и анода LTO, демонстрируют низкое напряжение и малую удельную энергоемкость, но имеют длительный срок службы [65].

1.4 Характеристика аккумуляторной батареи и влияние различных факторов

Для ЭТС наиболее важными характеристиками аккумуляторной системы являются емкость и мощность, которые должны точно оцениваться BMS и интерпретироваться, как SOH. Таким образом, как показано на рисунке 1.7, факторы, вызывающие деградацию батареи, приводят к изменению электрических характеристик, а именно емкости и мощности.

Для электромобилей обычно используются аккумуляторы с большой энергоемкостью, т.к. основной функцией аккумулятора является накопление заряда. Деградацию батареи в этом случае можно оценить по снижению емкости. В тяговой установке гибридных автомобилей обычно используются аккумуляторы большой мощности, и основная функция аккумулятора заключается в удовлетворении требований к высокой импульсной мощности. Поэтому больше внимания уделяется падению мощности. Для подключаемого

гибридного автомобиля учитывают как снижение емкости, так и снижение мощности.

Окончание срока службы (EOL) аккумуляторов электромобилей принимают завершенным по достижении 80% от начальной емкости. Для аккумуляторов гибридных электромобилей EOL принимается по достижении 50% от начального значения мощности.



Рисунок 1.7 - Диагностика деградации ЛИА

Обычно основными причинами снижения емкости АБ являются потеря активного материала и потеря ионов лития. Увеличение внутреннего сопротивления батареи также повлияет на ее емкость. Основной причиной снижения заряда батареи является увеличение внутреннего сопротивления.

Срок службы батареи разделяется на две части: календарный срок службы и циклический срок службы. Календарный срок службы относится к деградации батареи, вызванной хранением без циклов. Срок службы АБ с учетом деградации, вызванной циклами заряда-разряда, соответствующих рабочим циклам в ЭТС относят к циклическому сроку службы.

Большинство аккумуляторов, используемых в настоящее время в электромобилях, демонстрируют нелинейную характеристику старения [66, 67], которую можно условно разделить на три этапа, как показано на рисунке 1.8. На первом этапе (I) из-за формирования SEI на аноде происходит LLI, что приводит к быстрому снижению емкости аккумулятора в течение первых нескольких циклов, особенно в процессе первого заряда. На втором этапе (II) емкость батареи снижается из-за различных побочных реакций внутри батареи. На третьем этапе (III) происходит быстрое падение емкости [68] и рост сопротивления [66] ближе к концу срока службы. Причиной может быть потеря запасов ионов лития из-за осаждения лития [66, 68] и/или потеря активного материала из-за потери электролита [69], разрушения связующего и изменения объема [70].

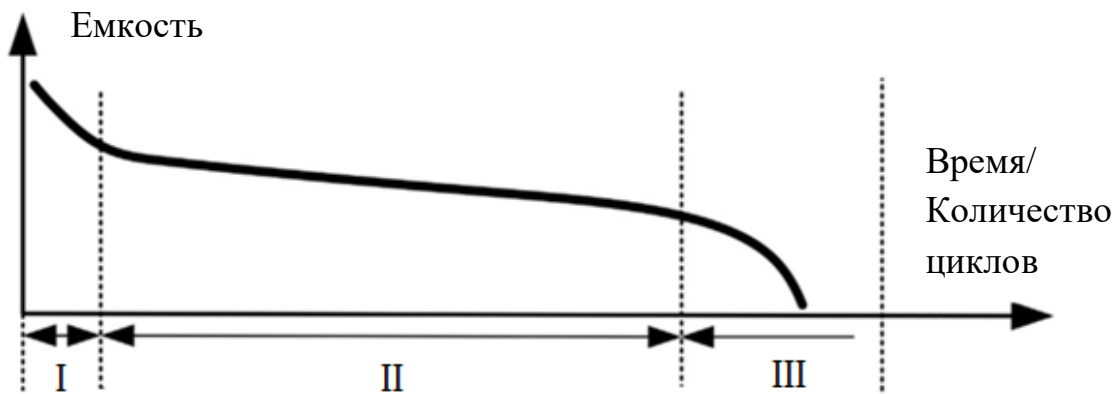


Рисунок 1.8 – Общая характеристика снижения емкости ЛИБ

Уменьшение количества энергии, которое может накапливать ЛИА связано с различными механическими и электрохимическими процессами, многие из которых зависят от условий эксплуатации. Чтобы предсказать срок службы батареи и чувствительность деградации к различным профилям нагрузки, было

предложено множество моделей деградации. Их можно условно разделить на три категории:

1. Эмпирические модели, интерполирующие набор данных из крупномасштабного эксперимента с циклическим перемещением. Они могут быть очень эффективными, но не имеют универсальности, поскольку они действительны только для точного химического состава батареи и условий эксплуатации, проверенных в эксперименте, и могут демонстрировать растущую неточность прогнозов состояния батареи при использовании для экстраполяции на большие расстояния. [71-75]

2. Физические модели. Обычно это наборы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих физические процессы, происходящие в батарее. Они полезны для понимания возможных механизмов деградации и могут быть более надежными, чем чисто эмпирические подходы, но часто являются сложными в вычислительном отношении и имеют много параметров, которые могут быть неизвестны. [76-78]

3. Модели «машинного обучения». Обычно это подходы «черного ящика», похожие на эмпирический подход, но с большей гибкостью. Они могут быть быстрыми и точными, но для их эффективности требуется большой набор данных, и часто бывает трудно интерпретировать и объяснить их результаты. [79-82]

1.4.1 Влияние фактора температуры на скорость деградации аккумулятора

Температура является одним из важных факторов, влияющих на срок службы батареи. Как высокие, так и низкие температуры могут привести к ускоренной деградации аккумулятора [83]. Как правило, для большинства коммерческих ЛИА подходящий интервал рабочих температур составляет 15–35°C. Скорость различных реакций внутри аккумулятора, включая основные реакции и побочные реакции, зависит от температуры. Чем выше температура,

тем выше скорость побочных реакций. Более того, если батарея превысит определенную температуру, это может привести к дальнейшему самонагреву, что приводит к тепловому разгону. При низкой температуре происходит увеличение поляризации из-за роста внутреннего сопротивления, что может привести к дополнительным побочным реакциям. В частности, заряд при низкой температуре может привести к отложению лития, что вызывает быструю деградацию аккумулятора. Охрупчивание материала при низкой температуре также может повлиять на срок службы батареи. Следовательно, обеспечение работы батареи в пределах подходящего температурного интервала является ключом к увеличению срока службы батареи. Температура АБ определяется многими факторами, в том числе температурой окружающей среды, теплоемкостью, теплопроводностью и тепловыделением АБ, системой нагрева и охлаждения и т.д.

Влияние низкой температуры при заряде на циклический срок службы было рассмотрено в [15]. В работе использовались LFP – ячейки форм-фактора 32650 с номинальной емкостью 5 А·ч. Ячейки циклировались при температурах -10°C и -20°C с токами заряда 0,3С и 0,5С (рисунок 1.9). Исследование показало значительное расхождение в скорости деградации при разных температурах и токах заряда. Скорость деградации при 0,3С, -10°C (№ 3 и 4) самая медленная, на втором месте 0,5С, -10°C (№ 1 и 2), 0,3С, -20°C (№ 5 и 6) самая быстрая. Остаточная емкость ячейка №1 и №2 после 40 циклов составляет 79,93% и 78,69%. Ячейка №3 и №4 теряли емкость относительно медленно в течение 80 циклов, а остаточная емкость составила 88,45% и 87,38%. Емкость ячейки №5 снизилась до 80,2%, а №6 до 79,8%. Все батареи имеют одинаковые законы затухания. Таким образом, скорость уменьшения емкости положительно коррелирует с током заряда и отрицательно коррелирует с низкой температурой.

В работе [13] рассмотрен процесс деградации LFP-ячейки емкостью 2,3 А·ч при циклировании и хранении с температурой 25 и 45°C. В качестве цикла нагрузки использовался простой и комплексный профиль. Простой профиль состоит из последовательного заряда-разряда током 1С с релаксирующей паузой 10 мин. после разряда до минимального напряжения. Комплексный профиль

состоит из более сложной формы разрядной нагрузки (рисунок 1.10, а), ток заряда составляет 0,5С, а релаксация после заряда и разряда составляет 30 мин. и 10 мин. соответственно. Результаты циклирования и хранения показаны на рисунке 1.8, б.

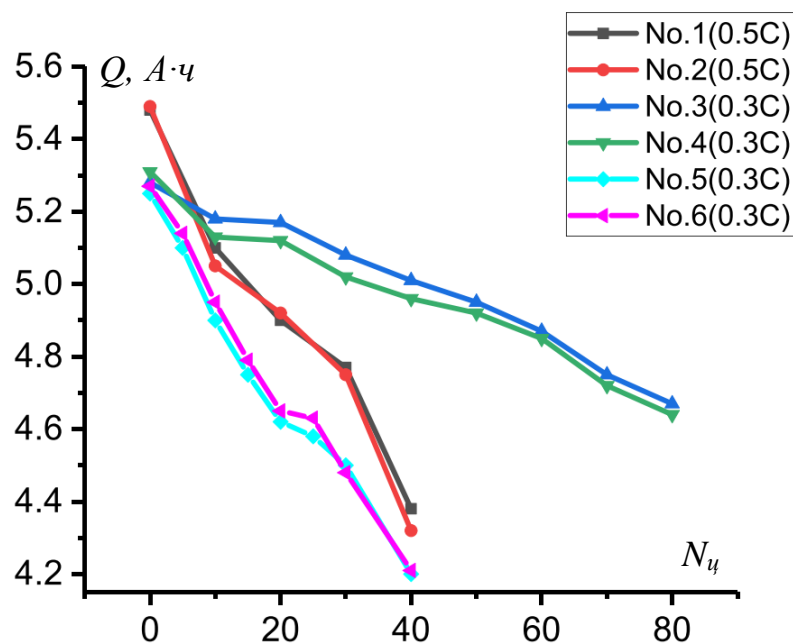


Рисунок 1.9 - Деградация емкости аккумуляторов при разных режимах (№ 1-4 при -10°C и № 5, 6 при -20°C)

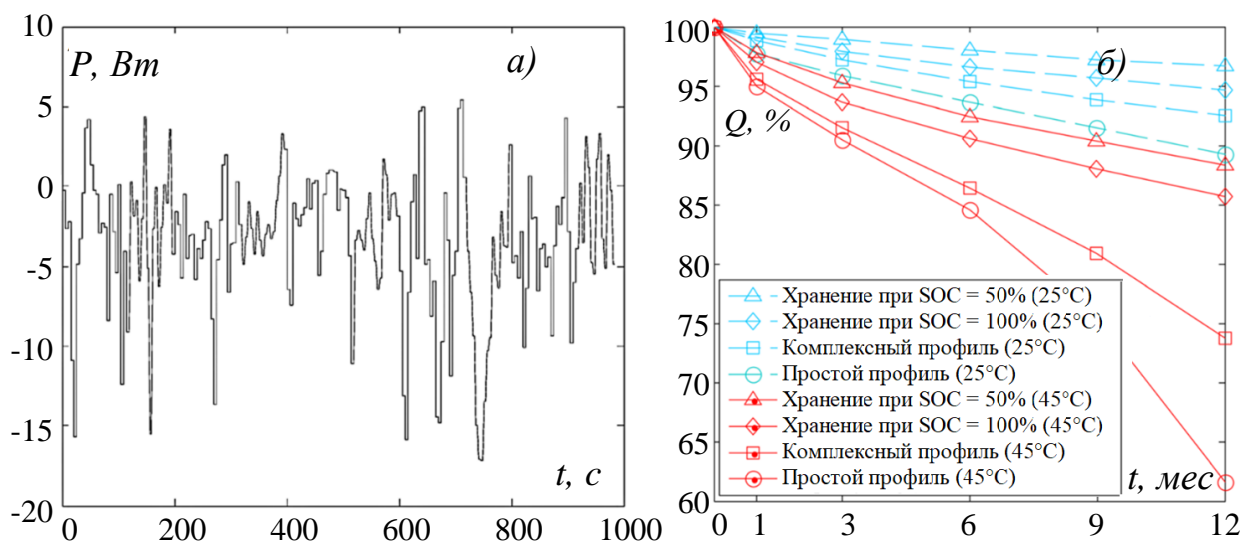


Рисунок 1.10 – Результаты тестирования ячеек:

а) профиль нагрузки, б) результаты циклирования и хранения

Сравнение ячеек, выдержанных при одинаковой температуре, показало, что ячейки при циклировании теряют больше емкости, чем ячейки при хранении.

Показано, что скорость деградации значительно зависит от температуры - потеря емкости составила в 4 раза больше для ячеек, выдержанных при 45°C при одинаковой токовой нагрузке.

Уменьшение емкости ячеек в процессе старения имеет линейную тенденцию, за исключением первых нескольких месяцев, и наблюдается ускорение через 6 мес. для элементов, проциклированных при 45°C, что возникает из-за потери графитового активного материала при этой температуре.

Циклирование при 45°C согласно комплексному профилю вызвало большую потерю емкости, чем обычное циклирование, что свидетельствует о сильном влиянии периодов покоя на старение ячеек при такой температуре.

1.4.2 Влияние уровня заряда на скорость деградации аккумулятора

Большее значение SOC указывает на более высокое напряжение на клеммах, что предполагает низкий потенциал анода и высокий потенциал катода. Для графитового анода с низким потенциалом скорость побочных реакций, таких как утолщение SEI, будет выше, что ведет к более быстрой деградации батареи [50]. В случае перезаряда или заряда при низкой температуре, потенциал анода может стать слишком низким и достичь потенциала осаждения лития, что вызовет побочную реакцию осаждения лития, ускоряющую деградацию батареи [62]. Между тем, для катода с более высоким потенциалом будет происходить окисление электролита и разложение катода [83, 84].

Малое значение SOC указывает на высокий потенциал анода и низкий потенциал катода, что увеличивает срок службы батареи. Однако, если SOC батареи слишком низкий, коррозия медного токосъемника анода и разупорядочение структуры активного материала катода резко повлияют на срок службы батареи [85].

Календарный срок службы батареи при различных SOC рассмотрен в [86]. В работе использовались LFP-ячейки форм-фактора 26650 с номинальной емкостью

3 А·ч. Из рисунка 1.11 следует, что для длительного хранения рационально поддерживать SOC на уровне 25%.

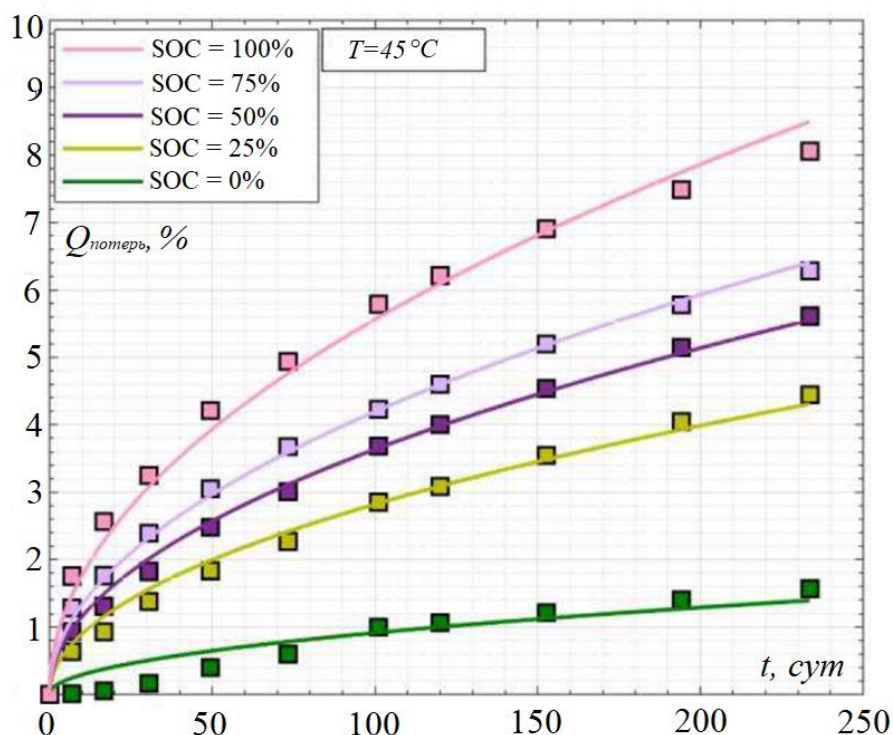


Рисунок 1.11 – Зависимость потерь емкости при разных SOC от времени

1.4.3 Влияние глубины разряда на скорость деградации аккумулятора

Для движения ЭТС, как правило, БН заряжается до 100% и затем разряжается в процессе передвижения. Глубина разряда (DOD, Depth of discharge) также в значительной степени влияет на срок службы батареи. В работе [12] исследовалось влияние совокупности факторов времени, температуры, токов разряда и DOD на скорость деградации LFP ячейки типа 26650 номинальной емкостью 2,2 А·ч. Для тестирования ячеек на корреляцию DOD и скорости деградации ячейки приняты пять уровней фактора (90%, 80%, 50%, 20% и 10%) при величине тока разряда 0,5С.

По результатам тестирования (рисунок 1.12, а) получено, что при выбранной величине разрядного тока ячейки, циклирующиеся с большей величиной DOD деградируют быстрее. Однако при построении графика в зависимости от времени (рисунок 1.12, б), величина DOD слабо влияет на

снижение емкости. При выбранных разрядных токах большее влияние оказывает длительность цикла.

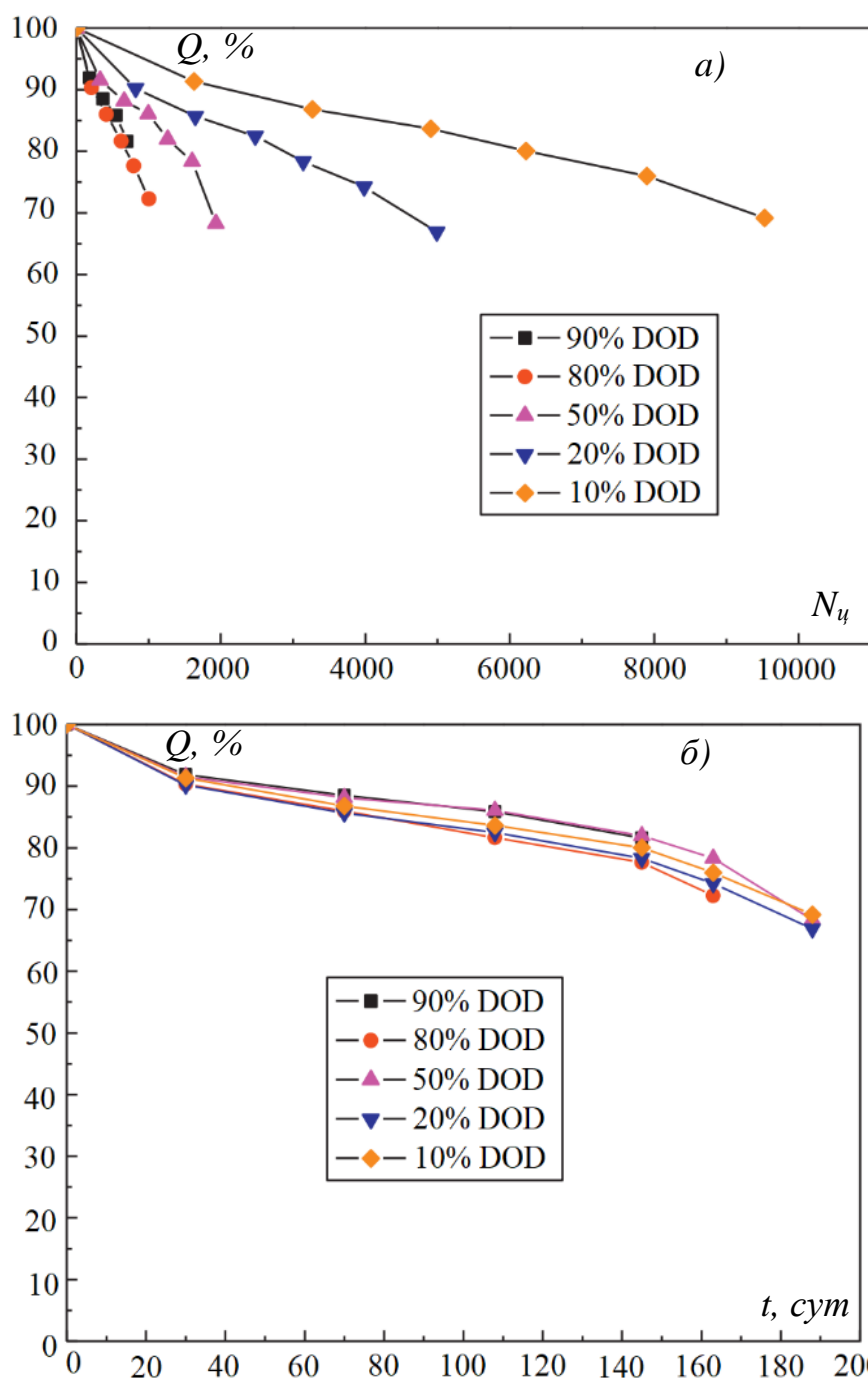


Рисунок 1.12 – Зависимость емкости ЛИА при различных DOD:
 а) зависимость от количества циклов, б) зависимость от времени

1.4.4 Влияние зарядно-разрядных токов на скорость деградации аккумулятора

Движение ЭТС в дорожном потоке создает неравномерную токовую нагрузку с частым переключением режимов заряда-разряда, которые в свою очередь также определяют скорость деградации ЛИА. В исследовании [14] рассмотрены различные нагрузочные режимы ЛИА (рисунок 1.13), из которых определены наиболее ресурсосберегающие. В качестве тестируемой ячейки использовались LFP аккумуляторы номинальной емкостью 2,3 А·ч.

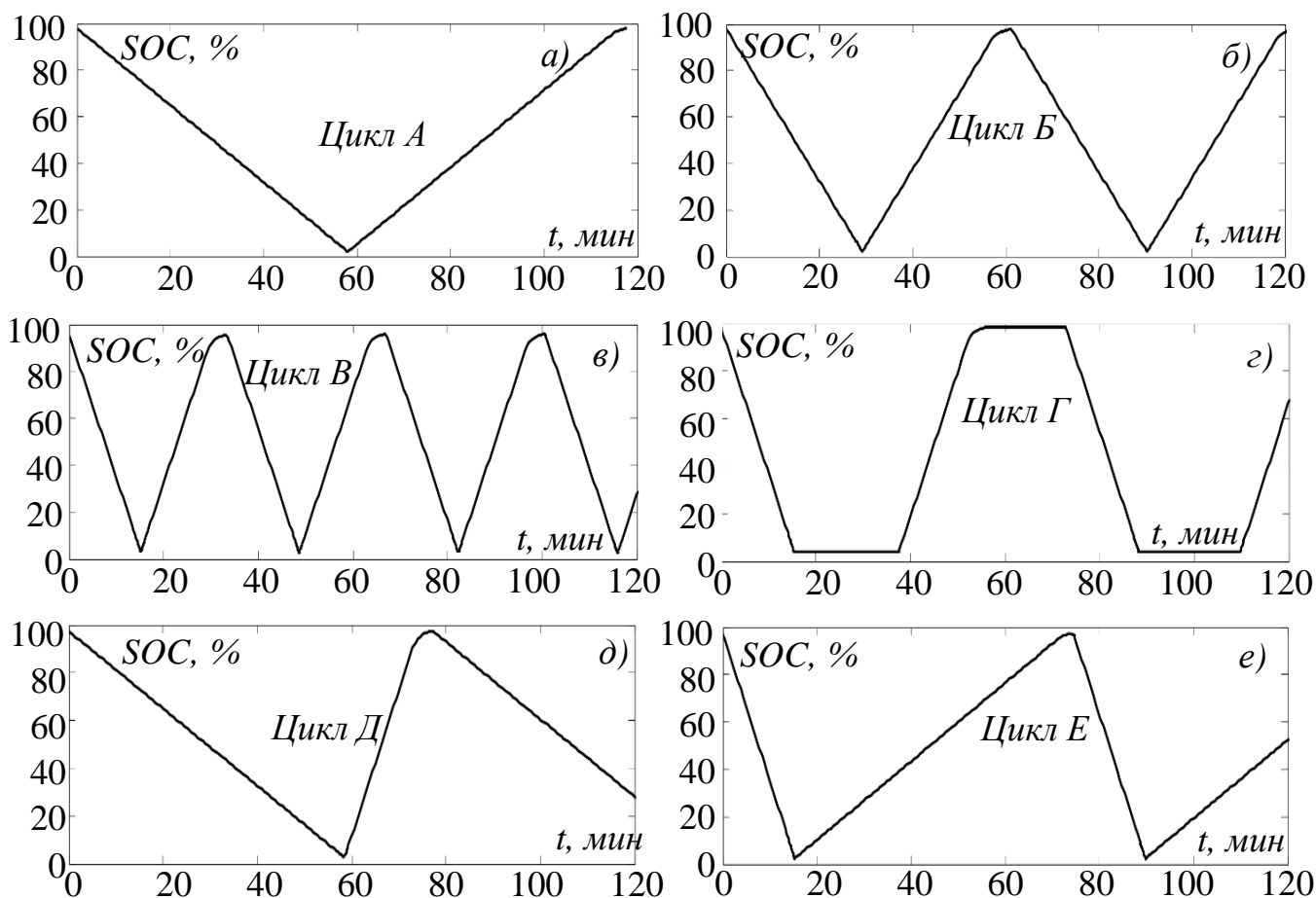


Рисунок 1.13 – Нагрузочные режимы ЛИА:

- а) разряд 1С/заряд 1С, б) разряд 2С/заряд 2С; в) разряд 4С/заряд 4С;
г) разряд 4С/перерыв/заряд 4С; д) разряд 1С/заряд 4С; е) разряд 4С/заряд 1С

Циклы А, Б, В представляют собой три варианта стандартизированных циклов при работе в полном диапазоне SOC, предназначенных для простых и

кратковременных испытаний, обычно применяемых производителями для оценки ресурса батарей. Снижение емкости при циклировании при температуре от $+24^{\circ}\text{C}$ до $+53^{\circ}\text{C}$ представлено на рисунке 1.14.

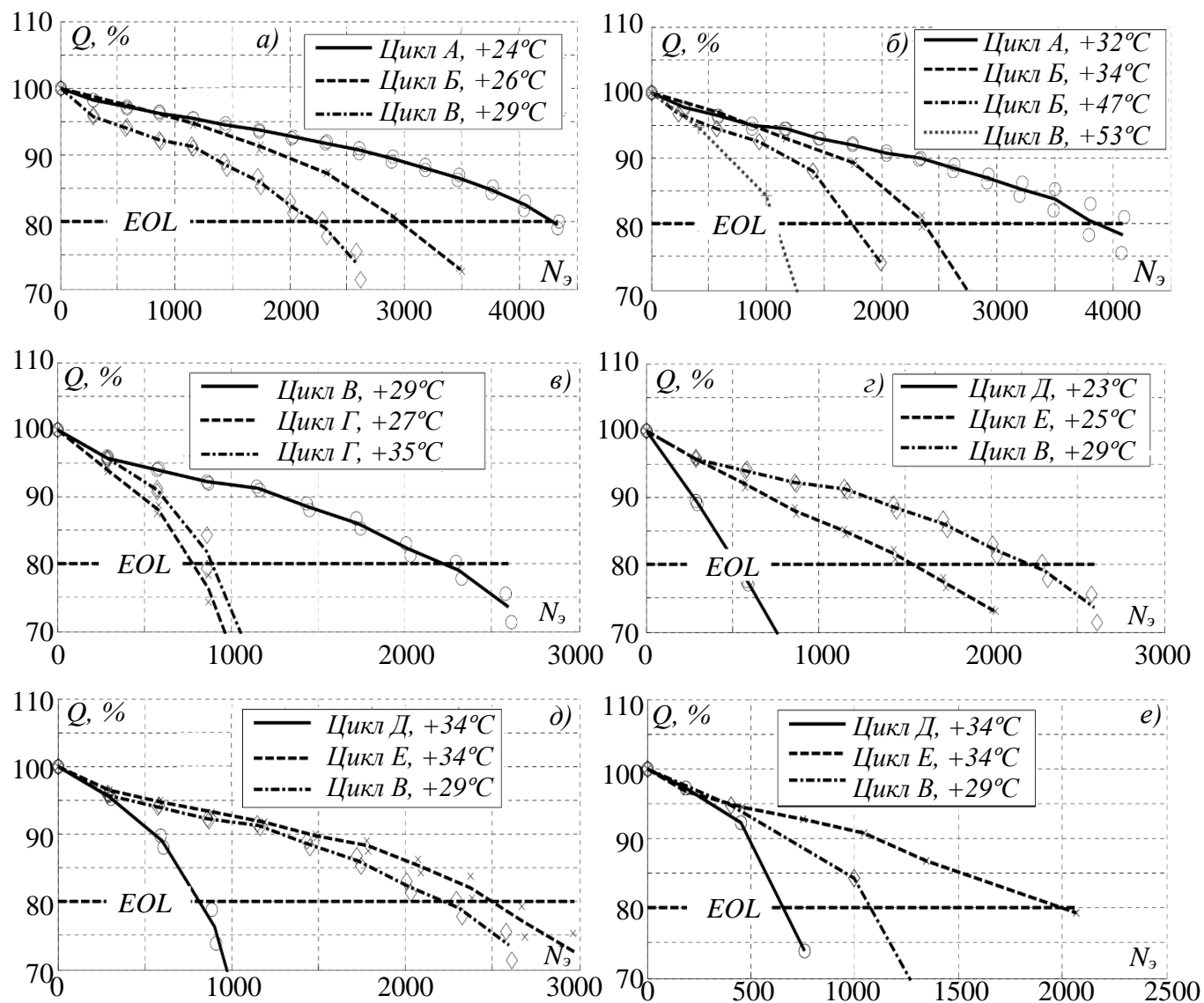


Рисунок 1.14 – Изменение емкости ЛИА для циклов А, Б, В, Г, Д и Е при температурах $+23\dots+53^{\circ}\text{C}$ в зависимости количества эквивалентных циклов с током разряда 1С

Зависимость уменьшения емкости для циклов выражена следующим образом - повышение температуры или величины тока приводит к ускоренному старению, при этом величина тока является относительно более значимым фактором.

При сравнении циклов В и Г, отличающихся 15-ти минутной паузой между нагрузочными режимами, получено резкое увеличение скорости старения (рисунок 1.14, в), несмотря на одинаковые температуры и силу тока в режиме заряда и разряда. Также проведено испытание согласно циклу Г с температурой +35°C, результаты которого показывают значительно более быструю деградацию по сравнению с циклом В при температурах +29°C и +53°C.

Результаты испытаний по циклам Д и Е показывают, что при температурах +23...+29°C сочетание малого тока разряда с высоким током заряда в цикле Д приводит к значительно более быстрому старению (рисунок 1.14, г), чем во всех других циклах, включая цикл В, в котором такой же ток заряда, но более высокий ток разряда.

Средняя температура для тестов различается, однако анализ результатов при более высоких температурах (рисунок 1.14, д и рисунок 1.14, е) показывает такое же соотношение между циклами Д и Е. Это может указывать на то, что рабочая температура не является определяющим фактором старения в данных нагрузочных режимах.

Выводы по первой главе

1. В современных моделях ЭТС в качестве БН используют три основных типа аккумуляторов – LFP, NMC и NCA. Выбор основан на совокупности технологических и экономических факторов.

2. Деградация ЛИА описывается, как снижение емкости и мощности при воздействии различных факторов. Большинство ЛИА подвержены одинаковым механизмам старения, однако влияние факторов для разных типов будет различным. К основным механизмам старения относят LAM и LLI.

3. На данном этапе технологического развития существует тренд, направленный на увеличение ЭТС с БН на базе LFP. Учитывая, что данный тип ЛИА обладает характеристиками, подходящими для применения в ЭТС,

дальнейшая работа направлена на исследование деграционных характеристик LFP.

4. Рассмотрены основные факторы, влияющие на скорость деграции – температура хранения и эксплуатации, ток заряда и разряда и DOD. Причем, совокупность факторов оказывает влияние на срок службы ЛИА, отличающееся от стандартных моделей деграции.

ГЛАВА 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ В НАКОПИТЕЛЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

2.1 Методы определения ресурса литиевого аккумулятора

Оценка текущего SOH АБ является важной задачей BMS электромобиля. Существующие методы позволяют с разной точностью оценить ресурс ЛИБ как для стационарного применения, так и в динамических системах. В зависимости от режимов работы и подходов методик определения ресурса батареи точность прогноза значительно меняться.

2.1.1 Стандартизированная процедура оценки ресурса литиевого аккумулятора

Процедура оценки ресурса БН электромобиля описана в ГОСТ Р ИСО 12405-4-2019 “Электрические дорожные транспортные средства. Требования к испытаниям для литий-ионных тяговых батарей и систем. Часть 4. Испытания для оценки рабочих характеристик” [87]. Испытания, предписанные стандартом, направлены на то, чтобы аккумулятор или система отвечали конкретным потребностям автомобильной промышленности. Стандарт позволяет изготовителям транспортных средств выбирать процедуры испытаний для оценки характеристик АБ или системы для их конкретных требований.

Испытания на долговечность при циклировании с измерением остаточной емкости предполагают моделирование старения в зависимости от количества проходящей энергии через батарею, принимая во внимание реальные условия движения. Оценка ресурса АБ электромобиля проводится процедурой для высокоэнергоемких АБ. Последовательность ресурсных испытаний представлена в таблице 2.1.

Процедура включает в себя два набора испытаний (рисунок 2.1), используемых в системах с неравномерным разрядом с последующим полным

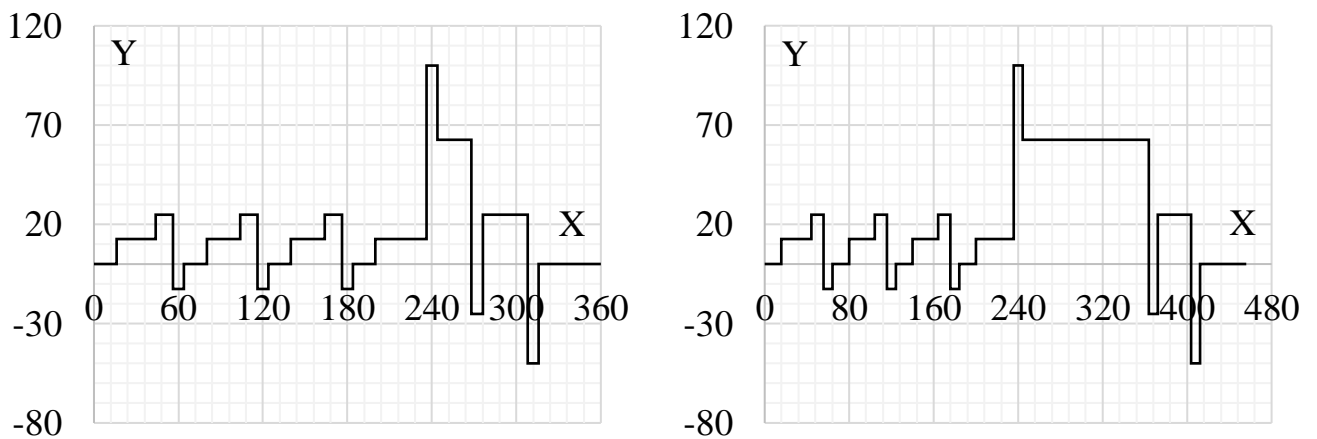
зарядом. Циклирование проводится посредством комбинирования двух испытательных режимов. Диапазон уровней заряда (УЗ) либо определяется предварительно, либо в интервале 100...20%. Испытательные режимы повторяются до тех пор, пока УЗ не достигнет нижнего предела. После этого следует заряд в соответствии с техническими характеристиками системы до верхней границы УЗ. Последовательность режимов повторяется в течение 28 сут., по истечению которых определяется емкость и импульсная мощность. Испытания продолжаются если не выполнены условия их окончаний:

- ресурсные испытания для приложений динамического разряда не могут быть продолжены дальше, например, при достижении установленных пределов;
- требования проверки параметров между сериями циклирования больше не могут быть выполнены;
- соглашение между поставщиком и потребителем.

Таблица 2.1 – Последовательность ресурсных испытаний

Этап	Процедура	Температура окружающей среды
1	Приведение к тепловому равновесию	Комнатная температура (КТ)
2	Стандартный цикл (СЦ), разряд и заряд выбранным постоянным током	КТ
3	Измерительный цикл током С/3	КТ
4	Приведение к тепловому равновесию	-10°C
5	Дозаряд	-10°C
6	Измерительный цикл током С/3	-10°C
7	Приведение к тепловому равновесию	КТ
8	СЦ	КТ
9	Циклирование с выполнением динамического разрядного мощностного режима А, с последующим динамическим разрядным мощностным режимом В до СЗ 20%	КТ
10	Заряд до СЗ 100%	КТ
11	Повторение этапов 9-10 в общей сложности на протяжении 28 дней	

12	Приведение к тепловому равновесию	КТ
13	СЦ	КТ
14	Измерительный цикл током $C/3$	КТ
15	Приведение к тепловому равновесию	КТ
16	Дозаряд	КТ
17	Снятие характеристик мощности в импульсе	КТ
18	Заряд	КТ
19	Каждые восемь недель продолжать с этапа 20, в остальных случаях с этапа 9	
20	Приведение к тепловому равновесию	-10°C
21	Дозаряд	-10°C
22	Измерительный цикл током $C/3$	-10°C
23	Приведение к тепловому равновесию	КТ
24	СЦ	КТ
25	Приведение к тепловому равновесию	-10°C
26	Дозаряд	-10°C
27	Снятие характеристик мощности в импульсе	-10°C
28	Приведение к тепловому равновесию	КТ
29	СЦ	КТ
30	Продолжать с этапа 9	КТ



X - время, с; Y - доля $P_{\max.}$, %; 1 - разряд; 2 - заряд

Рисунок 2.1 – Профиль режимов работы при ресурсных испытаниях

Описанный стандарт идентичен международному стандарту ISO 12405-4:2018 "Electrically propelled road vehicles - Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems - Part 4: Performance testing", IDT".

2.1.2 Анализ современных ездовых циклов

Для более точной оценки деградации в условиях реального движения используют ездовые циклы [88-91]. В ряде исследований применяют стандартизированные ездовые циклы, в иных случаях прибегают к реальным заездам с ведением записи мгновенного тока или скорости с дальнейшим пересчетом [92-94]. Стандартизированные циклы разделяют территориально и по транспортным средствам, к которым они применяются.

Федеральная процедура испытаний EPA, также известная как FTP-75 для городского ездового цикла, представляет собой процедуру оценки топливной экономии легковых автомобилей. Современная процедура состоит из вождения по городу (FTP-75), вождения по шоссе (HWFET), динамичное вождение (SFTP US06) дополнительное испытание кондиционирования воздуха (SFTP SC03) (рисунок 2.2).

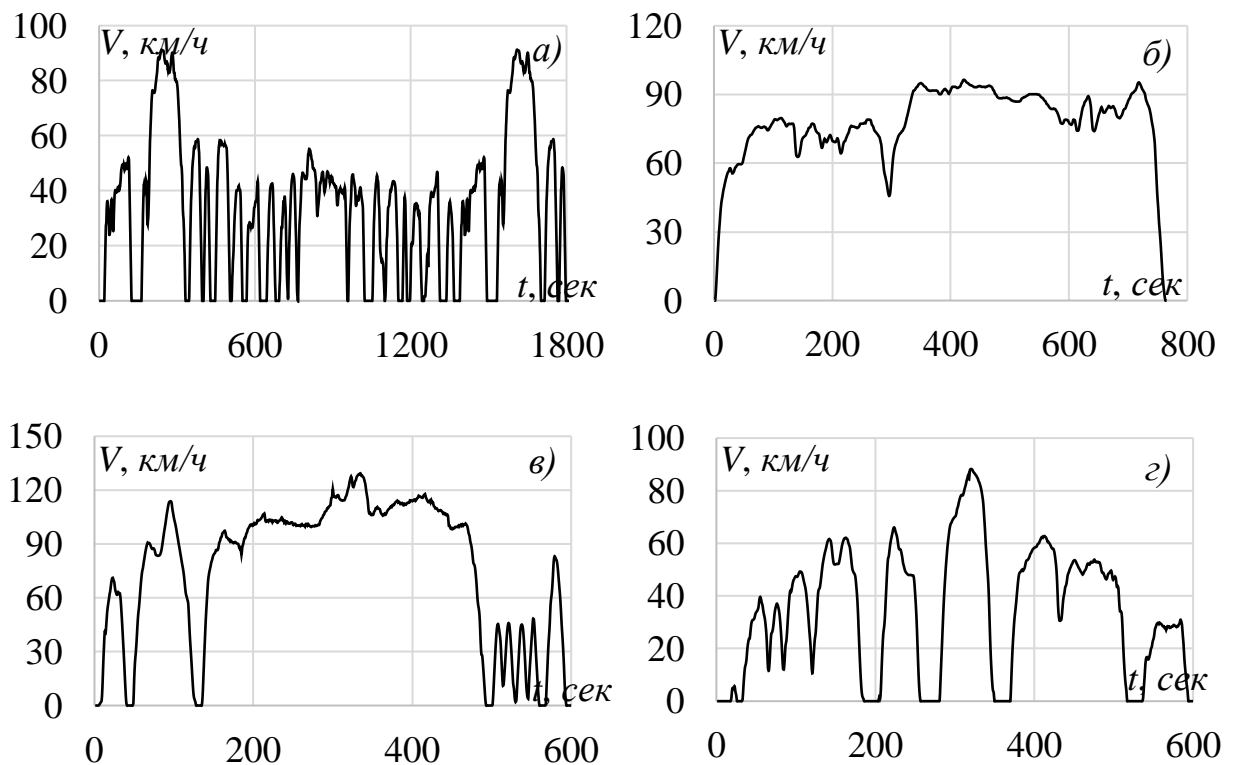


Рисунок 2.2 – Процедура испытаний EPA:

а) FTP-75, б) HWFET, в) SFTP US06, г) SFTP SC03

Цикл использовался для проверки алгоритмов определения SOH БН на базе LFP ячеек в электромобилях [11], оценки требуемых емкостей основного и буферного накопителя энергии гибридного транспортного средства [95] и др.

Наиболее простая методика описания процесса движения использована в европейском цикле NEDC (New European Driving Cycle), представленном на рисунке 2.3, разработанном для оценки уровней выбросов автомобилей. Несмотря на простоту, цикл использован для проверки моделей старения БН на базе LFP в гибридном ЭТС [96, 9, 10]. В настоящее время цикл NEDC устарел, поскольку не отражает современную динамику движения.

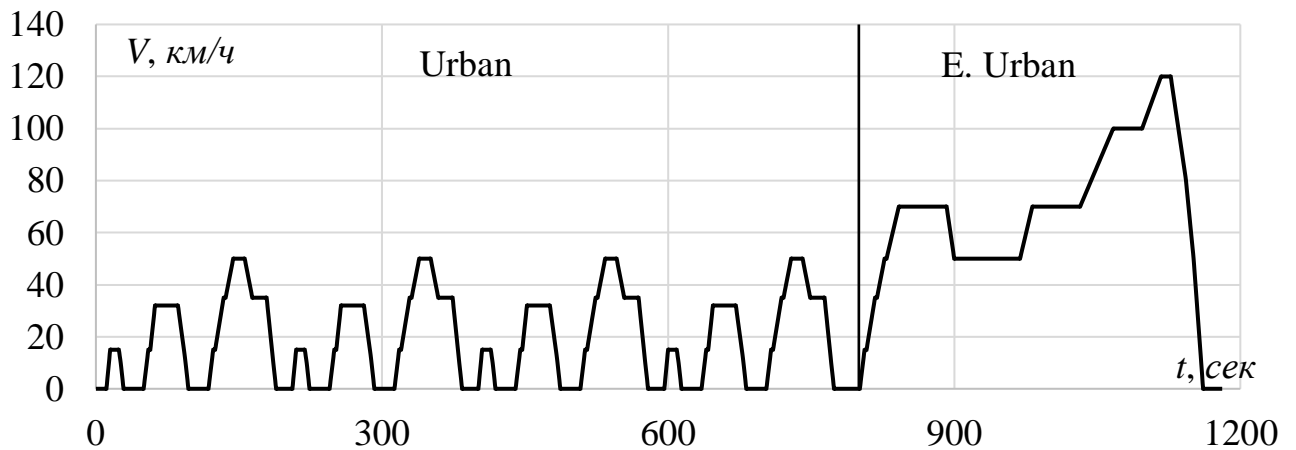


Рисунок 2.3 – Ездовой цикл NEDC

С 1 сентября 2019 г. легковые автомобили, зарегистрированные в странах ЕС, должны соответствовать стандартам WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure), применяемым вместо NEDC. Новый стандарт разработан для лучшего отражения реальных условий вождения. Для достижения этой цели WLTP на 10 минут дольше, чем NEDC, его профиль скорости WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle) более динамичен (рисунок 2.4), состоит из четырех фаз, имитирующих нахождение ТС в различных условиях движения.

Ездовой цикл WLTC получен на основе данных о вождении в различных регионах мира с учетом весовых коэффициентов. Для этого были собраны и

проанализированы данные о вождении, а также статистика использования легковых автомобилей. Для создания цикла собрано и обработано около 765 тыс. км заездов, охватывающих широкий спектр категорий транспортных средств, типов дорог и условий вождения. Применяется 3 цикла WLTC, различающихся по классу ТС, а именно по удельной установленной мощности P_{wr} , кВт/т.

- I класс $P_{wr} \leq 22$;
- II класс $22 < P_{wr} \leq 34$;
- III класс $P_{wr} > 34$.

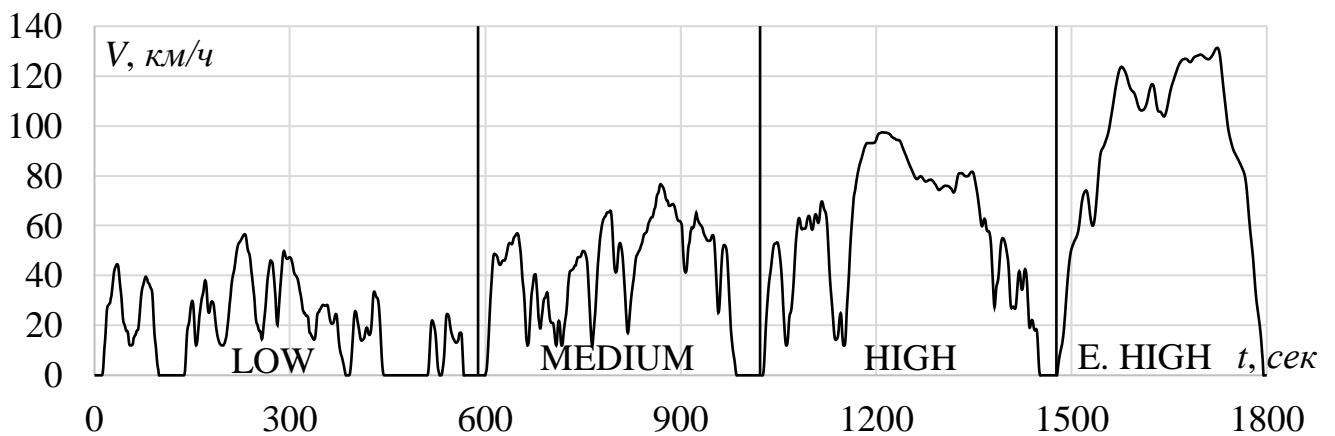


Рисунок 2.4 – Ездовой цикл WLTC, III класс

Цикл WLTC является наиболее приоритетным для сопоставления реальных процессов, протекающих в ячейке, с результатами, полученными в ходе моделирования [97]. Цикл наиболее часто используется для сравнения тепловых процессов [98], комплексной проверки различных моделей старения [99, 100]

Китайский цикл испытаний легковых автомобилей (CLTC) является частью китайского автомобильного цикла испытаний (CATC), разработанного для замены европейских процедур испытаний расхода топлива/энергии и выбросов. CLTC состоит из двух ездовых циклов:

- CLTC-P: легковые автомобили личного пользования (рисунок 2.5, а)
- CLTC-C: коммерческие легковые автомобили (рисунок 2.5, б)

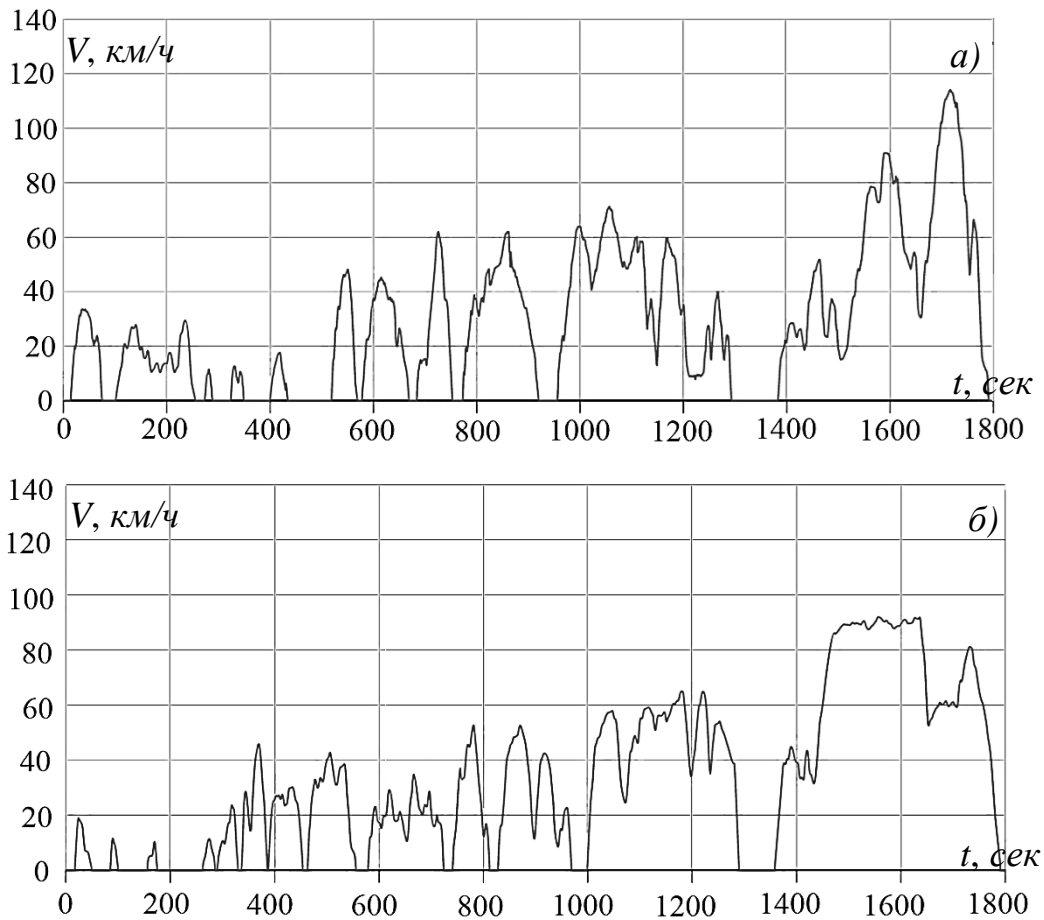


Рисунок 2.5 – Китайский цикл автомобильных испытаний:

а) CLTC-P, б) CLTC-C

Для репрезентации всех возможных условий вождения было выбрано 40 городов на основе их населения, площади дорог, наличия автомобилей, региональной географии и климатических характеристик. В каждом городе было выбрано не менее 70 автомобилей малой грузоподъемности в соответствии с распределением по типам транспортных средств. Для сбора данных использовались автомобили на новых источниках энергии (34%) и традиционные автомобили (66%) с различным соотношением мощности и массы, режимами выпуска и производителями.

Параметры тяговой установки должны определяться исходя их наиболее тяжелых режимов движения. Поэтому, с целью сопоставления представленных циклов проведен расчет энергии, потребленной электромобилем в режиме тяги,

энергии рекуперации при торможении и результирующая. Основные соотношения для расчета:

$$F_{\text{дв}} = 9,8 \cdot (102 \cdot (1 + \gamma) \cdot a + w) \quad (4)$$

$$B_{\text{дв}} = 9,8 \cdot (102 \cdot (1 + \gamma) \cdot a - w) \quad (5)$$

$$P_{\text{тяг}} = \frac{F_{\text{дв}} \cdot V}{\eta_{\text{общ}}} \quad (6)$$

$$P_{\text{торм}} = B_{\text{дв}} \cdot V \cdot \eta_{\text{общ}} \quad (7)$$

$$E_{\text{рез}} = E_{\text{тяг}} - E_{\text{рек}} = \int P_{\text{тяг}}(t) dt + \int P_{\text{торм}}(t) dt, \quad (8)$$

где $F_{\text{дв}}$ и $B_{\text{дв}}$ – сила, развиваемая тяговым электродвигателем (ТЭД) в режиме тяги и торможения, H ;

$P_{\text{дв}}$ и $P_{\text{торм}}$ – мощность, развиваемая ТЭД в режиме тяги и торможения, $Вт$;

$E_{\text{рек}}$, $E_{\text{тяг}}$ и $E_{\text{рез}}$ – энергия, полученная в результате электрического торможения, потребляемая в режиме тяги и результирующая, $Дж$;

w – удельное основное сопротивление движению, $H/кН$;

V – скорость движения ТС, $м/с$;

a – ускорение ТС, $м/с^2$;

η – КПД системы, определяется:

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_{\text{ТЭД}} \eta_{\text{ЗП}} \eta_{\text{ИП}} \eta_{\text{БН}} \quad (9)$$

$\eta_{\text{ТЭД}}$ – КПД ТЭД;

$\eta_{\text{ЗП}}$ – КПД трансмиссии;

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

η – КПД БН;

Результаты обработки стандартизированных циклов представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты обработки стандартизированных циклов движения

Параметр	Единицы измерения	FTP-75, HWFET, US06, SC03	NEDC	WLTC, III класс	CLTC-P
$E_{тяг}$	$Вт \cdot ч/т,$	4561,88	1125,36	2774,91	1683,53
$E_{рекуп}$	$Вт \cdot ч/т,$	1714,4	244,74	599	464,71
$E_{рез}$	$Вт \cdot ч/т$	2847,53	880,62	2175,91	1218,82
t	$с$	3839	1180	1800	1800
L	$км$	52,92	11	23,27	14,94
$T_{тяг}$ от $T_{цикла}$	$\%$	61,68	61,47	63,1	59,27
$T_{торм}$ от $T_{цикла}$	$\%$	25,63	15,07	24,3	32,78
$T_{ост}$ от $T_{цикла}$	$\%$	12,7	23,45	12,6	7,95
$V_{ср}$ с учетом остановок	$км/ч$	49,6	18,5	46,5	28,96
$V_{макс}$	$км/ч$	96,5	120	131	114
Удельный расход энергии без учета рекуперации	$Вт \cdot ч/(т \cdot км)$	96,72	101,85	119,29	116,27
Удельный расход энергии с учетом рекуперации	$Вт \cdot ч/(т \cdot км)$	60,38	79,70	93,54	84,17
$P_{макс}$	$кВт/т$	61,68	27,99	35,69	32,14

2.2 Обработка стандартизированного цикла WLTC

На основе анализа стандартизированных ездовых циклов и процедуры оценки ресурса LFP-ячейки для дальнейшего исследования выбран цикл WLTC, по следующим причинам:

- Цикл позволяет описать различные ситуации при езде – движение в различном транспортном потоке, по магистрали и т.д.;
- Высокая динамика цикла в достаточной степени описывает реальный процесс движения;
- Прочие циклы описывают движение в конкретном регионе, следовательно результаты обработки могут не соответствовать при их применении в других регионах. WLTC создан на основе статистических данных о режимах движения разных стран;
- Наибольшее число актуальных научных работ используют цикл WLTC.

Цикл представляет собой 4 участка с разными режимами управления ЭТС, первые два из которых (Low и Medium) имитируют движение транспорта в городской среде, а следующие два (High и Extra High) – загородный режим движения.

На рисунке 2.6 приведены диаграммы долей времени тяги, торможения и остановки. Так, наименее динамичным является режим управления – Low с соотношением долей времени: 46% – тяга; 26% – выбег; 28% – торможение, а наиболее динамичным режимом управления – Extra High с минимальной долей остановки и торможения в 2% от общего времени режима.

В таблице 2.3 представлено количество актов тяги, торможения и остановки в фазах цикла WLTC, а в таблице 2.4 минимальная, средняя и максимальная длительность режима тяги, торможения и остановки.

Таким образом, фаза Low представляет собой частое чередование коротких режимов тяги и торможения, а фаза Extra High – длительный режим тяги с разгоном до высоких скоростей с последующим резким торможением.

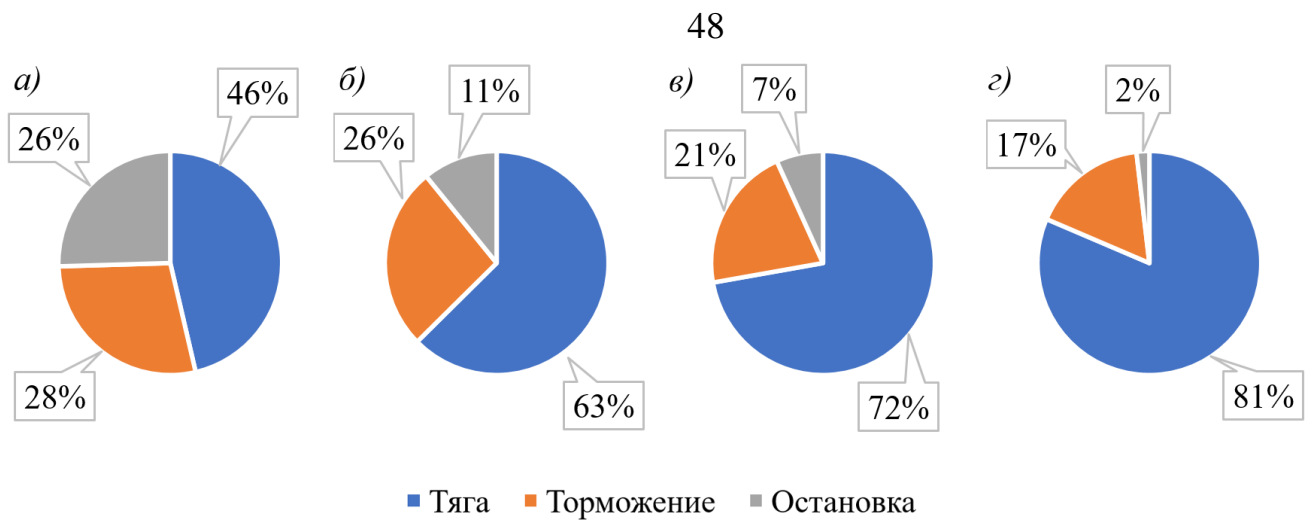


Рисунок 2.6 – Диаграммы соотношений долей времени в фазах:

а) Low; б) Medium; в) High; г) Extra High

Таблица 2.3 – Количество режимов тяги, торможения и остановки

Фаза	Количество повторений режимов			Длительность фазы, сек
	Тяга	Торможение	Остановка	
Low	33	32	5	589
Medium	17	17	1	433
High	15	15	2	455
E. High	4	4	1	323

Таблица 2.4 – Минимальная, максимальная и средняя длительность фаз

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

2.3 Расчет нагрузки блока накопителей

Далее необходимо провести анализ цикла WLTC с позиции возникающих токов нагрузки аккумуляторной батареи электромобиля различной энергоемкости. В качестве исследуемой модели электромобиля принят Nissan Leaf с БН энергоемкостью 24, 62 и 100 kWh . В таблице 2.5 приведены основные параметры выбранного автомобиля.

Скоростная диаграмма WLTC пересчитана в токовую согласно разработанной блок-схеме, приведенной на рисунке 2.7. Приняты следующие обозначения: F_t - полное сопротивление транспортного средства, которое состоит из сопротивления качению F_f , сопротивления воздуха F_w , сопротивления уклона F_i и сопротивления ускорения F_j ; I_b и U_b – ток и напряжение в АБ.

Таблица 2.5 – Параметры легкового автомобиля

Параметр	Размерность	Величина
Масса ТС	$кг$	1690
Коэффициент сопротивления воздуха	---	0,4
Площадь передней части	$м^2$	2
Плотность воздуха	$кг/м^3$	1,2258
КПД трансмиссии η_T	---	0,96
Коэффициент сопротивления качению [101]	---	$0,0076+0,000056 \cdot V$
Выходное напряжение аккумулятора	V	375

Как показано в методе, реализуемая сила тягового электродвигателя (ТЭД) зависит от текущего режима движения. Он определяется на основе сравнения ускорения в цикле и ускорения замедления от основного сопротивления движению [102].

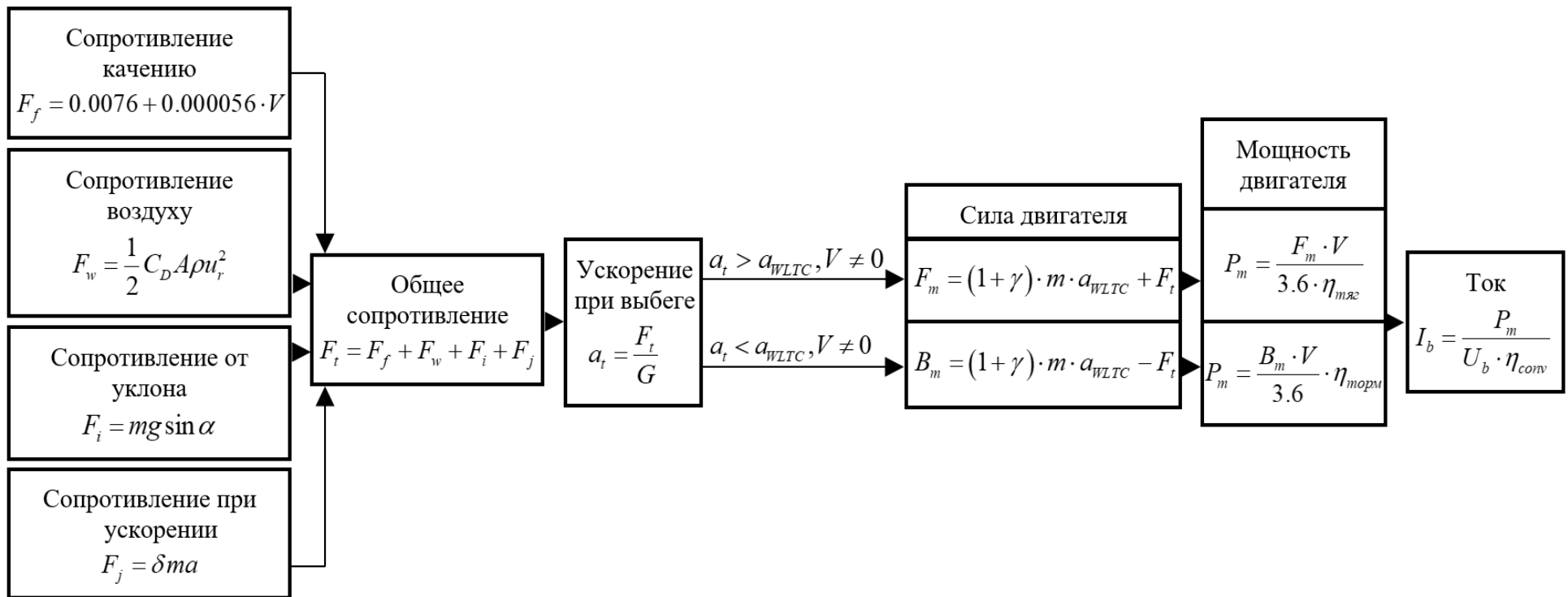


Рисунок 2.7 - Блок-схема расчета тока нагрузке в аккумуляторе

Зная, что выходное напряжение на аккумуляторе варьируется в диапазоне 320...410 В, принято усредненное значение в $U_b = 375$ В, тогда ток в аккумуляторе:

$$I_b = \frac{P_m}{U_b \cdot \eta_{ПП}}, A \quad (10)$$

Аккумулятор состоит из 48-ми неразборных модулей, соединенных последовательно. В неразборном модуле 4 (6 в случае АБ 62 кВт·ч) ячейки, которые соединены в $n_p=2$ (3 в случае АБ 62 кВт·ч) параллельные цепочки.

Следовательно, ток в ячейке определяется, как:

$$I_{sb} = \frac{I_b}{n_p} \quad (11)$$

Для удобства представления перегрузки ток в ячейке приведен относительно номинальной емкости:

$$I_{отн} = \frac{I_{sb}}{I_{1C}} \quad (12)$$

Полученные диаграммы токов для БН Nissan Leaf энергоемкостью 24, 62 и 100 кВт·ч представлены на рисунке 2.8. Полученные средние и максимальные значения относительных токов для БН энергоемкостью 24 кВт·ч приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Средние и максимальные значения токов в фазах WLTC

Фаза	Тяга		Торможение	
	$I_{ср}, C$	$I_{макс}, C$	$I_{ср}, C$	$I_{макс}, C$
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

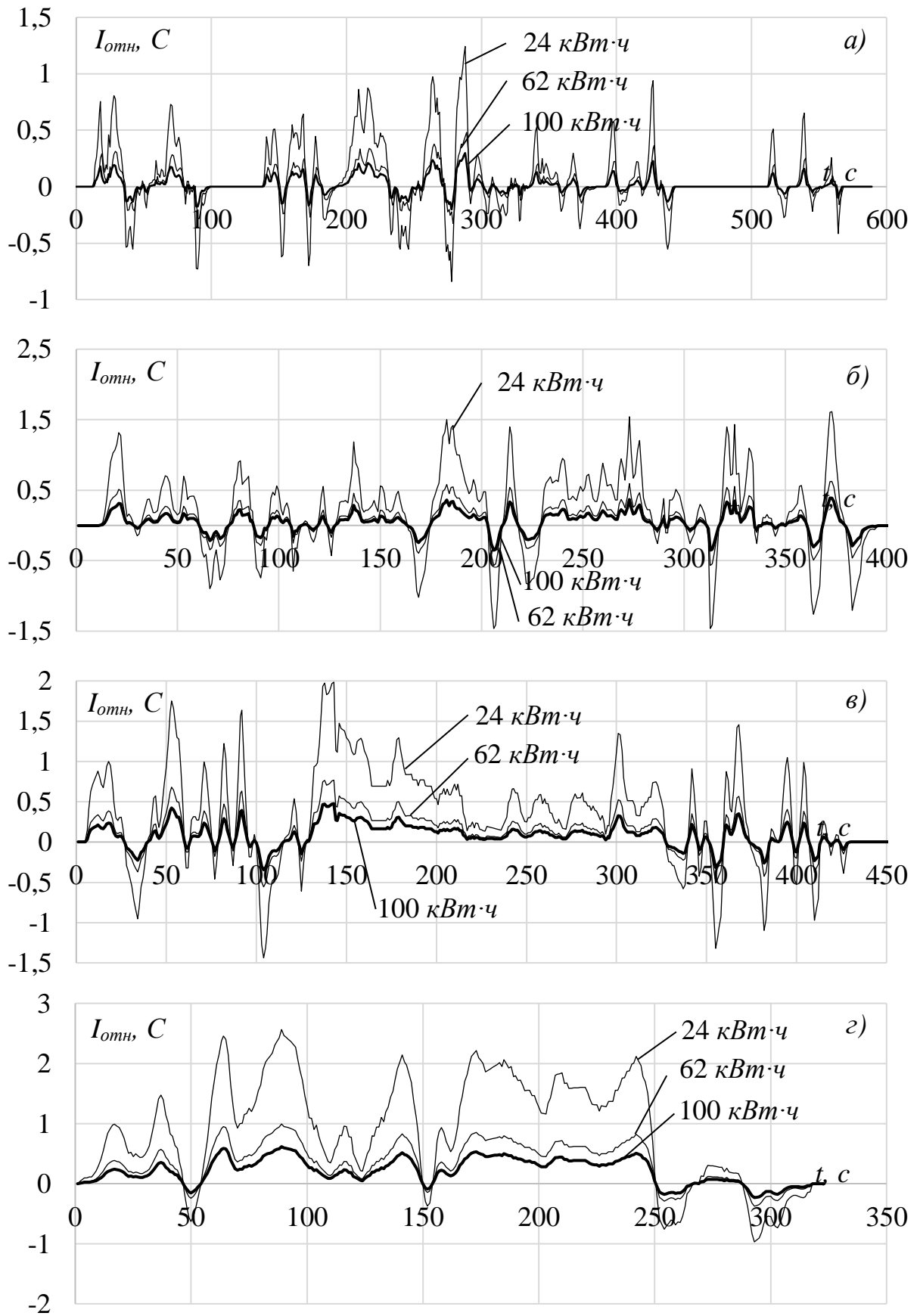


Рисунок 2.8 – Диаграммы относительных токов ячейки АБ

а) Low, б) Medium, в) High, г) E. High

2.4 Сравнение результатов для блоков накопителей различной энергоемкости

На рисунках 2.9 и 2.10 представлены гистограммы распределения относительных токов $I_{отн}$ ячейки в режиме тяги и торможения для различной энергоемкости БН, значения имеют дискретность в одну секунду, что соответствует одному событию.

Оптимальными для АБ являются токи менее 1С при нагрузке и менее 0,5С при заряде [14]. Получено, что в первых трех режимах управления ЭТС с АБ энергоемкостью 62 кВт·ч токи заряда и разряда лежат в оптимальном диапазоне. Поэтому для анализа приведены диаграммы при режимах управления High и Extra High (рисунок 2.10).

Из анализа гистограмм (рисунок 2.9) следует, что в городском режиме движения большую часть времени потребляются малые токи (без превышения значений в 1С в режиме тяги и в 0,5С режиме торможения). Однако их значения достаточны для обеспечения необходимой динамики разгона и торможения в плотном транспортном потоке. С увеличением максимальной скорости разгона при движении в городской среде без пробок с более длительным нахождением ЭТС в условиях ненулевой скорости пропорционально увеличивается среднее и максимальное значение токов. Однако, пик гистограмм тока тяги и торможения в городском режиме составляют до 0,25С.

При движении в загородном режиме происходит увеличение среднего значения токов тяги и рекуперации, и рост максимального значения перегрузки. Так, максимальные токи тяги в High и E,High – режимах составляют 2С и 3С соответственно, а токи торможения – 1С и 1,5С. Изменение максимального тока рекуперации в более тяжелом режиме движения объясняется тем, что при движении с высокой скоростью основной тормозной силой является сопротивление воздушной среды. Поэтому, при одинаковых динамических параметрах замедления, в режиме E. High требуется меньшая тормозная сила. Следует отметить, что в загородных режимах пик гистограмм приходится на

диапазон 0,5С и выше. Основные количественные соотношения представлены в таблице 2.7.

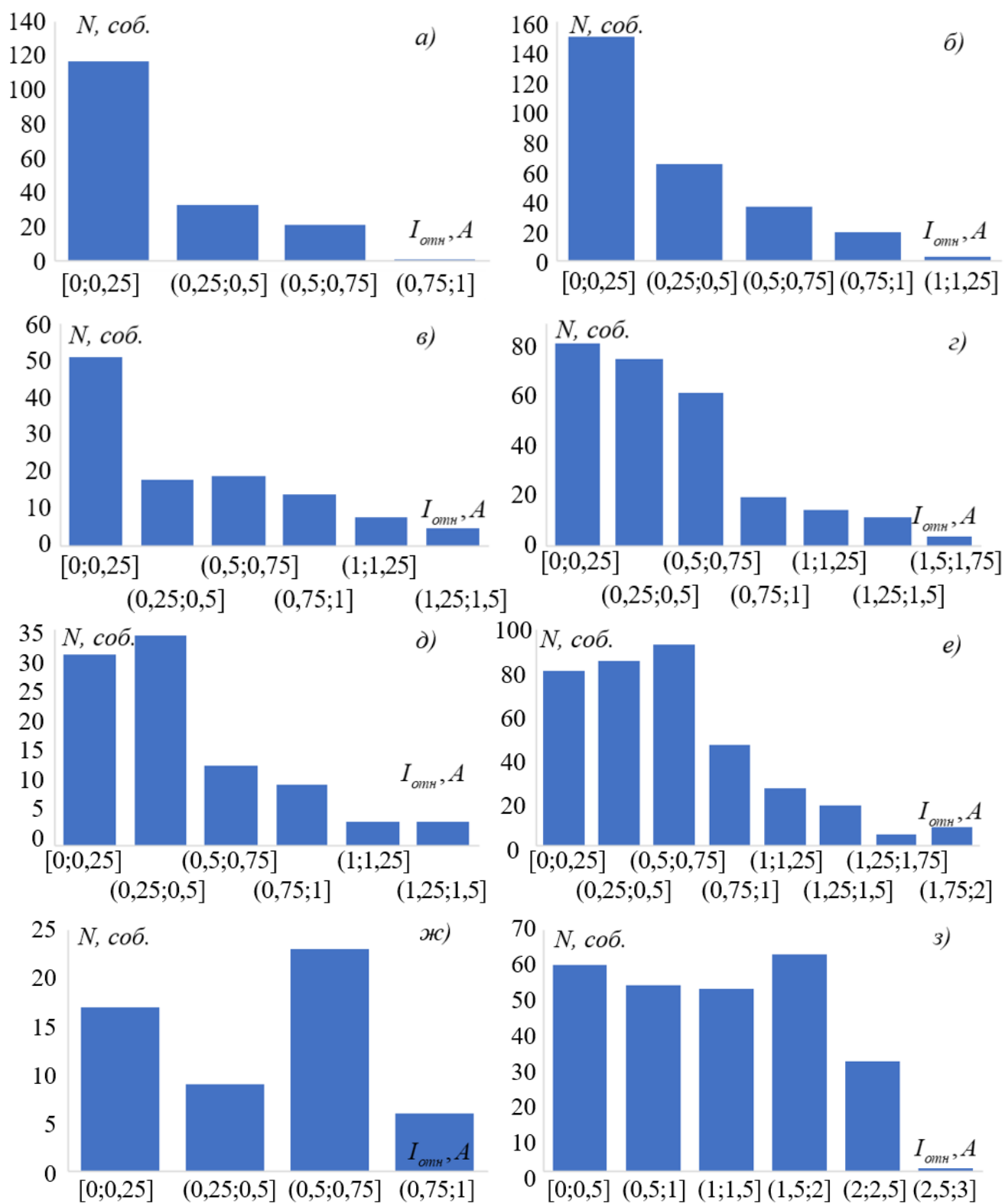


Рисунок 2.9 – Гистограммы относительных токов, АБ 24 кВт·ч

- а) Low, торможение; б) Low, тяга; в) Medium, торможение; г) Medium, тяга; д) High, торможение; е) High, тяга; ж) E. High, торможение; з) E. High, тяга

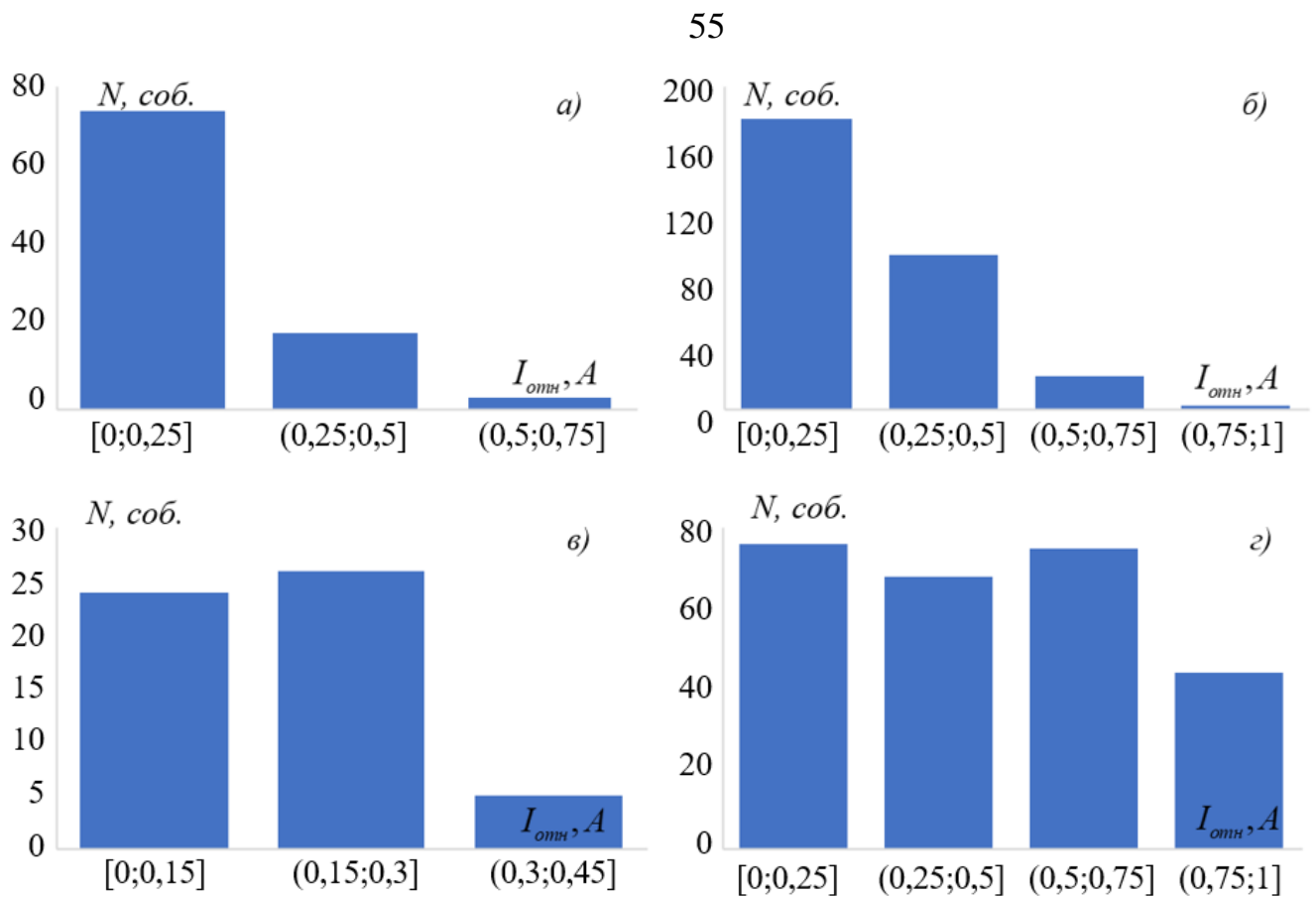


Рисунок 2.10 – Гистограмма токов, АБ 62 кВт·ч

а) High, торможение; б) High, тяга; в) E. High, торможение; г) E. High, тяга

Таблица 2.7 – Доля токов тяги и торможения в различных режимах управления, выраженная в процентах по времени движения

		Режим тяги			Режим торможения		
		(0; 1C]	(1C; 2C]	(2C; 3C]	(0; 0,5C]	(0,5C; 1C]	(1C; 1,5C]
АБ 24 кВт·ч	Low	100	-	-	89	11	-
	Medium	87,4	12,6	-	61,5	27,5	11
	High	82,5	18,6	0,9	67,4	23,6	9
	E. High	39,2	42,6	18,2	46,2	53,8	-
АБ 62 кВт·ч	Low	100	-	-	100	-	-
	Medium	100	-	-	96,5	3,5	-
	High	100	-	-	100	-	-
	E. High	99,8	0,2	-	100	-	-

Получена зависимость среднего тока в ячейке БН Nissan Leaf от фазы цикла WLTC (рисунок 2.11). Из полученных данных следует, что с увеличением динамики движения средний ток тяги в режиме управления увеличивается по экспоненциальному закону, тогда как ток торможения практически не изменяется, начиная с фазы Medium. Это объясняется увеличением затрат энергии на преодоление сопротивления движения в режиме тяги, и малой требуемой тормозной силой в режиме торможения при движении в диапазоне высоких скоростей.

В случае увеличения энергоемкости БН в данном типе ЭТС до $100 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ на протяжении всего цикла WLTC ток в ячейке не превысит 1С для режима тяги и $0,5\text{С}$ для режима торможения, т.е. перегрузка по току будет исключена.

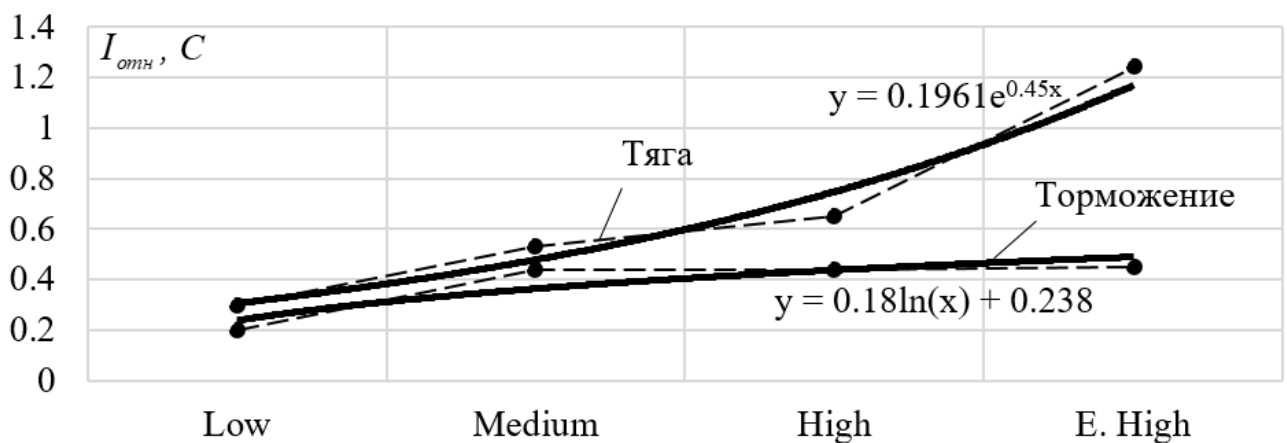


Рисунок 2.11 – Зависимость среднего тока от режима управления цикла

Сопоставляя данные в таблице 2.7 установлено, что при добавлении параллельной ветви аккумуляторных ячеек максимальные токи нагрузки в режимах тяги и торможения значительно снижаются и составляют 1С и менее во всех фазах цикла WLTC. Из этого можно предположить, что срок службы такого АБ возрастет в виду меньших токовых нагрузок, также возрастет возможная перегрузка, и как следствие, возможно повышение динамических показателей ЭТС. Параллельное соединение ячеек уменьшает общее сопротивление БН. В совокупности с малыми токами это позволяет создать БН с более компактным расположением ячеек, а снижение плотности тока будет приводить к упрощению

создаваемых систем теплоотвода, с возможностью более компактного расположения ячеек [102].

Выводы по второй главе

1. Для определения ресурса ЛИА используется международный стандарт, описанный в ГОСТ Р ИСО 12405-4-2019. Приведенные процедуры позволяют оценить ориентировочный срок службы ячейки или блока ячеек при воздействии чередующейся нагрузки различной величины. Нагрузочный профиль не отражает реального процесса движения ЭТС, кроме того, стандарт не позволяет оценить влияние отдельных факторов на скорость старения ячейки.

2. Проанализированы стандартизированные ездовые циклы, применяемые для более точной оценки сроков службы ЛИА. Получено, что наибольшую корреляцию с реальным процессом движения имеет цикл WLTC.

3. Проведена обработка ездового цикла WLTC, определены токи, возникающие в ячейке БН Nissan Leaf различной энергоемкости. Для каждой фазы цикла рассчитаны средние и максимальные величины токов тяги и рекуперативного торможения, а также длительности режимов тяги, торможения и остановки.

4. Тенденция, направленная на увеличение энергоемкости устанавливаемых АБ, приводит к снижению перегрузки отдельной ячейки как в режиме тяги, так и в режиме торможения. Возможно ожидать, что основным фактором старения АБ будет не токовая перегрузка, а ее реверсивный характер.

5. Рост энергоемкости БН влечет за собой увеличение возможной допустимой величины тока, что означает повышение динамики разгона автомобиля, т.е. уменьшение времени перегрузки, а добавление параллельных ячеек снижает общее сопротивление АБ. В совокупности данные факторы позволяют снизить тепловыделение с ячейки. Однако недостатками такого решения является значительное увеличение массогабаритных показателей, ухудшение энергоэффективности и удорожание БН и электромобиля в целом.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ СТЕНДЕ

Для проведения исследования разработана исследовательская установка [103], которая обеспечивает решение следующих задач:

- 1) циклическое тестирование аккумуляторов типоразмера 18650 синтезированным электрическим сигналом любой заданной формы;
- 2) моделирование режимов заряда-разряда аккумулятора, соответствующих условиям эксплуатации на транспортном средстве;
- 3) запись значений тока, напряжения и температуры аккумуляторов непосредственно в процессе их тестирования;
- 4) периодическое измерение энергоемкости аккумуляторов в процессе их тестирования;
- 5) одновременное циклирование до 30 аккумуляторов по различным программам для получения результатов полного факторного эксперимента в разумные сроки;
- б) для каждого аккумулятора предусмотрены программные защиты по температуре и напряжению, которые дублируются на аппаратном уровне.

3.1 Разработка зарядно-разрядного модуля

Для решения поставленных задач в модуле для тестирования одного аккумулятора реализованы две основные электрические схемы. Первая работает как управляемый источник тока для заряда аккумулятора от внешнего источника питания, а вторая выступает в качестве управляемой электронной нагрузки. Силовая часть, объединяющая две эти схемы, представлена на рисунке 3.1.

Переключение между режимами заряда и разряда выполняется с помощью реле P2, а реле P1 служит для отключения аккумулятора из схемы. Регулирование

тока для заряда и разряда аккумулятора осуществляется с помощью полевого транзистора IRFB4615, который работает в линейном режиме.

Для управления силовым транзистором использована схема источника тока, управляемого напряжением на основе операционного усилителя U2.4, которая совместно с другими цепями управления представлена на рисунке 3.2.

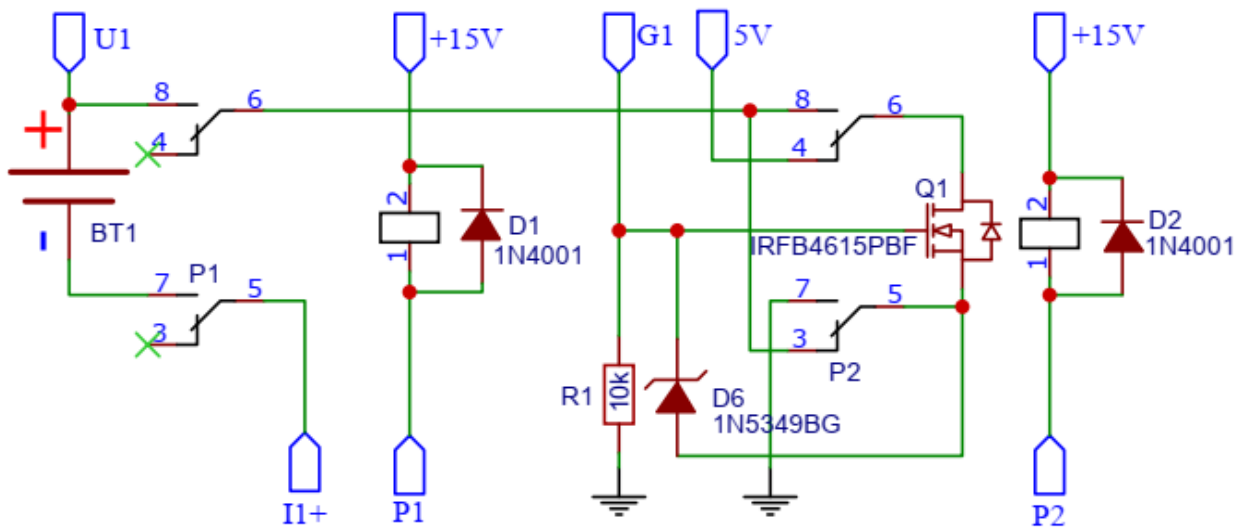


Рисунок 3.1 - Силовая схема зарядно-разрядного модуля

Сигнал I_2 , который задаёт ток аккумулятора, формируется микроконтроллером (на схеме не показан) в виде ШИМ. Значение тока аккумулятора меняется скважностью ШИМ-сигнала, который сглаживается с помощью ФНЧ на R14 и C2. Для устранения самовозбуждения операционного усилителя U2.4 использован конденсатор C3, подобранный опытным путём. Обратная связь реализована с помощью датчика тока ACS712-20, операционного усилителя U1.2, который выполняет смещение и масштабирование сигнала, а также прецизионного выпрямителя на операционном усилителе U1.4, который инвертирует отрицательный сигнал тока в режиме разряда аккумулятора.

Имеется аппаратная защита по температуре и напряжению аккумулятора. Защита по температуре реализована с помощью датчика LM335, операционного усилителя U1.2 для смещения и масштабирования сигнала, триггера Шмидта на

операционном усилителе U2.1 и транзистора Q4, который управляет отключением реле P1.

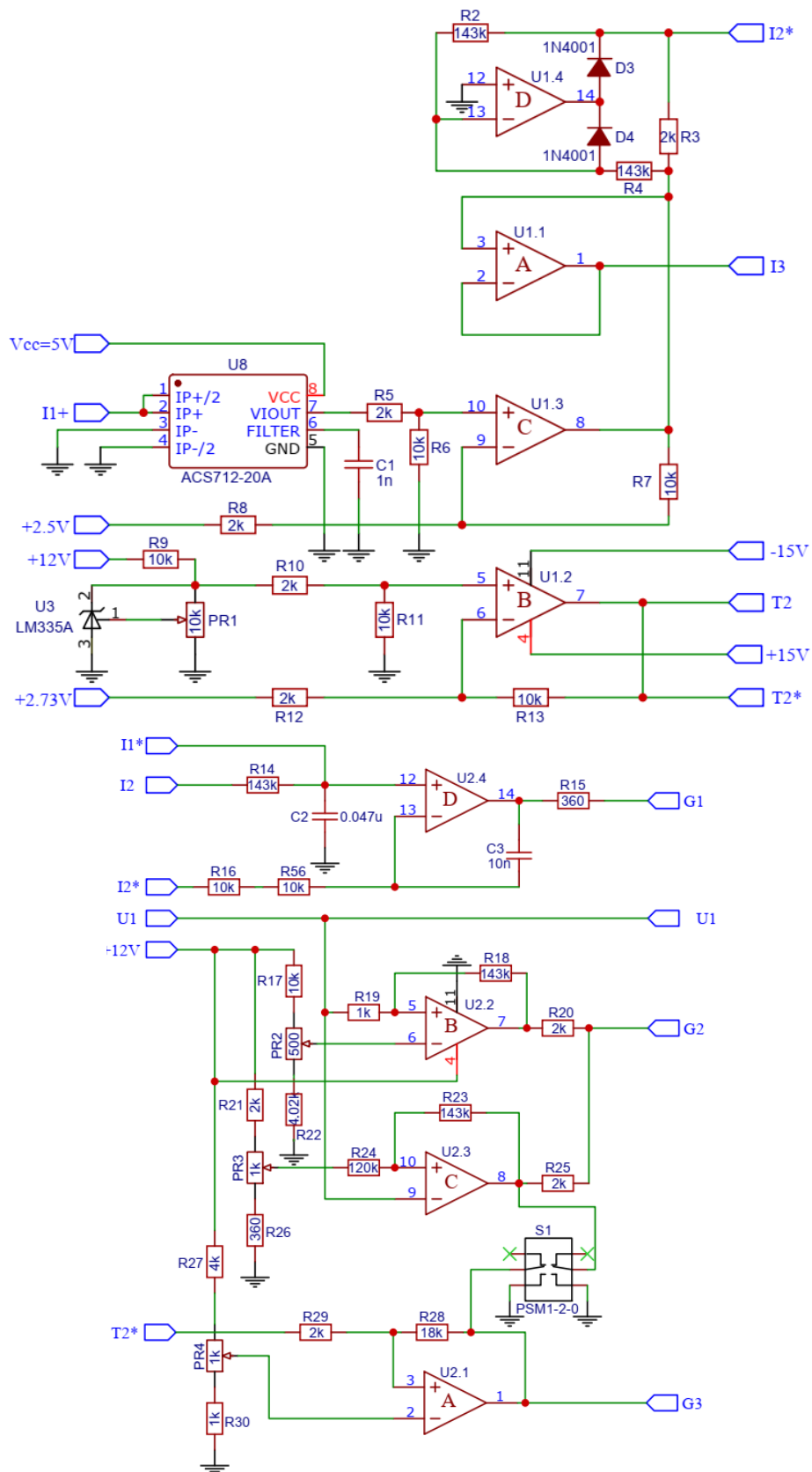


Рисунок 3.2 - Схема управления зарядно-разрядного модуля

Защита по напряжению аккумулятора выполнена с помощью двух триггеров Шмидта на операционных усилителях U2.2 и U2.3, транзисторе Q3, который подтягивает к нулю сигнал управления током. Такое решение обеспечивает индивидуальную настройку по минимальному и максимальному напряжению аккумулятора. Для стабильной работы аппаратных защит они имеют широкий гистерезис.

Для управления режимами силовой схемой используются дискретные сигналы от микроконтроллера D1 и D2, которые с помощью транзисторов Q2 и Q5 управляют реле P1 и P2. Светодиоды LED1-5 показывают текущий режим работы силовой схемы. Для получения нужных уровней напряжения для схемы управления использованы микросхемы TL431, подключение которых показано на рисунках 3.3-3.4.

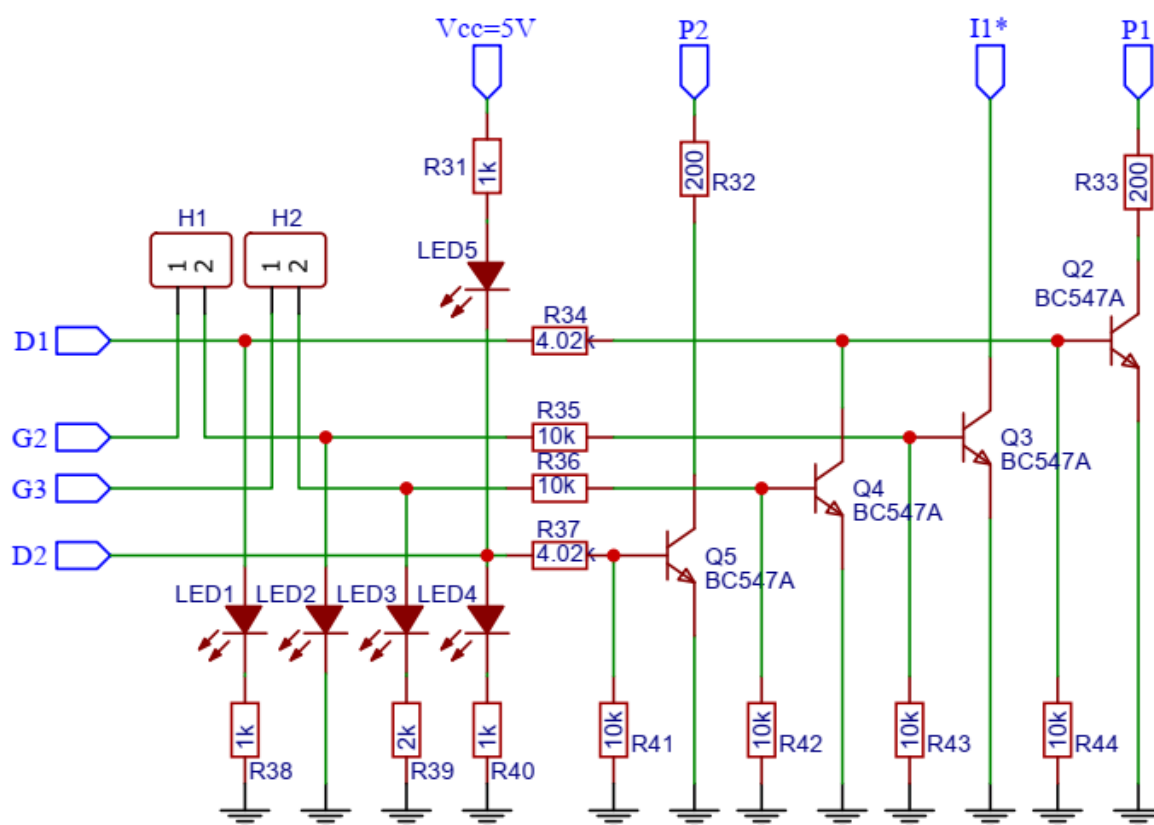


Рисунок 3.3 – Схема управления режимами силовой части

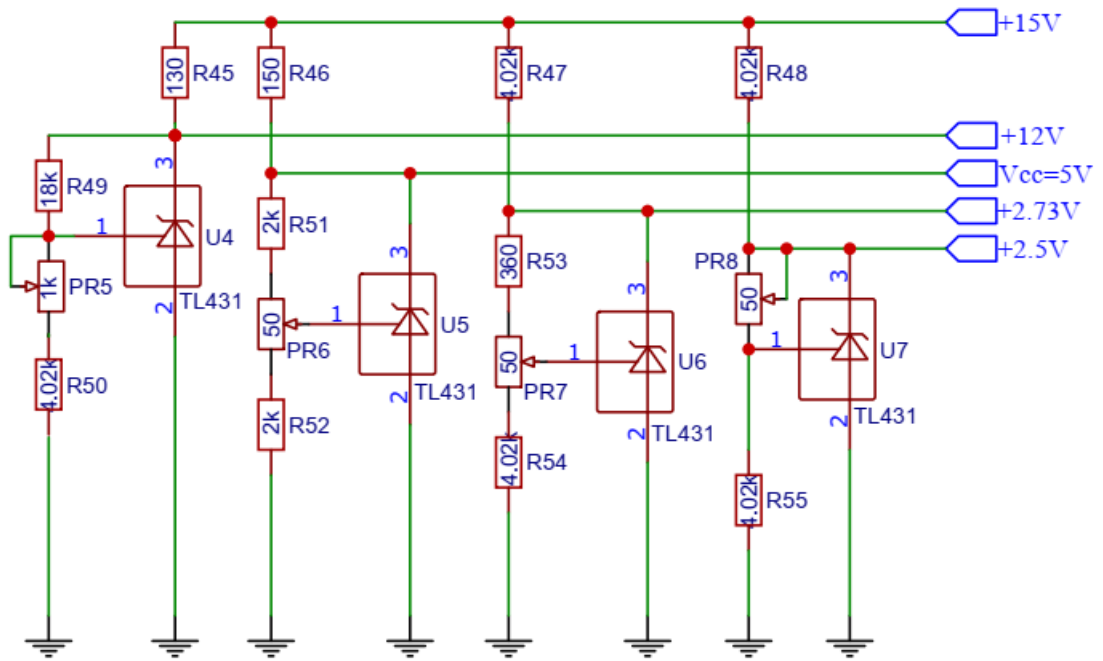


Рисунок 3.4 – Схема питания цепей управления

Внешний вид одного зарядно-разрядного модуля для тестирования аккумуляторов типоразмера 18650, выполненного по описанным схемам, показан на рисунке 3.5.

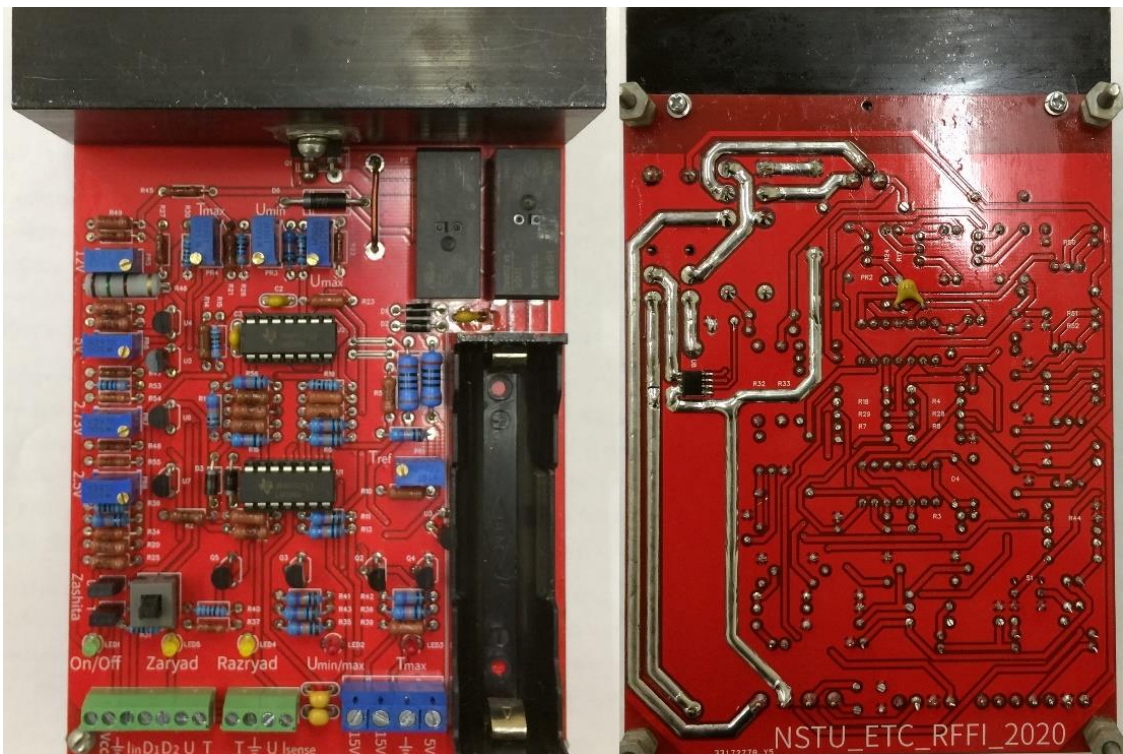


Рисунок 3.5 - Внешний вид зарядно-разрядного модуля

С учётом выбранных компонентов представленный зарядно-разрядный модуль может обеспечить заряд и разряд аккумулятора током до 10 А с произвольной формой. Диапазон измеряемой температуры составляет $0\dots 100^\circ\text{C}$. Защиту по температуре можно настроить в диапазоне $40\dots 90^\circ\text{C}$, по минимальному напряжению в диапазоне $0,8\dots 2,6\text{ В}$, по максимальному напряжению в диапазоне $3,3\dots 3,8\text{ В}$.

3.2 Алгоритм управления зарядно-разрядными модулями

Для управления зарядно-разрядными модулями используется микроконтроллер Atmel ATmega328P. Тип микроконтроллера выбран по объему памяти, достаточному для хранения испытательных циклов большой длительности (до 30 мин), высокому ($0,05\text{ В}$) разрешению аналого-цифрового преобразователя, а также количеству каналов ввода-вывода, достаточному для одновременного управления тремя исследуемыми аккумуляторами. Значения токов в нагрузочном цикле хранятся в программной памяти микроконтроллера. При объеме памяти 32 кВ одновременно с программой управления возможно хранение цикла длительностью до 15 тыс. сек. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ представлено в приложении В.

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 [104].

Программа верхнего уровня выполняется 1 раз в секунду. Поскольку аккумулятор обладает большой емкостью, напряжение на нем не успевает существенно измениться (на величину, сравнимую с разрешением АЦП) за это время. Для принятия решений о режиме работы в программе верхнего уровня реализован алгоритм, блок-схема которого изображена на рисунке 3.6.

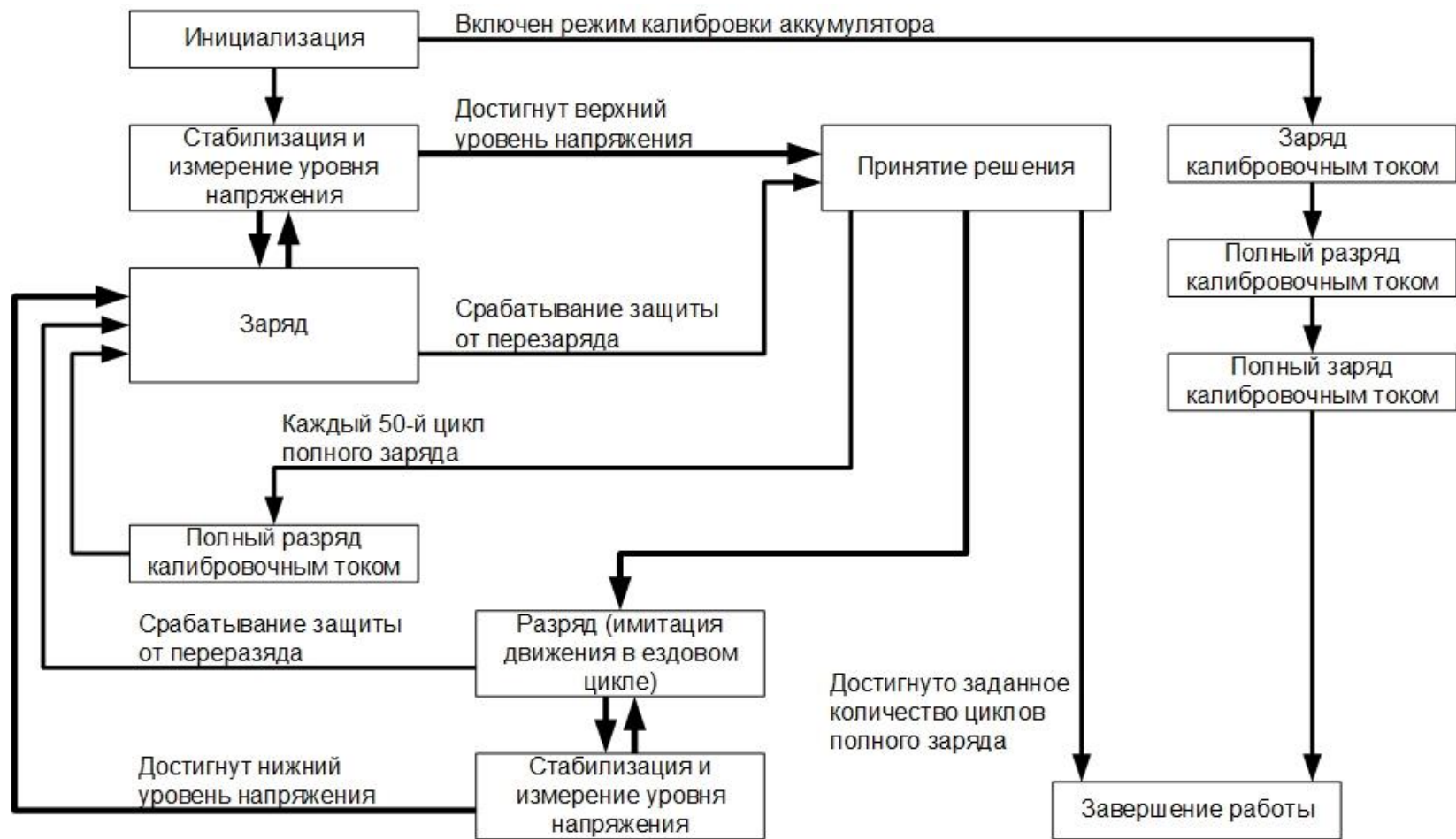


Рисунок 3.6 - Блок-схема алгоритма тестирования аккумуляторов

Алгоритм реализует один из двух режимов управления: калибровку и моделирование работы накопителя электромобиля. Выбор режима производится 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 [105]. Последовательно выполняются полный заряд и последующий полный разряд аккумулятора, после чего аккумулятор отключается от схемы.

Основной рабочий цикл процесса тестирования аккумуляторов выделен на рисунке жирной линией. После загрузки микроконтроллера в режиме тестирования аккумуляторов последовательно реализуются следующие состояния:

- 1) заряд постоянным током;
- 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.

Описанные рабочие циклы реализуются для каждого из аккумуляторов независимо. Для защиты аккумулятора в программе предусмотрена возможность преждевременного прерывания состояний заряда и разряда, которые дублируют аппаратные защиты.

3.3 Создание и тестирование испытательного стенда

Для создания исследовательской установки было изготовлено 30 зарядно-разрядных модулей, которые управляются с помощью 10 микроконтроллеров. Каждый микроконтроллер управляет тремя модулями. Причём каждый модуль

способен функционировать по индивидуальной программе эксперимента. Количество независимых модулей обусловлено планом эксперимента, первый этап которого предполагает варьирование значений четырёх факторов и несколько сотен циклов для каждого сочетания этих факторов. Внешний вид находящейся в работе исследовательской установки для тестирования аккумуляторов представлен на рисунке 3.7.

В состав исследовательской установки также входят пять внешних источников питания 5 В , 300 Вт , используемые для заряда аккумуляторов, пять двуполярных источников питания $\pm 15\text{ В}$, 18 Вт , тумблеры для включения/выключения каждого зарядно-разрядного модуля, три USB-самописца ADClab S-Recorder L для непрерывной записи тока, напряжения и температуры каждого аккумулятора, а также три ПК для работы с файлами данных и визуализации процесса эксперимента.

В качестве демонстрации результатов работы испытательного стенда на рисунке 3.8 представлены фрагменты данных измерения параметров аккумулятора в одном из проведенных опытов.



Рисунок 3.7 - Внешний вид разработанной исследовательской установки

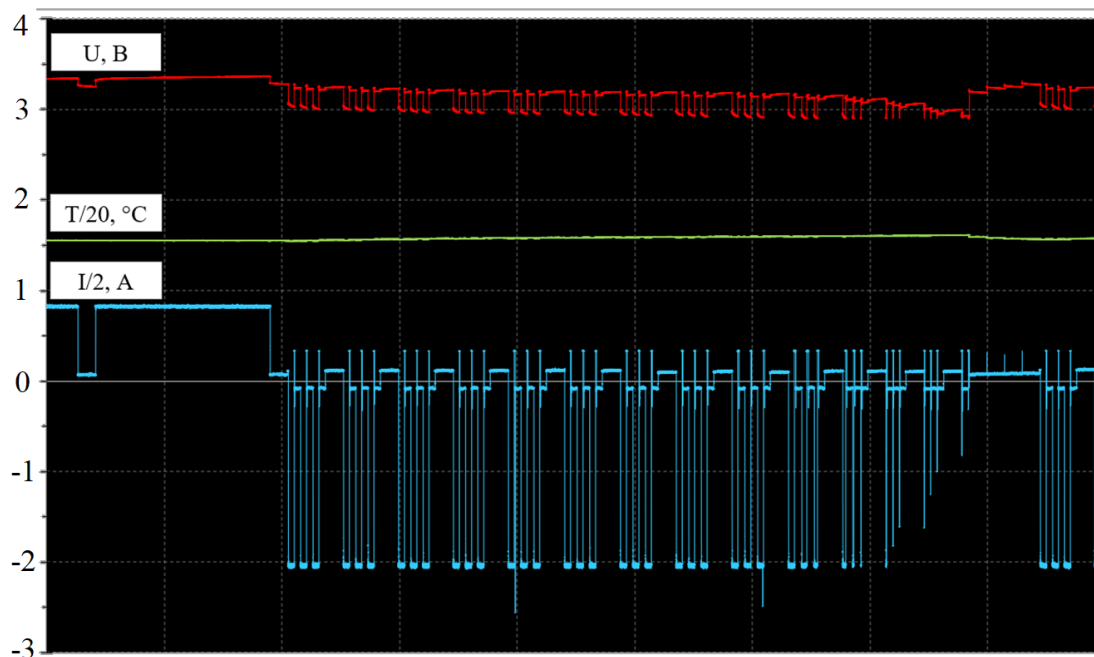


Рисунок 3.8 - Фрагмент осциллограммы тока, напряжения и температуры в зависимости от времени работы аккумулятора

На рисунке 3.9 представлены передаточные характеристики тока (зависимость регистрируемых значений от устанавливаемых микроконтроллером) для всех 30 каналов стенда. Снятие этих характеристик выполнялось измерительными приборами с точностью $\pm 0,05\% + 5$. Как видно из рисунка 3.9, в области используемых для тестов значений токов погрешность не превышает 5%. При проверке значений регистрируемого напряжения, установлено, что погрешность измерений не превышает $\pm 0,8\%$.

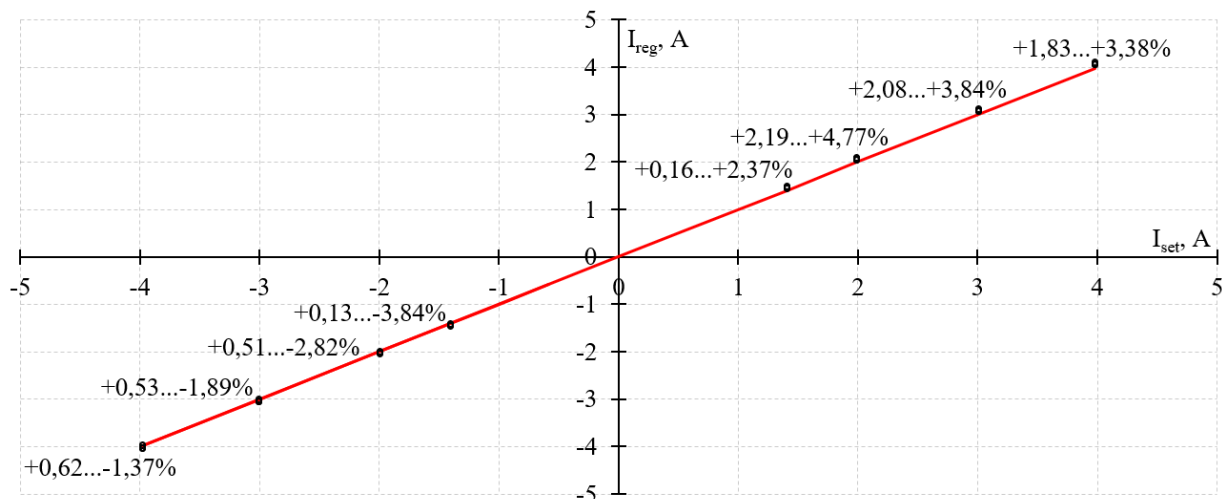


Рисунок 3.9 - Оценка погрешности по току 30-ти каналов исследовательского стенда

3.4 Планирование полного факторного эксперимента

В главе 2 было получено, что на срок службы ЛИА оказывают влияние большое количество факторов. Наиболее подробно изученными и имеющими практическую значимость являются зарядно-разрядные токи, рабочая температура и температура хранения. В исследовании [14] была показана неоднозначность влияния совместного воздействия факторов токов заряда-разряда на скорость деградации. Более подробное изучение этого направления позволит оптимизировать работу БН для продления срока службы БН.

Важным отличием стационарного использования ЛИА от применения их в составе ЭТС является неравномерность нагрузки с частым переключением режимов заряда-заряда. При существующем тренде, направленном на увеличение энергоемкости БН, уменьшится ток, проходящий через аккумуляторную ячейку. Предположено, что в таком случае более значимым фактором старения будет частота переключений режимов заряда-разряда.

Таким образом, возникает необходимость экспериментального исследования влияния как отдельных факторов, так и их совокупности, на скорость деградации катодного и анодного материалов. Такое исследование может быть выполнено с помощью полного факторного эксперимента.

Для получения модели старения аккумулятора выбран полный факторный эксперимент (ПФЭ). В качестве 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 .

Токовая нагрузка представлена в виде чередующихся режимов тяги и торможения (рисунок 3.10). Все опыты проводились при комнатной температуре 21-26°C. За уровни факторов приняты величины, соответствующие средним и максимальным значениям тока тяги и рекуперации, и времени между переключениями режимов. Для компенсации влияния случайных воздействий

проводимые опыты дублировались на трех ячейках. Матрица экспериментов представлена в таблице 3.1.

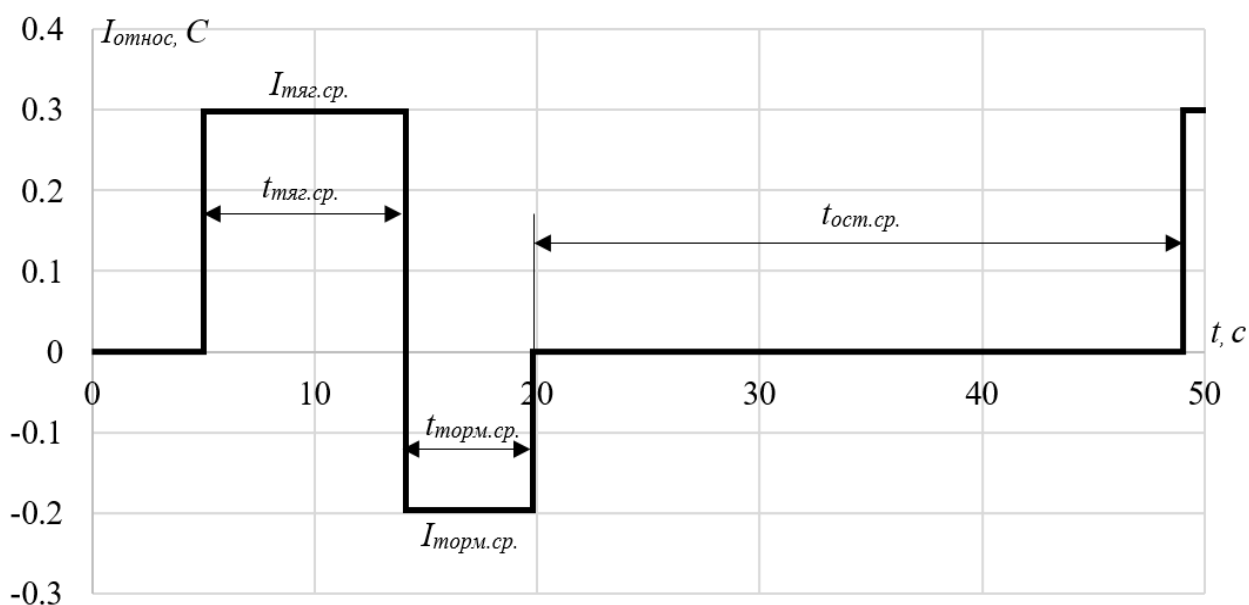


Рисунок 3.10 – Эквивалентная токовая диаграмма

Уровни уставок по напряжению и току следующие:

- $U_{\text{макс}} = 3,65B$ - максимальное напряжение без нагрузки (стабилизированное);
- $U_{\text{мин}} = 2,5B$ - минимальное напряжение без нагрузки (стабилизированное);
- $U_{\text{макс.заряд}} = 4,8B$ - максимальное напряжение под нагрузкой;
- $U_{\text{мин.разряд}} = 1,5B$ - минимальное напряжение под нагрузкой;
- $I_{\text{заряд}} = 0,5C$ - ток заряда до $U_{\text{макс}}$.

Тестирование проводилось на LFP ячейках с характеристиками, представленными в таблице 3.2.

Таблица 3.1 - Матрица эксперимента

№ опыта	$I_{тяг}, C$	$t_{тяг}, сек$	$I_{торм}, C$	$t_{торм}, сек$	Формат записи
1	1	65	0,5	5	1-65-05-5
2	1	65	3	5	1-65-3-5
3	1	20	0,5	5	1-20-05-5
4	1	20	3	5	1-20-3-5
5	3	65	0,5	5	3-65-05-5
6	3	65	3	5	3-65-3-5
7	3	20	0,5	5	3-20-05-5
8	3	20	3	5	3-20-3-5

Таблица 3.2 - Параметры LFP ячейки

Параметр		Размерность	Значение
Модель		-	1865HC16P
Ёмкость		$мА \cdot ч$	1600
Напряжение	Минимальное	B	2,5
	Номинальное		3,2
	Максимальное		3,65
Ток заряда	Номинальный	A	0,5
	Максимальный		1,6
Температура эксплуатации		$^{\circ}C$	-20...60

3.5 Результаты тестирования

Полученные результаты измерений остаточной емкости аккумуляторных ячеек после циклирования и линии тренда представлены на рисунке 3.11. Всего протестировано 24 ячейки, длительность опытов составила 80 дней.

Большинство производителей ЛИА определяют EOL при потере 20% от номинальной емкости батареи, что обусловлено переходом к резкому снижению мощностных и энергетических параметров батареи. Поэтому результаты были разбиты на три категории по скорости деградации:

1. Высокая скорость старения (EOL достигнут менее чем за месяц тестирования) - опыты 3-65-3-5, 3-20-05-5.

2. Средняя скорость старения (EOL достигнут в диапазоне 30-80 дней) - опыты (3-20-3-5), (3-65-05-5).

3. Медленное старение (EOL не достигнут после 80 дней тестирования) - к ним относятся опыты (1-65-05-5), (1-20-3-5), (1-65-3-5), (1-20-05-5).

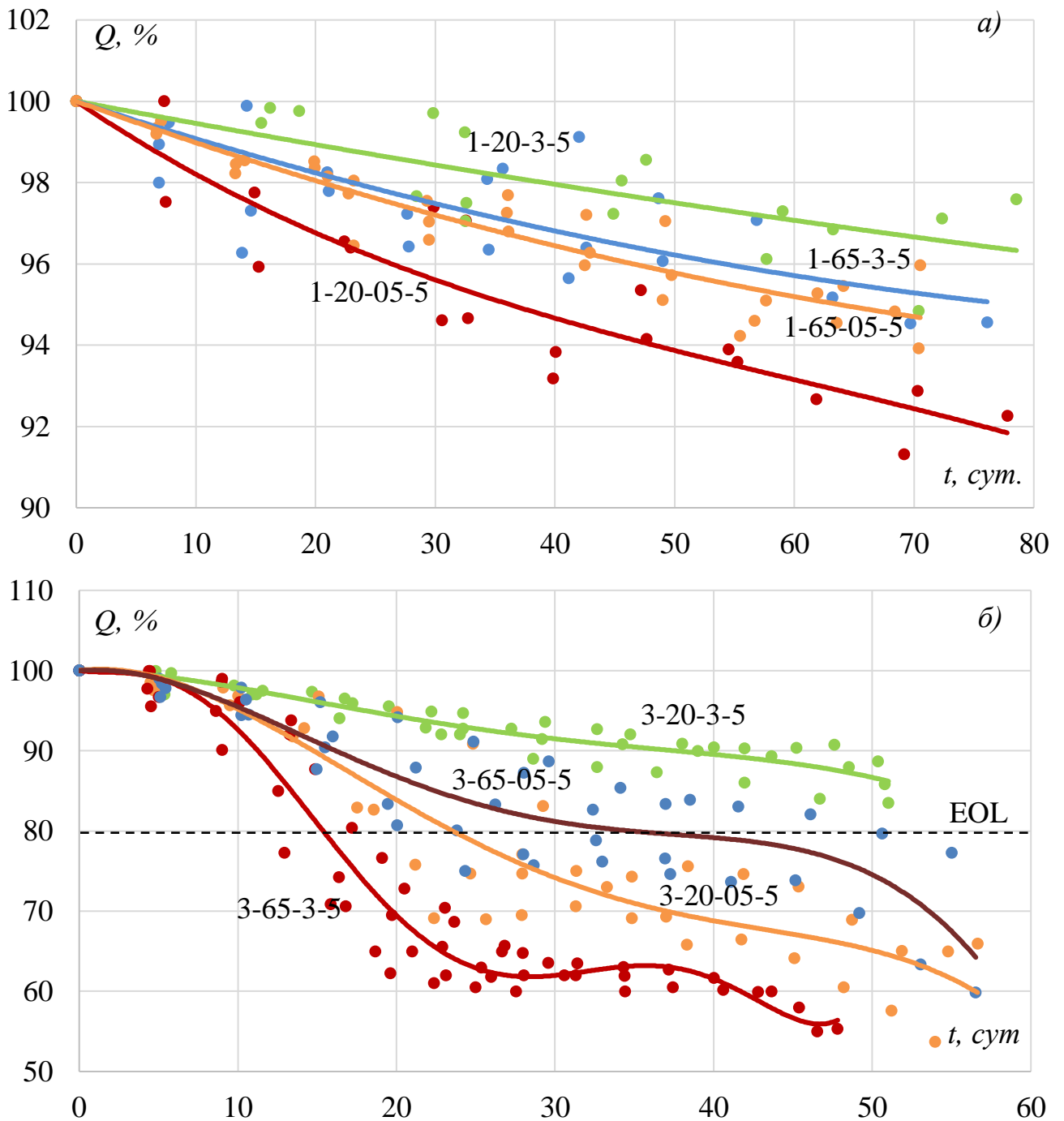


Рисунок 3.11 – Изменение емкости ячеек:

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

3.6 Обработка результатов тестирования

Аппроксимированная величина EOL для каждого опыта представлена в таблице 3.3. Курсивом выделены опыты, в которых время EOL получено продлением линии тренда.

Все ячейки с током тяги 1С вне зависимости от длительности и тока торможения показали малую степень деградации (менее 10%) после продолжительного тестирования. Из опытов с током тяги 3С наименьшая скорость деградации наблюдалась в опыте 3-20-3-5, тогда как опыт с уменьшенным током заряда демонстрирует более чем двукратное уменьшение ресурса ячейки.

Таблица 3.3 – Аппроксимированная величина EOL

№ опыта	Код опыта	EOL, сут.
1	<i>1-65-05-5</i>	260
2	<i>1-65-3-5</i>	290
3	<i>1-20-05-5</i>	145
4	<i>1-20-3-5</i>	450
5	3-65-05-5	34
6	3-65-3-5	16
7	3-20-05-5	23
8	<i>3-20-3-5</i>	60

Полученные данные согласуются с уже существующими исследованиями, направленными на установление корреляции между сроком службы ЛИА и величиной разрядного тока [67-71]. Это подтверждается тем, что все опыты с током тяги 1С за 50 дней демонстрируют степень деградации не более 6%, тогда как опыты с током тяги 3С - более 11%.

Величина тока рекуперации при разных токах тяги и частоте переключений оказывает различное влияние на скорость старения ячейки. При длительном воздействии тока разряда равному 1С увеличение величины кратковременных импульсов тока заряда *незначительно увеличивает* срок службы ЛИА. При этом

уменьшение длительности режима тяги в совокупности с большой величиной тока рекуперации позволяют значительно увеличить срок службы.

Длительное воздействие током тяги 3С приводит к более быстрой необратимой потере емкости ячейки, при этом увеличение тока рекуперации с 0,5С до 3С *негативно* сказывается на сроке службы, сокращая его вдвое. Однако при уменьшении длительности тока тяги и, таким образом, более частом воздействии тока рекуперации скорость потери емкости ячейки значительно уменьшается.

Таким образом:

1. Увеличение тока тяги влечет значительно более быструю деградацию ячейки;

2. Увеличение тока рекуперации при длительном режиме тяги либо незначительно (при токе тяги 1С), либо негативно (при токе тяги 3С) сказывается на ресурсе ЛИА.

3. Уменьшение длительности режима тяги, и, как следствие, увеличение частоты переключений $N_{пер}$, по-разному влияют на скорость деградации в зависимости от величины тока рекуперации (рисунок 3.12). Наилучший результат достигается при частом переключении с большим током рекуперации.

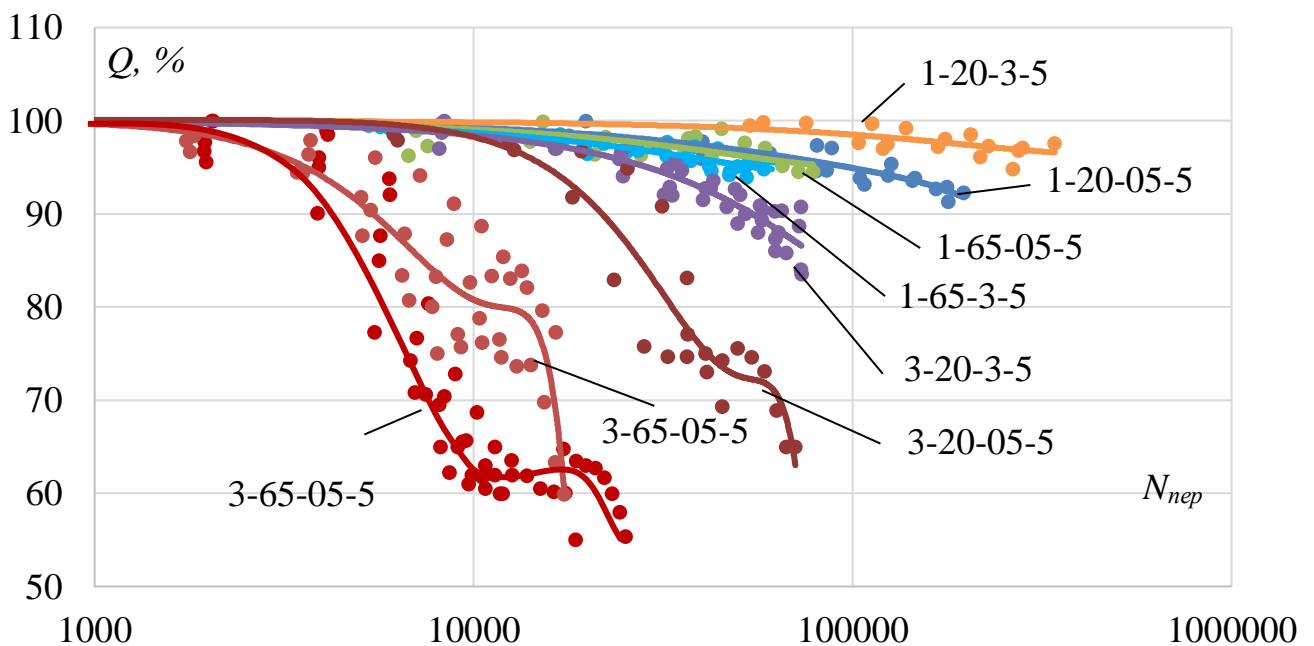


Рисунок 3.12 – Зависимость емкости ячеек от количества переключений

3.7 Формирование регрессионного уравнения

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:

$$\begin{aligned} \Delta Q = & b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 \\ & + b_{34} x_3 x_4 + b_{123} x_1 x_2 x_3 + b_{124} x_1 x_2 x_4 + b_{134} x_1 x_3 x_4 + b_{234} x_2 x_3 x_4 + b_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4 \end{aligned} \quad (13)$$

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

x_1, x_2, x_3, x_4 – безразмерное значение фактора. Для перехода к от нормированной системы координат z_1, \dots, z_k к ненормированной необходимо воспользоваться линейным преобразованием:

$$x_i = \frac{z_i - z_i^0}{\Delta z_i}, \quad i=1, 2, 3 \dots k \quad (14)$$

$$z_i^0 = \frac{z_i^{\max} + z_i^{\min}}{2} \quad (15)$$

$$\Delta z_i = \frac{z_i^{\max} - z_i^{\min}}{2} \quad (16)$$

где z_i^{\min} и z_i^{\max} – минимальное и максимальное значение фактора.

В безразмерной системе координат верхний уровень – “+1”, нижний уровень – “-1”. Матрица планирования эксперимента и результаты опытов указаны в таблице 3.4. Опыты проводились одновременно. Максимальное значение фактора длительности нахождения в работе принято равным 25 дней. Коэффициенты b_i вычислялись по формуле (2):

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_i}{N} \quad (17)$$

где x_{ij} – кодированное значение i -го фактора в j -м опыте.

Таблица 3.4 - Матрица планирования и результаты опытов

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	$\Delta Q, \%$
3-65-3-5	+	+	+	+	+	37
1-65-3-5	+	-	+	+	+	1,9
3-20-3-5	+	+	-	+	+	6
1-20-3-5	+	-	-	+	+	1,2
3-65-05-5	+	+	+	-	+	16,5
1-65-05-5	+	-	+	-	+	2,1
3-20-05-5	+	+	-	-	+	22
1-20-05-5	+	-	-	-	+	4
Коэффициенты	5,67	4,52	0,09	1,52	5,67	

Эффекты взаимодействия определены аналогично линейным эффектам, как показано на примере расчета коэффициента b_{12} :

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_1 x_2)_i y_i}{N} \quad (18)$$

Полученные в результате расчета коэффициенты регрессии приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Коэффициенты уравнения регрессии

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

После подстановки в уравнение (1) значений коэффициентов $b_i, b_{ii...}$ оно получило вид:

$$\begin{aligned} \Delta Q = & 5,67 + 4,52x_1 + 0,09x_2 + 1,52x_3 + 5,67x_4 + 0,47x_1x_2 + 1,67x_1x_3 + 4,52x_1x_4 \\ & + 2,44x_2x_3 + 0,09x_2x_4 + 1,52x_3x_4 + 2,12x_1x_2x_3 + 0,47x_1x_2x_4 + 1,67x_1x_3x_4 \\ & + 2,44x_2x_3x_4 + 2,12x_1x_2x_3x_4 \end{aligned} \quad (19)$$

Для проверки гипотезы адекватности уравнения (3) в целом с использованием F -критерия Фишера определена дисперсия адекватности при прогнозируемой длительности тестирования 15 по формуле:

$$S_{ad}^2 = \frac{S_R}{f} \quad (20)$$

Остаточная сумма квадратов определена по выражению:

$$S_R = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 6,84 \quad (21)$$

Дисперсия адекватности составила:

$$S_{ad}^2 = \frac{n \cdot S_R}{f} = 1,86 \quad (22)$$

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

k – число исследуемых факторов;

n – количество повторных опытов, $n=3$.

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.

Результаты опытов и математического моделирования подтверждают гипотезу о наличии корреляции между уменьшением емкости ячейки и частотой переключений режимов. Причем, для различных комбинаций токов тяги и торможения вид корреляции различается. Это может обуславливаться значительным влиянием значений токов тяги и рекуперации.

Выводы по третьей главе

1. Разработана исследовательская установка, позволяющая проводить ресурсные испытания аккумуляторов типоразмера 18650 с фиксацией основных эксплуатационных параметров. Установка позволяет проводить тестирования одновременно до 30 ячеек, при этом программы их испытаний могут различаться.

2. Управление стендом осуществляется микропроцессорной системой, что позволяет проводить ресурсные испытания по заданной программе без непосредственного участия оператора. Особенностью стенда является возможность задавать для каждого аккумулятора любую форму тока (изменять амплитуду и частоту токового сигнала, изменять среднее значение тока, изменять направление протекания тока).

3. Проверка значений регистрируемого напряжения показала погрешность измерений не более $\pm 0,8\%$. Отклонение используемых при тестировании токов от задаваемых составило не более 5% во всем диапазоне.

4. Для определения ресурсосберегающих режимов работы аккумулятора был спланирован полный факторный эксперимент. В качестве факторов выбраны: ток тяги, ток рекуперации, длительности режима тяги и общая длительность нахождения в работе.

5. Согласно результатам тестирования, наибольшее влияние на величину снижения емкости оказывает ток и длительность режима тяги. Величина

кратковременных импульсов рекуперативного тока в большинстве опытов положительно влияют на срок службы аккумулятора. При этом увеличение частоты переключений также способствует уменьшению скорости деградации, что связано с увеличением количества этапов рекуперации, при которых происходит процесс восстановления емкости. Причины отклонения части опытов с большим током тяги от установленной корреляционной зависимости требуют дальнейшего более детального изучения.

б. На основе результатов тестирования получена математическая модель, описывающую взаимосвязь величины потери емкости от рассмотренных факторов. Проверка уравнения критерием Фишера показала адекватность модели в диапазоне SOH аккумулятора от 100 до 80%.

ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ ЛИТИЕВОГО АККУМУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

По результатам проведенных экспериментов определено, что наибольший влияние на скорость изменения емкости аккумулятора оказывает величина тока тяги. Поэтому с целью минимизации воздействий больших разрядных токов рассмотрено применение БНЭ с высокими мощностными показателями и большим ресурсом по количеству циклов заряда-разряда. Для оценки технического решения в вычислительной среде MATLAB Simulink синтезирована модель автомобиля Nissan Leaf, относящегося к III классу по удельной установленной мощности, со стандартной и гибридной накопительной установкой энергоемкостью $24 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

4.1 Тяговая установка автомобиля

Типовая конфигурация энергоустановки автомобиля включает в себя АБ, импульсный преобразователь, тяговый электродвигатель (ТЭД/Г), трансмиссию и колесную пару (К). Для совершения работы по перемещению энергия потребляется из БН и возвращается в него при рекуперативном торможении, а запас хода ЭТС определяется его энергоемкостью.

В гибридной накопительной установке параметры основного накопителя энергии (ОНЭ) определяются исходя из требуемой дальности хода, а токовая нагрузка на нем ограничивается. БНЭ необходим для отдачи энергии во время пиков нагрузок для исключения кратковременных перегрузок ОНЭ и подзаряда во время рекуперативного торможения. Схема привода автомобиля с гибридным накопителем представлена на рисунке 4.1. При совместной работе ОНЭ обеспечивает энергию на собственные нужды автомобиля и на перемещение с низкой динамикой, а БНЭ отдает энергию, накопленную в результате рекуперативного торможения во время пиковых нагрузок.

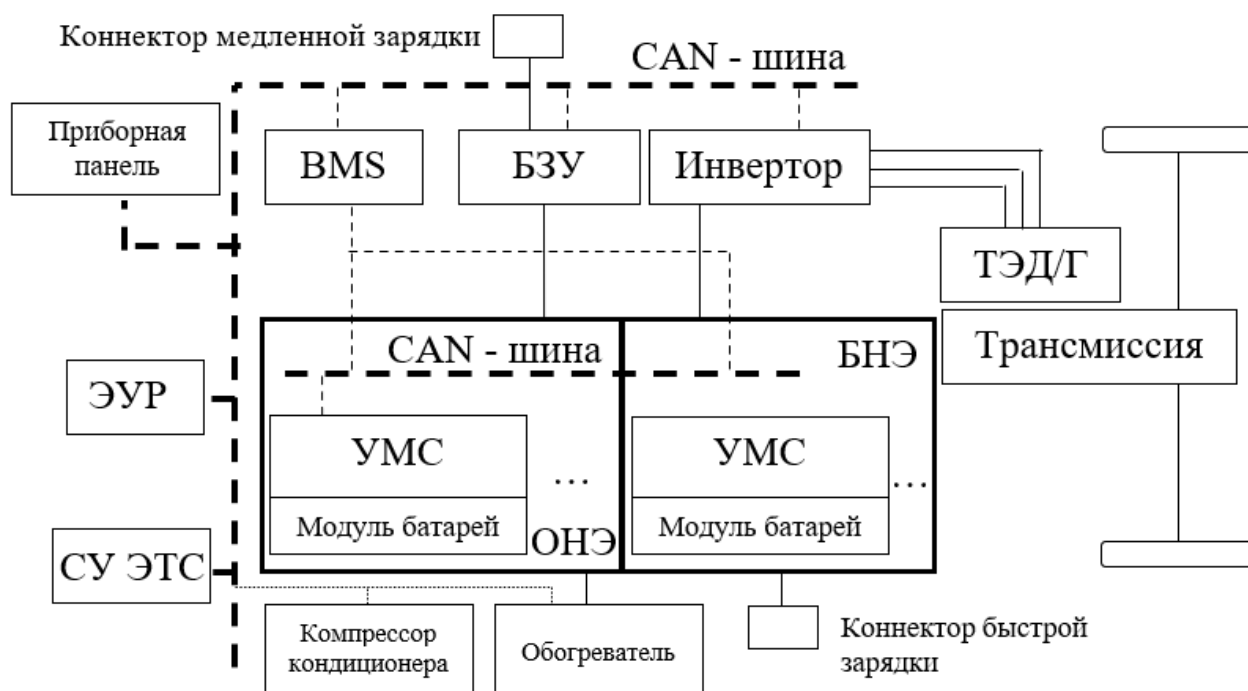


Рисунок 4.1 – Модернизированная схема тягового привода электромобиля с БНЭ

4.2 Моделирование процессов деградации аккумулятора электротранспортного средства

4.2.1 Синтез модели электротранспортного средства со стандартной накопительной установкой

Модель (рисунок 4.2) в вычислительной среде MATLAB Simulink включает себя:

- Подсистему “П1”, задающую транспортную нагрузку на тяговый привод электромобиля на основе диаграмм скорости и ускорения WLTC, а также текущего состояния аккумулятора;
- Подсистему “П2”, рассчитывающую реализуемую мощность ТЭД с учетом КПД установки и сопротивления движению;
- Подсистему “П3”, определяющую режим работы и величину тока аккумулятора на основе его уровня заряда (SOC);
- Электрическая цепь, формирующая величину тока на аккумуляторе, полученную в подсистеме “П3”.

В качестве ездового цикла используется Worldwide harmonized light vehicles test cycle (WLTC), заданный в модели повторяющимся сигналом скорости “V”. Кроме этого, блок “M” задает массу ЭТС, “Ток заряда” – величину зарядного тока.

По данным аналитического агентства “Автостат” [106], ежегодный пробег автомобилей варьируется в диапазоне 14...21 тыс. км., либо 39...58 км в день. Для имитации транспортной активности принято, что ежедневно электромобиль проезжает цикл WLTC дважды (т.е. 46 км).

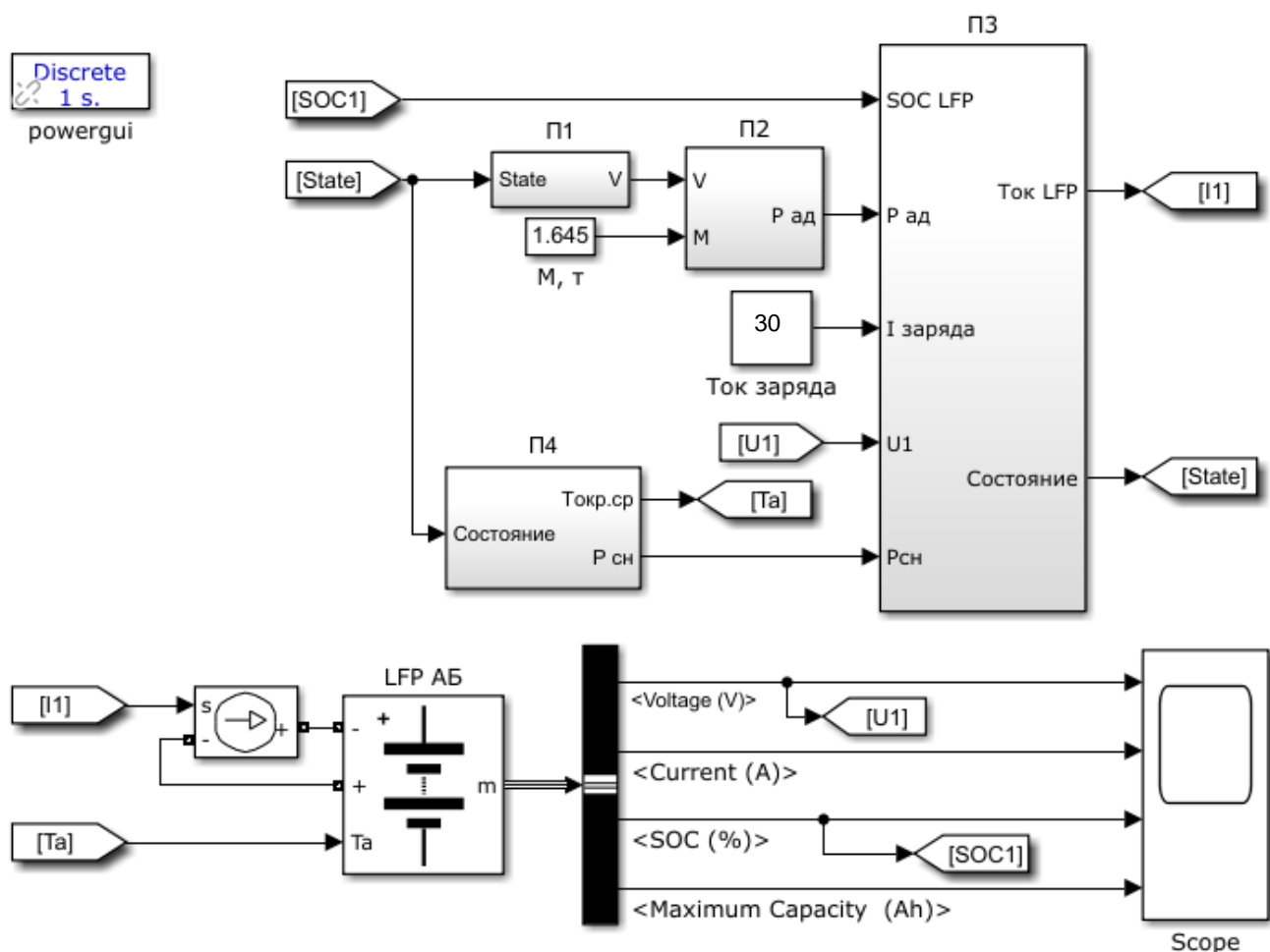


Рисунок 4.2 – Имитационная модель старения аккумулятора электромобиля со стандартной накопительной установкой

В подсистеме П1 (рисунок 4.3) переключается режим работы схемы в зависимости от сигнала состояния аккумулятора – State. Нулевой сигнал свидетельствует о режиме заряда аккумулятора, равный единице – режиме

Возможности MATLAB Simulink позволяют линейризовать полученные характеристики. Блок умножения “ $a_{\text{выб}}$ ” рассчитывает ускорение замедления ЭТС при выбеге:

$$a_{\text{выб}} = \frac{9.81 \cdot w}{1000}, \text{ м/с}^2; \quad (23)$$

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

где w – основное сопротивление движению.

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

$$\left. \begin{aligned} a > a_{\text{выб}}, P_{\text{ТЭД}} &= \frac{F_{\text{тяг}} \cdot V}{3.6 \cdot \eta_{\text{ТЭД}} \cdot \eta_{\text{ПР}} \cdot \eta_{\text{ТР}}} \\ a = a_{\text{выб}}, P_{\text{ТЭД}} &= 0 \\ a < a_{\text{выб}}, P_{\text{ТЭД}} &= \frac{F_{\text{торм}} \cdot V \cdot \eta_{\text{ТЭД}} \cdot \eta_{\text{ПР}} \cdot \eta_{\text{ТР}}}{3.6} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

В подсистеме “ПЗ” (рисунок 4.5) полученная мощность ТЭД и мощность собственных нужд преобразуется в ток аккумулятора с учетом текущего напряжения LFP аккумулятора:

$$I_{\text{LFP}} = \frac{P_{\text{ТЭД}}}{U_1 \cdot \eta_{\text{ПР1}}} + \frac{P_{\text{СН}}}{U_1 \cdot \eta_{\text{ПР2}}}, \text{ А} \quad (25)$$

где $P_{\text{СН}}$ – мощность собственных нужд, Вт;

U_1 – выходное напряжение LFP аккумулятора, В;

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

Функциональный блок “Fnc” определяет режим работы аккумулятора исходя из его текущего состояния: если SOC больше минимального значения, то величина State приравнивается единице и осуществляется разряд рассчитанным током. Проводится интегрирование сигнала State, и при прохождении двух циклов WLTC переменная состояния принимает нулевое значение и осуществляется

режим полного заряда аккумулятора. По достижении максимального SOC величина State снова принимается равной единице, начинается разряд и цикл повторяется. Результирующая величина тока формируется на LFP аккумуляторе с помощью управляемого источника тока. Для сопоставления результатов в память записываются данные об изменении напряжения, емкости, SOC и тока LFP аккумулятора.

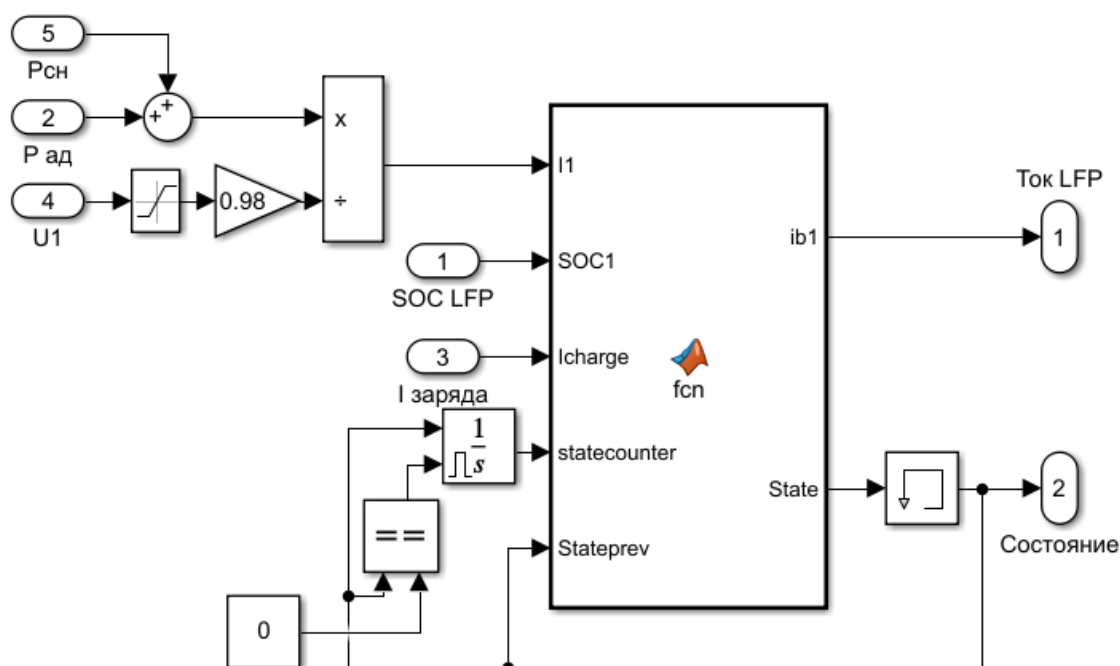


Рисунок 4.5 - Подсистема “П3”

В подсистеме “П4” (Рисунок 4.6) проводится расчет мощности собственных нужд на основе данных об ежедневной температуре. Для расчета использовались статистические данные об изменении средней ежедневной температуры (рисунок 4.7) в г. Новосибирск за 2019 г. [107]

Основными компонентами собственных нужд электромобиля являются компрессор кондиционера, обогреватель салона, вентиляция, система освещения и контроллер. Основной причиной изменения мощности собственных нужд электромобиля является регулирование работы кондиционера и обогревателя для поддержания комфортной температуры в салоне.

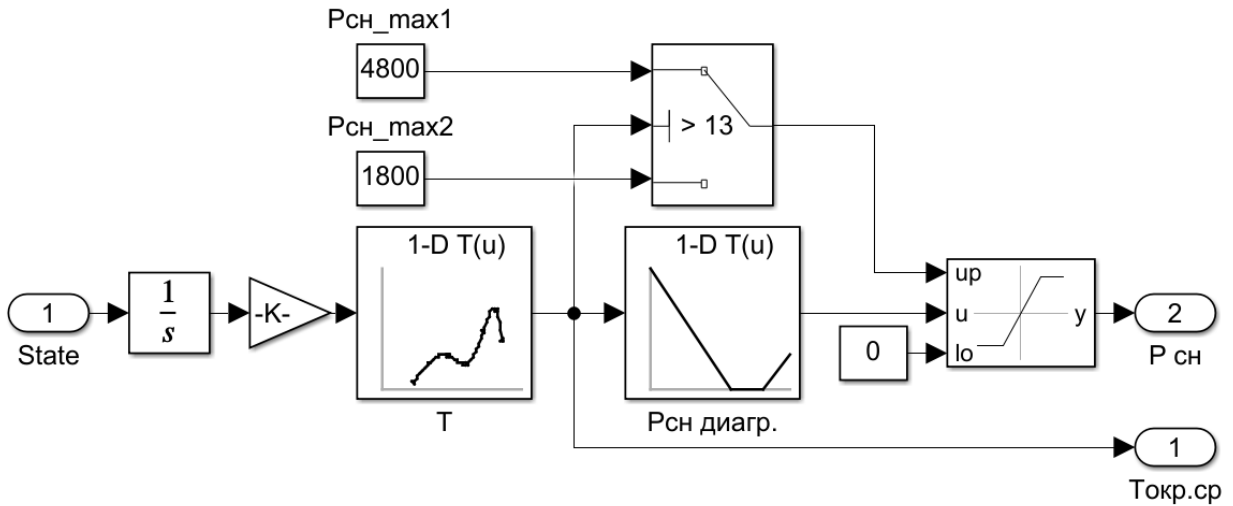


Рисунок 4.6 - Подсистема “П4”

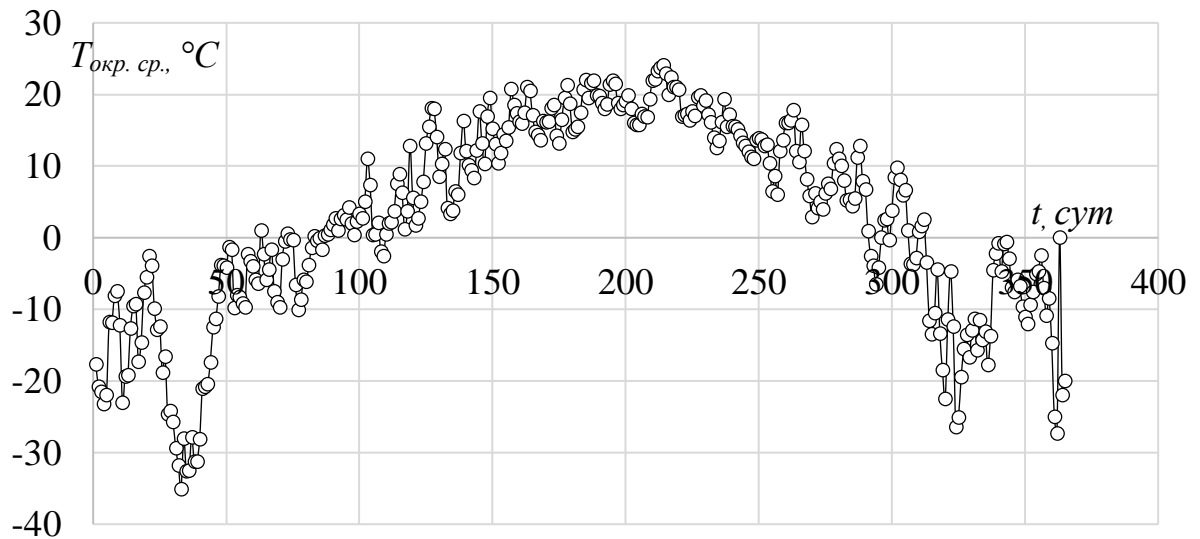


Рисунок 4.7 – Ежедневное изменение температуры окружающей среды

Мощность охлаждения рассчитывается, как:

$$\phi_{охл} = \phi_{корп} + \phi_{пасс} + \phi_{обр}, \text{ Вт} \quad (26)$$

где $\phi_{корп}$ – мощность теплового рассеивания корпуса, Вт;

$\phi_{пасс}$ – тепловыделение пассажиров, Вт;

$\phi_{обр}$ – тепловыделение механических и электрических устройств, Вт.

Холодопроизводительность компрессора рассчитывается, как:

$$P_{\text{комп}} = \frac{\phi_{\text{охл}}}{K_{\text{охл}}}, \text{ Вт} \quad (27)$$

где $K_{\text{охл}}$ – коэффициент эффективности охладителя.

В большинстве традиционных систем обогрева используются нагреватели прямого преобразования электрической энергии в тепло. Тепловая нагрузка рассчитывается согласно соотношению:

$$P_{\text{об}} = \phi_{\text{корп}} + \phi_{\text{возд}} - \phi_{\text{насс}} - \phi_{\text{обр}}, \text{ Вт} \quad (28)$$

Где $\phi_{\text{возд}}$ - тепловая нагрузка приточного воздуха, Вт;

Тепловыделение механических и электрических устройств обычно рассматривается как резерв тепла, и при расчете не учитывался. Мощность рассеивания стенки кузова [108] рассчитывался, как:

$$\phi_{\text{корп}} = K \cdot F \cdot (T_{\text{окр}} - T_{\text{сал}}), \text{ Вт} \quad (29)$$

где K – коэффициент теплопередачи корпуса, Вт/м²·К;

F – площадь теплоотдачи корпуса электромобиля, м²;

$T_{\text{окр}}$ и $T_{\text{сал}}$ – температуры окружающей среды и салона, °С.

Тепловыделение пассажиров определяется, как:

$$\phi_{\text{насс}} = \beta \cdot N_n \cdot q, \text{ Вт} \quad (30)$$

где β – коэффициент кластеризации;

N_n – количество пассажиров;

q – средняя величина тепловыделения человека, Вт.

Мощность, необходимая для подачи охлажденного или нагретого воздуха в салон рассчитана по соотношению:

$$\phi_{\text{возд}} = V_a \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{\text{сал}} - T_{\text{окр}}), \text{ Вт} \quad (31)$$

Где V_a – объем подаваемого воздуха, м³/ч;

ρ – плотность воздуха, $кг/м^3$;

C_p – удельная теплоемкость воздуха, $Дж/(кг·К)$.

При эксплуатации ЭТС основным фактором, влияющим на результирующую мощность собственных нужд, является температура окружающей среды $T_{окр}$. В работе принято, что при температуре в диапазоне 12-25°C нет необходимости в обогреве или охлаждении салона. При температуре $T_{окр} < 12°C$ в работу включается обогревательная установка, а при $T_{окр} > 25°C$ – охлаждающий компрессор. В таблице 4.1 представлены величины параметров, используемых в расчете мощности собственных нужд.

При значениях параметров, перечисленных в таблице 4.1, рассчитана зависимость между мощностью собственных нужд и температурой окружающей среды.

Результаты расчета представлены на рисунке 4.8, функциональная зависимость имеет вид:

$$P_{сн} = \begin{cases} -131,25 \cdot T_a + 1875, & -20 \leq T_a < 11 \\ 300, & 11 \leq T_a \leq 27 \\ 240 \cdot T_a - 5700 & 27 < T_a \leq 40 \end{cases} \quad (32)$$

Таблица 4.1 - Параметры для расчета мощности собственных нужд

Параметр	Размерность	Значение
K	$Вт/м^2 \cdot К$	1,78
F	$м^2$	14,48
$T_{сал}$	$°C$	25
B	-	0,96
$N_{п}$	Чел.	4
q	$Вт$	116,8
V_a	$м^3/ч$	14
ρ	$кг/м^3$	1,293
C_p	$Дж/(кг \cdot К)$	1,005
$K_{охл}$	-	2,5

Кроме того, максимальная мощность охлаждения и обогрева салона ограничена максимальной мощностью установленных компонентов. Так, максимальная мощность охлаждающего компрессора $P_{охл.комп} = 1,5 \text{ кВт}$, обогревателя $P_{охл.комп} = 4,5 \text{ кВт}$.

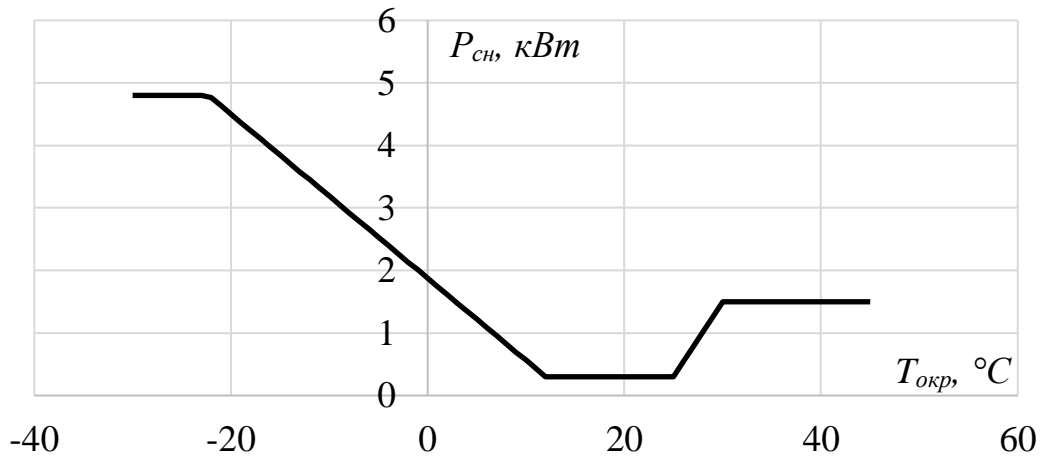


Рисунок 4.8 – Зависимость мощности собственных нужд электромобиля от температуры окружающей среды

Для формирования БН энергоемкостью $24 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ и выходным напряжением $320\dots410 \text{ В}$ на базе LFP ячеек потребуется:

$$N_n = \frac{U_{БН,ном}}{U_{LFP,ном}} = \frac{365}{3,25} = 112 \text{ шт.} \quad (33)$$

$$N_{np} = \frac{A_{БН}}{U_{БН,ном} \cdot Q_б} = \frac{24 \cdot 10^3}{400 \cdot 1,6} = 38 \text{ шт.} \quad (34)$$

$$N_{общ} = N_n \cdot N_{np} = 112 \cdot 38 = 4256 \text{ шт.} \quad (35)$$

где N_n – количество последовательно включенных ячеек;

N_{np} – количество параллельно включенных ячеек;

$N_{общ}$ – общее количество ячеек;

$U_{БН,ном}$ – номинальное выходное напряжение БН, В;

$U_{LFP,ном}$ – номинальное напряжение LFP ячейки, В;

Q_6 – емкость ячейки, $A \cdot ч$;

$A_{БН}$ – энергоемкость БН, $кВт \cdot ч$.

В таблице 4.2 представлены основные параметры БН в среде MATLAB Simulink.

Таблица 4.2 – Параметры модели БН на базе LFP аккумулятора

Параметр	Размерность	Величина
Номинальное напряжение	B	350
Номинальная емкость	$A \cdot ч$	60
Напряжение отсечки	B	360
Внутреннее сопротивление	$Ом$	0,04
Количество циклов при $T_a=25^{\circ}C$	$DOD = 100\%, I_{заряда} = 0,5C$ $I_{разряда} = 0,5C$	1500
	$DOD = 25\%, I_{заряда} = 0,5C$ $I_{разряда} = 0,5C$	10445
	$DOD = 100\%, I_{заряда} = 0,65C$ $I_{разряда} = 0,5C$	1460
	$DOD = 25\%, I_{заряда} = 0,5C$ $I_{разряда} = 2C$	1017
	Количество циклов при $T_a=45^{\circ}C, I_{заряда} = 0,5C,$ $I_{разряда} = 0,5C$	-
Термическое сопротивление	$^{\circ}C/Вт$	0.6411

4.2.2 Синтез модели электротранспортного средства с гибридной накопительной установкой

Для реализации модели электромобиля с гибридной накопительной установкой (рисунок 4.9) изменена подсистема ПЗ, а также добавлен БНЭ на базе LTO ячеек емкостью 10 $A \cdot ч$. Для формирования выходного напряжения,

$U_{вых}=400 В$, аналогичному выходному напряжению ОНЭ, необходимо соединить последовательно:

$$N'_n = \frac{U_{БН,ном}}{U_{LTO,ном}} = \frac{365}{2,3} = 152 \text{ шт.} \quad (36)$$

где $U_{LTO,ном}$ – номинальное напряжение LTO ячейки.

Характеристики LTO ячейки представлены в таблице 4.3. [109]

Таблица 4.3 - Параметры LTO ячейки

Параметр		Размерность	Величина
Номинальная мощность		$A \cdot ч$	10
Номинальное напряжение		B	2.4
Ток разряда	Ном.	A	100
	Макс.		750 (SOC 50%, 10 сек., 25°C)
Ток заряда	Ном.	A	100
	Макс.		625 (SOC 50%, 10 сек., 25°C)
Удельная энергоемкость		$Вт \cdot ч / кг$	47
Габаритные размеры		$мм$	$116 \times 22 \times 106$
Масса		$кг$	0,51

Измененная подсистема “ПЗ” представлена на рисунке 4.10. В подсистему “ПЗ.1” подаются сигналы мощности ТЭД и собственных нужд, текущего напряжения на LFP и LTO аккумуляторах и SOC_{LTO} , где происходит распределение токовой нагрузки между двумя источниками (рисунок 4.11). Рассчитанные значения тока подаются в функциональный блок “Fnc”, где определяется режим работы БН:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Если } State = 1, I_{LFP} = I_1, I_{LTO} = I_1 \\ \text{Если } State = 0, I_{LFP} = -I_{заряда}, I_{LTO} = 0 \end{array} \right\} \quad (37)$$

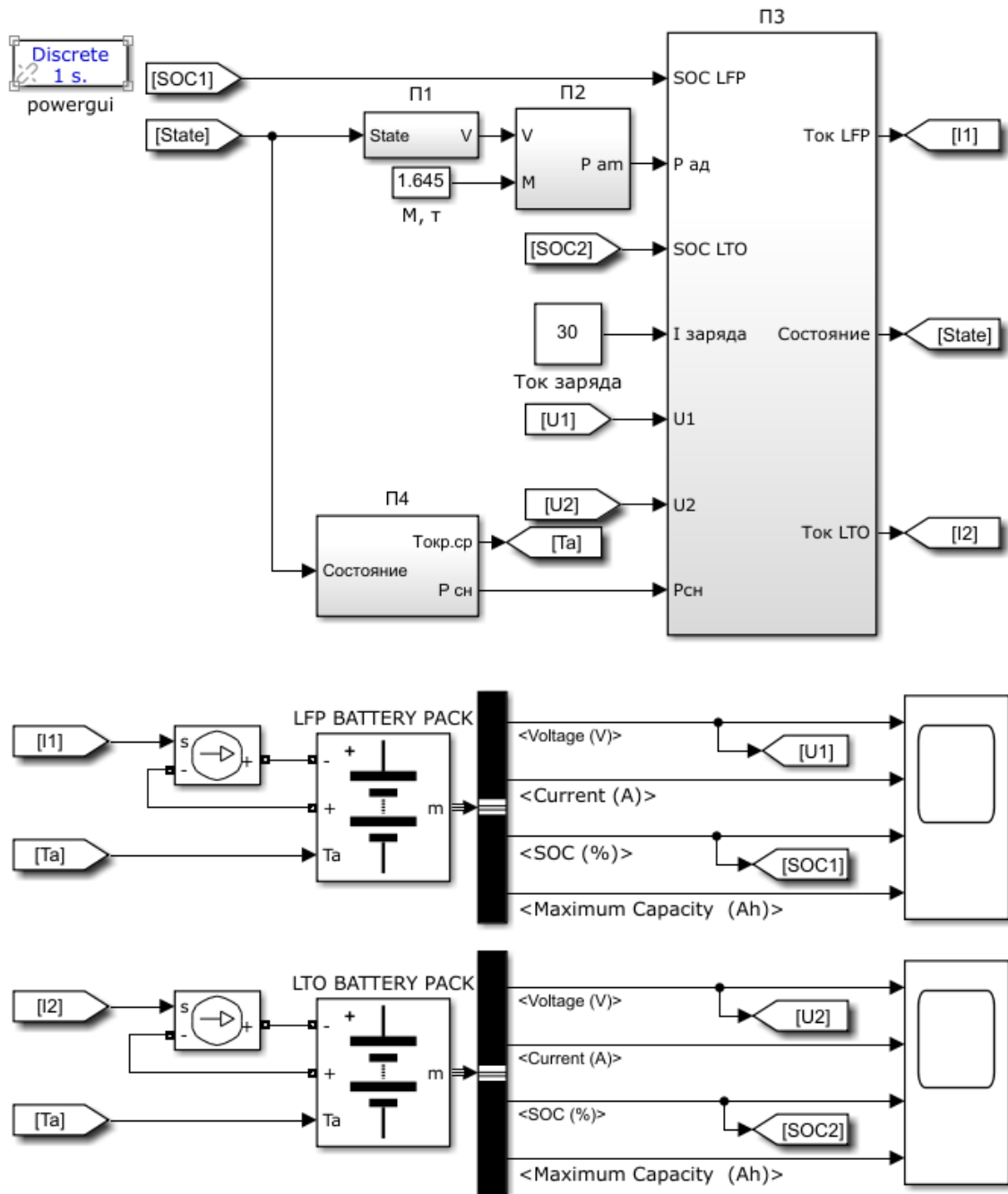


Рисунок 4.9 – Имитационная модель старения аккумулятора электромобиля с гибридной накопительной установкой

Ток нагрузки в ОНЭ, полученный по соотношению (25) ограничивается динамическими верхними и нижними значениями насыщения в блоке Dynamic Saturation “ I_1' ”.

Ограничения тока в ОНЭ формируются, исходя из текущего SOC БНЭ:

$$\left. \begin{aligned} \text{Если } SOC_{LTO} \geq 100\%, I_{LFP}^{low} = -\infty, I_{LFP}^{up} = f(SOC_{LTO}) \\ \text{Если } SOC_{LTO} < 100\%, I_{LFP}^{low} = 0 \\ \text{Если } SOC_{LTO} < 20\%, I_{LFP}^{up} = \infty \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Таким образом, не допускается перезаряд и разряд менее 20% БНЭ. Функция регулирования верхней границы по току в зависимости от SOC_{LTO} нелинейна и представлена на рисунке 4.12.

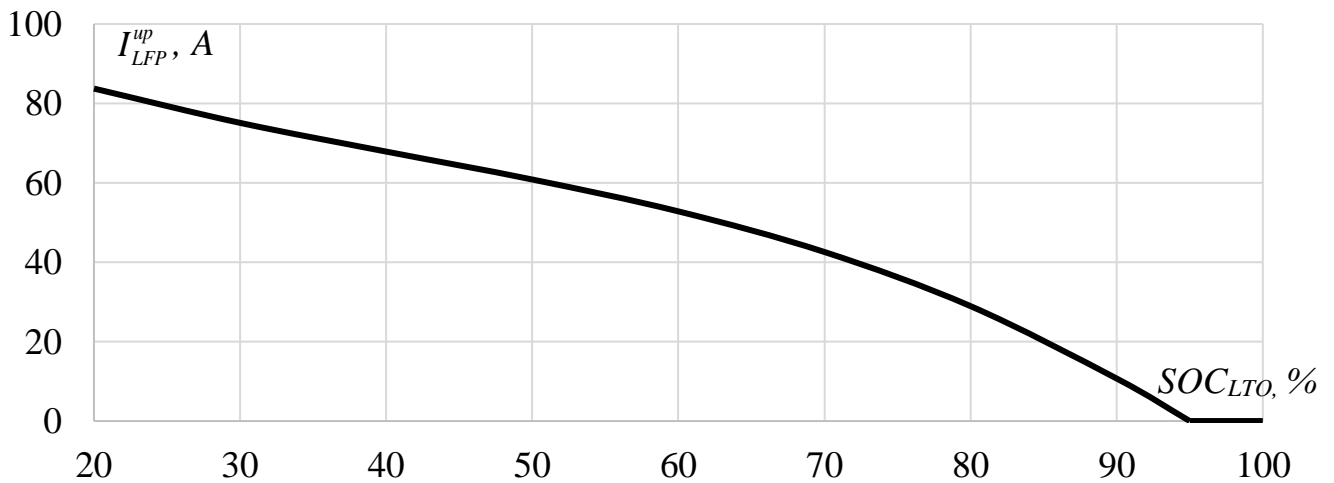


Рисунок 4.12 – Функция регулирования верхней границы по току ОНЭ

4.3 Анализ результатов моделирования

Моделирование циклической нагрузки тягового привода электромобиля со стандартной и гибридной накопительной системой проводилось для времени эксплуатации, равным 8,5 лет. Примеры диаграмм тока и напряжения ОНЭ и БНЭ представлены на рисунках 4.13-4.14.

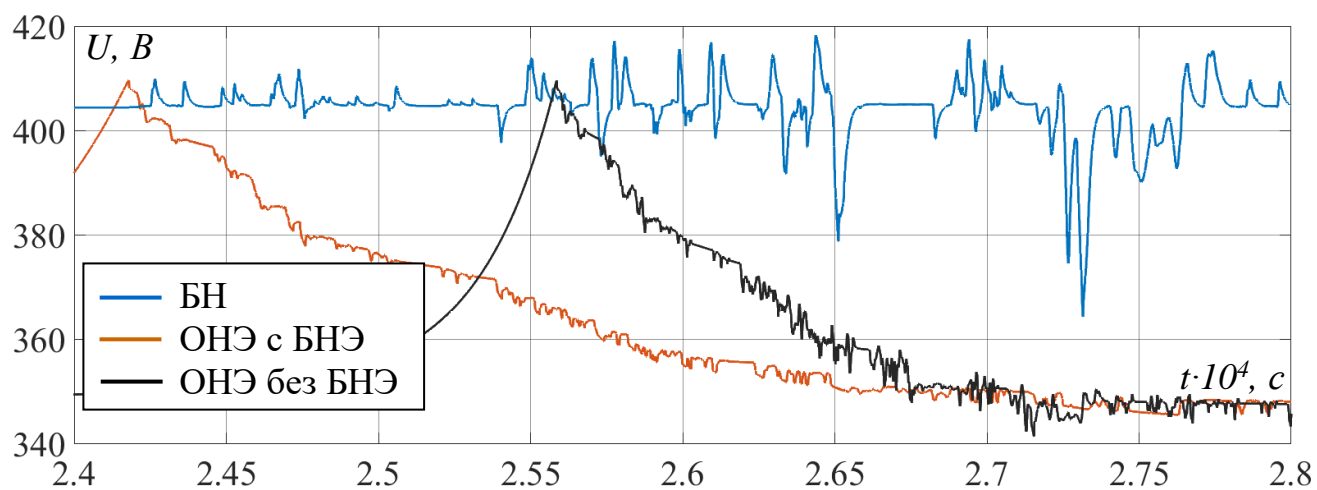
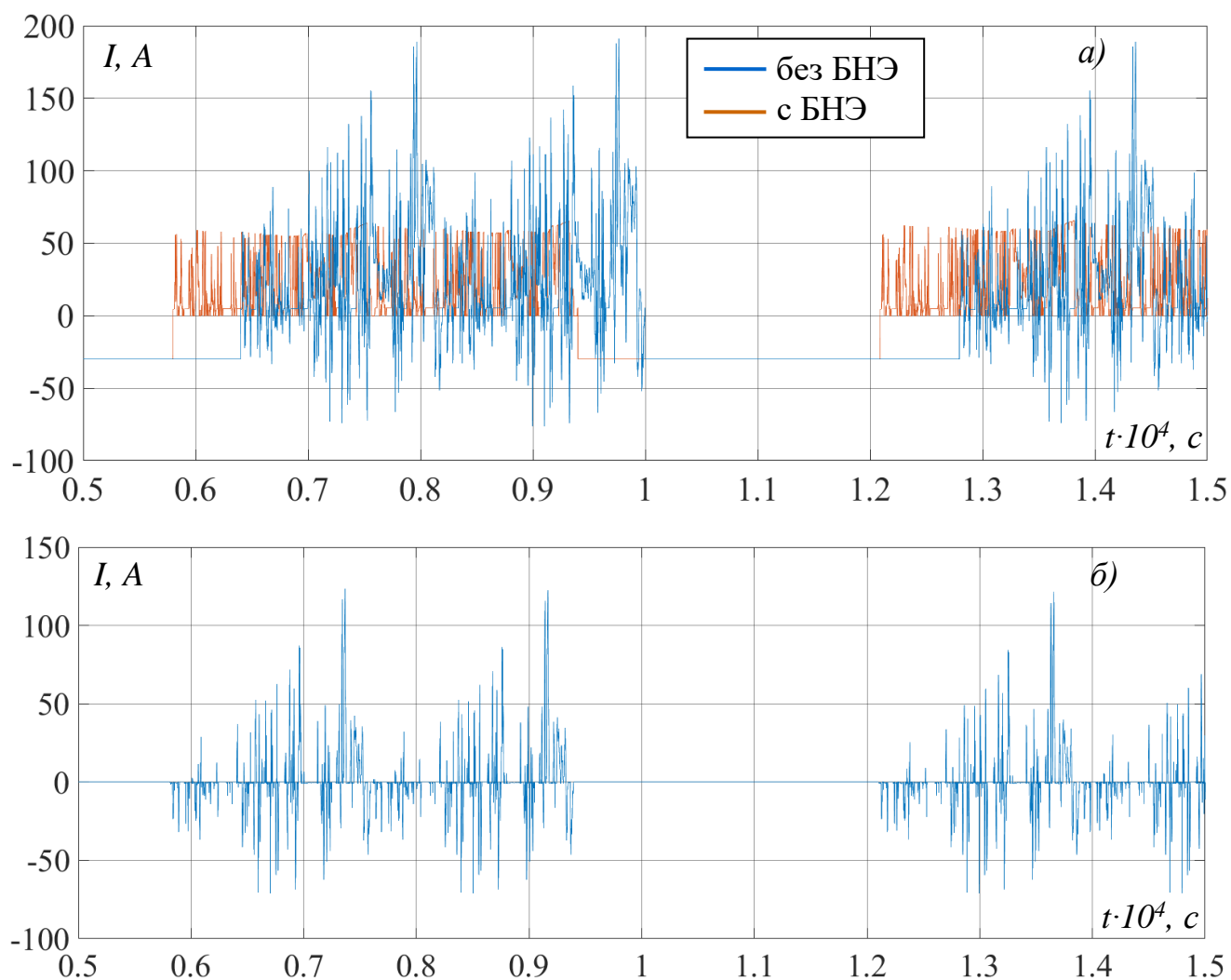


Рисунок 4.13 – Диаграмма напряжений ОНЭ и БНЭ

Рисунок 4.14 – Диаграмма токов,
а) LFP аккумулятора, б) LTO аккумулятора

Результаты изменения емкости ОНЭ в зависимости от величины пробега ЭТС приведены на рисунке 4.15. Изменение емкости БНЭ составило менее 1%.

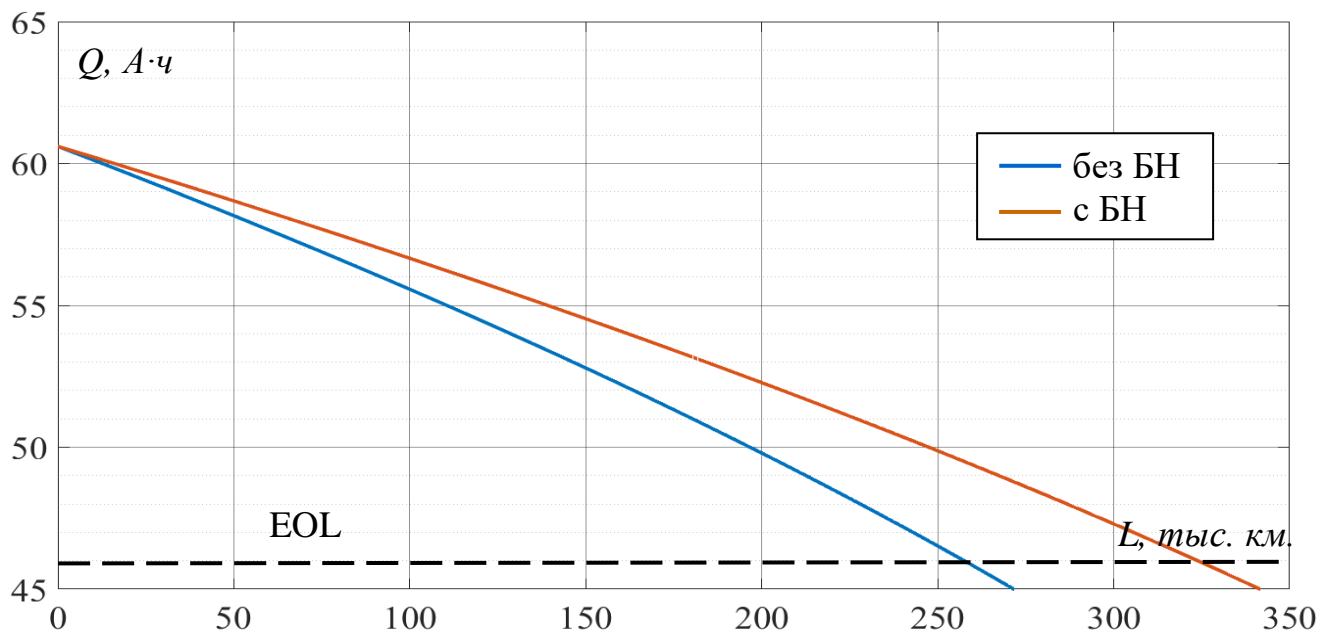


Рисунок 4.15 – Изменение емкости ОНЭ в зависимости от длины пробега

По результатам моделирования движения электромобиля 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 электромобиля на 26% при движении согласно циклу WLTC.

Выводы по четвертой главе

1. На основе полученных данных о тестировании аккумуляторов сделано предположение, что внедрение БНЭ в состав накопительной установки электромобиля, ограничивающего токовую перегрузку ОНЭ, позволит увеличить его ресурс.

2. Синтезирована модель, имитирующая токовую и температурную нагрузку БН при движении электромобиля. Для анализа рассмотрены

классическая и гибридная накопительная установка, включающая БНЭ на базе LTO аккумулятора энергоемкостью 10 А·ч и массой 70 кг. Для формирования токовой нагрузки использован ездовой цикл WLTC, для температурной – средние значения ежедневных температур в течение года пересчитаны в требуемую мощность собственных нужд.

3. По результатам моделирования согласно ездовому циклу WLTC получено, что внедрение БНЭ позволит уменьшить скорость деградации ОНЭ на 26%, увеличив тем самым дальность хода электромобиля с 230 до 290 *тыс. км*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

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 $Вт\cdotч/(т\cdot км)$ и 93,54 $Вт\cdotч/(т\cdot км)$ без учета и с учетом энергии рекуперации соответственно). 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 ($N_{пер} = 33$ за 589 сек.), загородный режим движения с длительным разгоном до скорости $V_{max} = 131$ $км/ч$ 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 1С 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.

Предложенные в работе подходы к исследованию процесса деградации аккумулятора могут быть использованы для более детального исследования механизмов старения ЛИА применимо к транспортному комплексу. В дальнейшем развитии выполненной работы может быть уточнена модель путем увеличения числа и задания меньшего шага факторов, доработан алгоритм совместной работы ОНЭ и БНЭ, а также рассмотрена возможность применения гибридной накопительной установки для других типов ЭТС.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ЭТС – электротранспортное средство;
- ТЭД – тяговый электродвигатель;
- ДВС – двигатель внутреннего сгорания;
- БН – блок накопителей;
- АБ – аккумуляторная батарея;
- ЛИА – литий-ионная аккумуляторная батарея;
- SOC – уровень заряда, state of charge;
- SOH – состояние батареи, state of health;
- EOL – окончание срока службы, end of life;
- ОНЭ – основной накопитель энергии;
- БНЭ – буферный накопитель энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года. [Текст] : распоряжение Правительства РФ от 23 июля 2021 г. № 2290-р
2. Global EV Outlook 2021, IEA [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021> – загл. с экрана (Дата обращения: 14.02.2022)
3. Перспективы развития рынка электротранспорта и зарядной инфраструктуры в России, 2021 [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2021/04/23/2021_0419_Doklad_elektromobily.pdf – загл. с экрана (Дата обращения: 14.02.2022)
4. Kanevskii L.S. Degradation of lithium-ion batteries and how to fight it: A review / L.S. Kanevskii, V.S. Dubasova // Russian Journal of Electrochemistry. — 2005. — № 41. — С.1-16.
5. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle / [H. Xuebing, L. Languang, Z. Yuejiu и др.] // eTransportation. — 2019. — № 1. — С.1-21.
6. 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.
7. Zilin, Ma. Parameters Design for a Parallel Hybrid Electric Bus Using Regenerative Brake Model / Zilin Ma // Advances in Mechanical Engineering. – Vol. 2014. – Article ID 760815. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/760815>.
8. 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.
9. Jiayuan W. Performance and Characteristic Research in LiFePO₄ Battery for Electric Vehicle Applications / W. Jiayuan, S. Zechang, W. Xuezhe // 2009 IEEE

Vehicle Power and Propulsion Conference / MI, USA. — Dearborn, 2009. — C.1657-1661.

10. Van-Huan D. Online state of charge and model parameters estimation of the LiFePO₄ battery in electric vehicles using multiple adaptive forgetting factors recursive least-squares / D. Van-Huan, B. Hany Ayad, L. KaiChin // Journal of Power Sources. — 2015. — № 296. — C.215-224.

11. Garmendia M.I. Proposal and Validation of a SOC Estimation Algorithm of LiFePO₄ Battery Packs for Traction Applications / M.I. Garmendia, I. Gandiaga // World Electr. Veh. J. — 2013. — № 6 (3). — C.771-781.

12. Wang J. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells / J. Wang, P. Liu, J. Hicks-Garner // Journal of Power Sources. — 2011. — № 196. — C.3942-3948.

13. Safari M. Aging of a Commercial Graphite/LiFePO₄ Cell / M. Safari, C. Delacourt // J. Electrochem. Soc.. — 2011. — № 158 (10). — C.1123-1135.

14. J. Groot, State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Ageing Models, Doctoral Thesis at the Graduate School in Energy and Environment, Chalmers University of Technology, (2014).

15. Xiaogang W. Effect of charge rate on capacity degradation of LiFePO₄ power battery at low temperature / W. Xiaogang, W. Wenbo, D. Jiuyu // Int J Energy Res. — 2019. — № 44 (3). — C.1-14.

16. Щуров, Н. И. Методы и средства экономии и повышения эффективности использования энергии в системе городского электрического транспорта : дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук : 05.09.03 / Н. И. Щуров. — Новосибирск, 2003. — 385 с. : ил., табл.

17. Сопов, В. И. Энергосберегающие мероприятия при эксплуатации трамваев и троллейбусов / В. И. Сопов, Ю. А. Прокушев, А. А. Штанг; под. ред. В. Н. Аносова. — Автоматизированные электромеханические системы. Коллективная монография. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. — С. 253 – 263.

18. Штанг, А. А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии : дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 05.09.03 / А. А. Штанг. — Новосибирск, 2006. — 233 с. : ил., табл.

19. Спиридонов, Е. А. Повышение эффективности использования энергии в электротранспортных комплексах с накопительными устройствами : дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 05.09.03 / Е. А. Спиридонов. – Новосибирск, 2009. 123 – 165 с. : ил., табл.

20. Ярославцев, М. В. Определение потерь в тяговом приводе автономного транспортного средства с комбинированной энергетической установкой методом имитационного моделирования / М. В. Ярославцев ; науч. рук. В. Н. Аносов // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 1–5 дек. 2015 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 5. – С. 174-175.

21. Garche J. Battery management systems (BMS) for increasing battery life time / J. Garche, A. Jossen // TELESCON 2000. Third International Telecommunications Energy Special Conference (IEEE Cat. No.00EX424) / Germany. — Dresden, 2000. — С.85-88.

22. Gabbar H.A. Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards / H.A. Gabbar, A.M. Othman // Technologies. — 2021. — № 9 (28). — С.1-23.

23. Mueller K. Optimizing BMS Operating Strategy Based on Precise SOH Determination of Lithium Ion Battery Cells / K. Mueller, D. Tittel, L. Graube // Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress / China. — Beijing, 2012. — С.807-819.

24. Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles / H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, M.Y. Chow // IEEE Industrial Electronics Magazine. — 2013. — № 7 (2). — С.4-16.

25. Kumar B. FPGA-based design of advanced BMS implementing SoC/SoH estimators / B. Kumar, N. Khare, P. Chaturvedi // Microelectronics Reliability. — 2018. — № 84. — С.66-74.

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

27. Федеральный закон от 23.10.2009 N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты российской федерации"

28. Gelman V. Braking energy recuperation / V. Gelman // IEEE Vehicular Technology Magazine. — 2009. — № 4 (3). — С.82-89.

29. Spichartz P. Measurement of braking energy recuperation in electric vehicles / P. Spichartz, C. Sourkounis // 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE) / France. — Lille, 2013. — С.1-9.

30. Bhurse, S.S., & Bhole, A.A. (2018). A Review of Regenerative Braking in Electric Vehicles. 2018 International conference on computation of power, energy, information and communication (ICCPEIC), (363-367). Chennai

31. Shtang, A.A., Yaroslavtsev, M.V., & Dedov, S.I. (2019). Comparison of Energy Consumption of Different Types of Passenger Public Transport in Russian Operational Conditions. 2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), (705-710). Erlagol

32. Yaroslavtsev M.V. Automated calculation of economic feasibility of using various types of passenger public transport in Russian conditions / M.V. Yaroslavtsev, A.A. Shtang // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — № 1333. — С.1-6.

33. Исследование влияния стохастической нагрузки на параметры литиевых аккумуляторов в транспортном комплексе [Текст]: отчет о НИР - Рег. Ном. АААА-А20-120040990017-1

34. Peterson S.B. Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization / S.B. Peterson, J. Apt, J.F. Whitacre // Journal of Power Sources. — 2010. — № 195 (8). — С.2385-2392.

35. Carrilero, I., Ansean, D., Viera, J.C., & Fernandez, Y. (2018). Impact of Fast-Charging and Regenerative Braking in LiFePO₄ Batteries for Electric Bus Applications. 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), (1-6). Belfort

36. ГОСТ Р 26262-1-2020. Дорожные транспортные средства. функциональная безопасность. М., 2020. I, 36 с.

37. ГОСТ Р ИСО 11898-1-2015. Местная контроллерная сеть (CAN). канальный уровень и передача сигналов. М., 2015. I, 42 с.
38. ГОСТ Р ИСО 11898-2-2015. Местная контроллерная сеть (CAN). Устройство доступа к высокоскоростной среде. М., 2015. II, 35 с.
39. ГОСТ Р 58123-2018. Интерфейс связи автомобиль - электрическая сеть. Требования к протоколу сетевого и прикладного уровней. М., 2019. II, 38 с.
40. Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles 2021-2031, IDTECHEX RESEARCH [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.idtechex.com/en/research-report/lithium-ion-batteries-for-electric-vehicles-2021-2031/814> – загл. с экрана (Дата обращения: 18.03.2022)
41. Battery Pack Prices, BloombergNEF [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/> – загл. с экрана (Дата обращения: 10.03.2022)
42. Lithium-ion Batteries Outlook to 2030, 5th Edition, Roskill [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://roskill.com/division/battery-ev-materials/> – загл. с экрана (Дата обращения: 8.04.2022)
43. Electric Vehicle Outlook 2021, BloombergNEF [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://about.newenergyfinance.com/electric-vehicle-outlook/> – загл. с экрана (Дата обращения: 10.04.2022)
44. Dudley G. Mars Express Lithium Ion batteries performance analysis / G. Dudley, R. Blake, L. Lucas // 11th European Space Power Conference / Greece. — Porto Palace Thessaloniki, 2017. — С.1-7.
45. Canals C.L. The effect of building energy management systems on Battery Aging / C.L. Canals // E3S Web of Conferences / Spain. — Barcelona, 2018. — С.1-6.
46. Li-ion battery materials: present and future / N. Nitta, F. Wu, T. Jung, G. Yushin // Materials Today. — 2015. — № 18 (5). — С.252-264.
47. Lu L. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles / L. Lu, X. Han, J. Li // Journal of Power Sources. — 2013. — № 226. — С.272-288.

48. Scrosati B. Lithium batteries: Status, prospects and future / B. Scrosati, J. Garche // *Journal of Power Sources*. — 2010. — № 195. — C.2419-2430.
49. Yi a T. Recent development and application of $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ as anode material of lithium ion battery / T. Yi a, L. Jiang, C. Yue // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. — 2010. — № 71. — C.1236-1242.
50. Wang A. Review on modeling of the anode solid electrolyte interphase (SEI) for lithium-ion batteries / A. Wang, S. Kadam, S. Shi // *npj computational materials*. — 2018. — № 15. — C.1-26.
51. Endo M Recent development of carbon materials for Li ion batteries / M. Endo, C. Kim, K. Nishimura // *Carbon*. — 1999. — № 38. — C.183-197.
52. Verma P. A review of the features and analyses of the solid electrolyte interphase in Li-ion batteries / P. Verma, P. Maire, P. Novák // *Electrochimica Acta*. — 2010. — № 55. — C.6332-6341.
53. Aurbach D. Review of selected electrode–solution interactions which determine the performance of Li and Li ion batteries / D. Aurbach // *Journal of Power Sources*. — 2000. — № 89. — C.209-218.
54. Aurbach D. A short review of failure mechanisms of lithium metal and lithiated graphite anodes in liquid electrolyte solutions / D. Aurbach, E. Zinigrad, Y. Cohen // *Solid State Ionics*. — 2002. — № 148. — C.1-12.
55. Pankaj A. Capacity Fade Mechanisms and Side Reactions in Lithium-Ion Batteries / A. Pankaj, W. Ralph E., D. Marc // *Journal of The Electrochemical Society*. — 1998. — № 145. — C.1-21.
56. Vetter J. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries / J. Vetter, P. Novak, M. Wohlfahrt-Mehrens // *Journal of Power Sources*. — 2005. — № 147. — C.269-281.
57. Na L. Understanding the crack formation of graphite particles in cycled commercial lithium-ion batteries by focused ion beam - scanning electron microscopy / L. Na, W. Zhihui, Z. Hui // *Journal of Power Sources*. — 2017. — № 365. — C.235-239.
58. Maxim Koltypin M. The study of lithium insertion–deinsertion processes into composite graphite electrodes by in situ atomic force microscopy (AFM) / M. Maxim

Koltypin, B. Boris Markovsky, Y. Yair Cohen // *Electrochemistry Communications*. — 2002. — № 4. — C.17-23.

59. Christensen J. Effect of anode film resistance on the charge/discharge capacity of a lithium-ion battery / J. Christensen, J. Newman // *Journal of the Electrochemical Society*. — 2003. — № 150. — C.1416-1420.

60. Deshpande R. Battery Cycle Life Prediction with Coupled Chemical Degradation and Fatigue Mechanics / R. Deshpande, M. Verbrugge, J. Wang // *The Electrochemical Society*. — 2012. — № 159. — C.1-2.

61. Seong J. The state of understanding of the lithium-ion-battery graphite solid electrolyte interphase (SEI) and its relationship to formation cycling / J. Seong , D. Claus , M. Debasish // *Carbon*. — 2016. — № 105. — C.52-76.

62. Zhe L Z. A review of lithium deposition in lithium-ion and lithium metal secondary batteries / Z. Zhe L, J. Jun Huang, V. Viktor Metzler // *Journal of Power Sources*. — 2014. — № 254. — C.168-182.

63. Roger D. P. Controls oriented reduced order modeling of lithium deposition on overcharge / P. Roger D., R. Alfred V., Z. Xiangchun // *Journal of Power Sources*. — 2021. — № 209. — C.318-325.

64. Wang Y. Olivine LiFePO₄: development and future / Y. Wang, P. He, H. Zhou // *Energy & Environmental Science*. — 2011. — № 3. — C.805-817.

65. Zaghbi K. Safe and fast-charging Li-ion battery with long shelf life for power applications / K. Zaghbi, M. Dontigny, I. Rodrigues // *Journal of Power Sources*. — 2011. — № 196. — C.3949-3954.

66. Bach T. Nonlinear aging of cylindrical lithium-ion cells linked to heterogeneous compression / T. Bach, S. Schuster, E. Fleder // *Journal of Energy Storage*. — 2016. — № 5. — C.1-12.

67. Xiao-Guang Y. Modeling of lithium plating induced aging of lithium-ion batteries: Transition from linear to nonlinear aging / Y. Xiao-Guang, L. Yongjun , Z. Guangsheng // *Journal of Power Sources*. — 2017. — C.28-40.

68. Joonam P. Semi-empirical long-term cycle life model coupled with an electrolyte depletion function for large-format graphite/LiFePO₄ lithium-ion batteries /

P. Joonam, A. Williams, B. Seungwoo // *Journal of Power Sources*. — 2017. — № 365. — C.1-9.

69. Ming Tan C. Hierarchical degradation processes in lithium-ion batteries during ageing / C. Ming Tan, F. Leng, Z. Wei // *Electrochimica Acta*. — 2017. — № 256. — C.1-11.

70. De Hoog J. Combined cycling and calendar capacity fade modeling of a Nickel-Manganese-Cobalt Oxide Cell with real-life profile validation / J. De Hoog, J. Timmermans, D. Ioan-Stroe // *Applied Energy*. — 2017. — № 200. — C.47-61.

71. Petit, M., Prada, E., & Sauvant-Moyno, V. (2016). Development of an empirical aging model for Li-ion batteries and application to assess the impact of Vehicle-to-Grid strategies on battery lifetime. *Applied Energy*, 172, 398-407.

72. Improving optimal control of grid-connected lithium-ion batteries through more accurate battery and degradation modelling / J.M. Reniers, G. Mulder, S. Ober-Blöbaum, D. Howey // *Journal of Power Sources*. — 2018. — № 379. — C.91-102.

73. Schimpe M. Comprehensive Modeling of Temperature-Dependent Degradation Mechanisms in Lithium Iron Phosphate Batteries / M. Schimpe, M. Naumann, H.C. Hesse // *Journal of The Electrochemical Society*. — 2018. — № 165 (2). — C.181-193.

74. Smith, K., Saxon, A., & Keyser, M. (2017). Life prediction model for grid-connected Li-ion battery energy storage system. 2017 American Control Conference (ACC), (4062-4068). Seattle

75. Barré, A.M., Deguilhem, B., & Grolleau, S. (2013). A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 241, 680-689.

76. Su C. A review on prognostics approaches for remaining useful life of lithium-ion battery / C. Su, H.J. Chen // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2017. — № 93. — C.1-8.

77. Определение уровня заряда литий-ионного аккумулятора на основе алгоритма расширенного фильтра Калмана = State-of-Charge Estimation of Lithium-Ion Battery Based on Extended Kalman Filter Algorithm / У. Сяоган, Сюефэн Ли, Н.

И. Щуров, А. А. Штанг, М. В. Ярославцев, С. Дедов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. - 2020. – Т. 13, № 4. – С. 420–437.

78. Goebel K. Prognostics in Battery Health Management / K. Goebel , B. Saha, A. Saxena // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. — 2008. — № 11 (4). — С.33-40.

79. Hussein A.A. Capacity Fade Estimation in Electric Vehicle Li-Ion Batteries Using Artificial Neural Networks / A.A. Hussein // IEEE Transactions on Industry Applications. . — 2015. — № 51 (3). — С.2321-2330.

80. Health diagnosis and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries using data driven methods / A. Nuhic, T. Terzimehic, T. Soczka-Guth, M. Buchholz // J. Power Sources. — 2013. — № 239. — С.680-688.

81. Zhang J. A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery / J. Zhang, J. Lee // J. Power Sources. — 2011. — № 196 (15). — С.6007-6014.

82. Thomas W. Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries – A Post-Mortem study / W. Thomas, W. Marcel, K. Michael // Journal of Power Sources. — 2014. — № 262. — С.129-135.

83. Hausbrand R. Fundamental degradation mechanisms of layered oxide Li-ion battery cathode materials: Methodology, insights and novel approaches / R. Hausbrand, G. Cherkashinin, H. Ehrenberg // Materials Science and Engineering: B. — 2015. — № 192. — С.1-23.

84. Dongsheng R. An electrochemical-thermal coupled overcharge-to-thermal-runaway model for lithium ion battery / R. Dongsheng, F. Xuning, L. Languang // Journal of Power Sources. — 2017. — № 364. — С.328-340.

85. Rui G. Mechanism of the entire overdischarge process and overdischarge-induced internal short circuit in lithium-ion batteries / G. Rui, O. Minggao, F. Xuning // Scientific Reports. — 2016. — С.1-9.

86. M. Schimpe S. Comprehensive Modeling of Temperature-Dependent Degradation Mechanisms in Lithium Iron Phosphate Batteries / S. M. Schimpe, V. M. E. , N. M. // Journal of The Electrochemical Society. — 2017. — С.1-24.

87. ГОСТ Р ИСО 12405-4-2019. Требования к испытаниям для литий-ионных тяговых батарей и систем. Испытания для оценки рабочих характеристик. М., 2019. II, 31 с.

88. Baure G. Synthetic vs. Real Driving Cycles: A Comparison of Electric Vehicle Battery Degradation / G. Baure, M. Dubarry // *Batteries*. — 2019. — № 5 (2). — С.1-15.

89. Panchal, S., Mcgrory, J., & Kong, J. (2017). Cycling degradation testing and analysis of a LiFePO₄ battery at actual conditions. *International Journal of Energy Research*, 41, 1-11.

90. Chacko S. Thermal modelling of Li-ion polymer battery for electric vehicle drive cycles / S. Chacko, Y. Chung // *Journal of Power Sources*. — 2012. — № 213 (1). — С.296-303.

91. Lawder, M.T., Northrop, P.W., & Subramanian, V.R. (2014). Model-Based SEI Layer Growth and Capacity Fade Analysis for EV and PHEV Batteries and Drive Cycles. *Journal of The Electrochemical Society*, 161, 2098-2108.

92. Dedov S. Calculation of Hybrid Bus Power Demands by Standard Driving Cycles / S. Dedov, M. Yaroslavtsev, X. Wu // 19th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2018. — Harbin, China, 2018. — С.1-4.

93. Jafari M. Simulation and Analysis of the Effect of Real-World Driving Styles in an EV Battery Performance and Aging / M. Jafari, A. Gauchia, K. Zhang // *IEEE transactions on transportation electrification*. — 2015. — № 1 (4). — С.391-401.

94. Aging of high power Li-ion cells during real use of electric vehicles / N. Rizoug, S. Redha, T. Mesbah, P. Bartholomeus // *IET Electrical Systems in Transportation*. — 2017. — № 7 (1). — С.14-22.

95. Theophile, P., Tedjani, M., & Sylvain, S. (2019). Study and Influence of Standardized Driving Cycles on the Sizing of Li-Ion Battery / Supercapacitor Hybrid Energy Storage. 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), (1-6). Hanoi, Vietnam.

96. Dirk Uwe, S. (2011). Dynamic electric behavior and open-circuit-voltage modeling of LiFePO₄-based lithium ion secondary batteries. RWTH Aachen University, Electrochemical Energy Conversion and Storage Systems Group, Institute for Power, Electronics and Electrical Drives (ISEA), (1-6). Aachen, Germany.

97. Ronan G. Characterization Method for Electrothermal Model of Li-Ion Large Cells / G. Ronan // 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). — Belfort, France, 2017. — C.1-6.

98. Mattin, L. (2020). Data-Driven Nonparametric Li-Ion Battery Ageing Model Aiming At Learning From Real Operation Data: Holistic Validation With Ev Driving Profiles. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), (1-8). Detroit, MI, USA.

99. Md Sazzad H. Twin-model framework development for a comprehensive battery lifetime prediction validated with a realistic driving profile / H. Md Sazzad // Energy Science & Engineering. — 2021. — № 9 (11). — C.1-11.

100. Gillespie, T.D. (1992). Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers.

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

102. Щуров Н.И. Анализ влияния режимов движения электромобилей на процесс старения тяговых аккумуляторов на основе цикла WLTC / Н.И. Щуров, А.А. Штанг, С.И. Дедов // Журнал сибирского федерального университета. серия: техника и технологии. — 2020. — № 13 (8). — С.977-990.

103. Abramov E.Y. Laboratory facility development for studying the heavy charge and discharge modes effect on the degradation of lithium-ion batteries / E.Y. Abramov, S.I. Dedov // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — № 2032. — C.1-7.

104. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2022614086. Российская Федерация. Программа управления устройством для определения электрических параметров и срока службы аккумуляторов / Н.И. Щуров, М.В.

Ярославцев, Е.Ю. Абрамов, А.А. Штанг, С. Дедов, Е.А. Спиридонов; Правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». № 2022613353; заявл. 15.03.2022; опубл. 17.03.2017 – 1с.

105. ГОСТ Р ИСО 12405-1-2013. Требования к испытаниям для литий-ионных тяговых батарей и систем. Высокомощные применения. М., 2013. I, 36 с.

106. Средний пробег автомобилей в России, Аналитическое агентство Автостат [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.autostat.ru/news/39841/> – загл. с экрана. (Дата обращения: 25.04.2022)

107. Архивы и статистика погоды по городам России [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://climate-energy.ru/weather/archive_weather_296340.php – загл. с экрана. (Дата обращения: 26.04.2022)

108. Hu, Z., Li, X., & Zhao, X. Numerical analysis of factors affecting the range of heat transfer in earth surrounding three subways / Hu, Z., Li, X., & Zhao, X. // Journal of China University of Mining and Technology. — 2008. — №18. — P.67-71.

109. High-power type cells SCiB, [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product/cell/high-power.html> – загл. с экрана. (Дата обращения: 23.03.2022)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты тестирования литий-железо-фосфатных ячеек на специализированном исследовательском стенде

Таблица А.1 – Результаты измерений емкости ячеек в опыте 1-20-05-5

ячейка №1				ячейка №2				ячейка №3			
Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$
20.11.2021	0	1640,00	0,00	20.11.2021	0,00	1640,00	0,00	20.11.2021	0,0	1640,00	0,00
27.11.2021	7,31	1639,00	0,06	27.11.2021	7,47	1599,35	2,48	27.11.2021	7,8	1638,90	0,07
04.12.2021	14,87	1603,08	2,25	05.12.2021	15,21	1573,08	4,08	05.12.2021	15,9	1636,26	0,23
12.12.2021	22,38	1583,52	3,44	13.12.2021	22,91	1581,01	3,60	13.12.2021	23,9	1613,56	1,61
19.12.2021	29,86	1597,22	2,61	20.12.2021	30,55	1551,52	5,40	21.12.2021	31,8	1611,06	1,76
23.12.2021	32,55	1591,84	2,94	24.12.2021	32,70	1552,51	5,33	23.12.2021	32,6	1615,30	1,51
31.12.2021	39,83	1528,03	6,83	31.12.2021	40,03	1538,88	6,17	31.12.2021	40,2	1606,82	2,02
07.01.2022	47,18	1563,72	4,65	07.01.2022	47,63	1544,08	5,85	08.01.2022	48,1	1588,36	3,15
14.01.2022	54,51	1539,76	6,11	15.01.2022	55,21	1534,91	6,41	16.01.2022	55,9	1599,84	2,45
22.01.2022	61,83	1519,71	7,33	30.01.2022	70,29	1523,02	7,13	31.01.2022	71,5	1575,14	3,95
29.01.2022	69,18	1497,47	8,69	07.02.2022	77,77	1513,10	7,74	08.02.2022	79,3	1562,67	4,72

Таблица А.2 – Результаты измерений емкости ячеек в опыте 1-20-3-5

ячейка №1				ячейка №2				ячейка №3			
Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$
20.11.2021	0,00	1640,00	0,00	20.11.2021	0,00	1640	0,00	20.11.2021	0,00	1640,00	0,00
05.12.2021	15,45	1631,25	0,53	06.12.2021	16,19	1637,355	0,16	08.12.2021	18,61	1635,99	0,24
18.12.2021	28,43	1601,73	2,33	19.12.2021	29,82	1635,239	0,29	23.12.2021	32,47	1627,49	0,76
24.12.2021	32,50	1591,62	2,95	23.12.2021	32,56	1599	2,50	08.01.2022	47,58	1616,40	1,44
05.01.2022	44,88	1594,63	2,77	05.01.2022	45,57	1607,994	1,95	23.01.2022	63,20	1588,32	3,15
18.01.2022	57,65	1576,31	3,88	19.01.2022	59,02	1595,561	2,71	08.02.2022	78,55	1600,36	2,42
30.01.2022	70,36	1555,27	5,17	01.02.2022	72,34	1592,652	2,89				

Таблица А.3 – Результаты измерений емкости ячеек в опыте 1-65-3-5

ячейка №1				ячейка №2				ячейка №3			
Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$
30.10.2021	0,00	1640,00	0,00	06.11.2021	0,00	1640,00	0,00	30.10.2021	0,00	1640	0,00
06.11.2021	6,88	1600,00	2,44	13.11.2021	6,92	1622,61	1,06	07.11.2021	7,16	1630,629	0,57
13.11.2021	13,83	1578,91	3,73	24.11.2021	7,74	1631,43	0,52	14.11.2021	14,38	1631,71	0,51
24.11.2021	14,60	1610,00	1,83	01.12.2021	14,23	1638,04	0,12	24.11.2021	14,59	1632,35	0,47
01.12.2021	21,06	1603,74	2,21	07.12.2021	20,95	1611,34	1,75	01.12.2021	21,56	1638,126	0,11
07.12.2021	27,76	1581,39	3,57	14.12.2021	27,65	1594,44	2,78	08.12.2021	28,60	1627,583	0,76
14.12.2021	34,45	1580,15	3,65	21.12.2021	34,34	1608,65	1,91	15.12.2021	35,61	1638,36	0,10
21.12.2021	41,12	1568,48	4,36	23.12.2021	35,61	1612,81	1,66	22.12.2021	42,62	1609,309	1,87
23.12.2021	42,61	1580,90	3,60	30.12.2021	42,01	1625,55	0,88	23.12.2021	42,66	1609	1,89
30.12.2021	48,98	1575,43	3,94	05.01.2022	48,64	1600,81	2,39	30.12.2021	49,35	1610,011	1,83

Таблица А.4 – Результаты измерений емкости ячеек в опыте 1-65-05-5

ячейка №1				ячейка №2				ячейка №3			
Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$
29.11.2021	0	1640,00	0,00	29.11.2021	0,00	1640,00	0,00	29.11.2021	0,00	1640,00	0,00
07.12.2021	7,067	1632,07	0,48	06.12.2021	6,66	1629,12	0,66	06.12.2021	6,68	1626,74	0,81
14.12.2021	14,05	1616,22	1,45	12.12.2021	13,28	1610,90	1,77	12.12.2021	13,32	1614,63	1,55
20.12.2021	20,98	1609,71	1,85	19.12.2021	19,87	1615,71	1,48	19.12.2021	19,93	1613,26	1,63
23.12.2021	22,73	1602,63	2,28	23.12.2021	23,16	1581,81	3,55	23.12.2021	23,17	1608,00	1,95
30.12.2021	29,30	1599,80	2,45	30.12.2021	29,46	1584,08	3,41	30.12.2021	29,45	1591,32	2,97
06.01.2022	36,11	1587,34	3,21	05.01.2022	35,99	1594,96	2,75	05.01.2022	36,04	1602,06	2,31
13.01.2022	42,89	1578,85	3,73	12.01.2022	42,48	1573,71	4,04	12.01.2022	42,63	1594,07	2,80
19.01.2022	49,72	1569,79	4,28	18.01.2022	48,97	1559,79	4,89	18.01.2022	49,18	1591,55	2,95
26.01.2022	56,66	1551,39	5,40	25.01.2022	55,46	1545,37	5,77	27.01.2022	57,62	1559,56	4,90
02.02.2022	63,52	1550,54	5,45	31.01.2022	61,92	1562,57	4,72	02.02.2022	64,07	1565,50	4,54
09.02.2022	70,36	1540,35	6,08	07.02.2022	68,38	1555,24	5,17	09.02.2022	70,51	1573,73	4,04

Таблица А.5 – Результаты измерений емкости ячеек в опыте 3-20-3-5

ячейка №1				ячейка №2				ячейка №3			
Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$
28.11.2021	0,00	1640,00	0,00	28.11.2021	0,00	1640,00	0,00	26.01.2022	0,00	1640,00	0,00
04.12.2021	5,81	1634,66	0,33	04.12.2021	5,61	1619,84	1,23	01.02.2022	5,38	1591,69	2,95
10.12.2021	11,56	1599,15	2,49	09.12.2021	11,19	1590,94	2,99	06.02.2022	10,93	1591,69	2,95
15.12.2021	17,24	1573,25	4,07	15.12.2021	16,74	1583,17	3,47	12.02.2022	16,41	1542,88	5,92
21.12.2021	22,83	1509,70	7,95	20.12.2021	22,22	1556,46	5,09	17.02.2022	21,85	1523,86	7,08
23.12.2021	24,00	1509,16	7,98	23.12.2021	24,20	1553,30	5,29	23.02.2022	27,27	1521,36	7,23
29.12.2021	29,19	1408,77	14,10	29.12.2021	29,39	1535,33	6,38	28.02.2022	32,65	1520,60	7,28
03.01.2022	34,27	1258,44	23,27	03.01.2022	34,74	1509,83	7,94	05.03.2022	38,01	1490,82	9,10
07.01.2022	39,02	1254,97	23,48	08.01.2022	40,02	1483,12	9,57	09.03.2022	41,96	1480,56	9,72
12.01.2022	43,66	1247,76	23,92	13.01.2022	45,21	1482,14	9,63	15.03.2022	47,61	1488,82	9,22
17.01.2022	48,52	1312,11	19,99	19.01.2022	50,36	1454,70	11,30				

Таблица А.6 – Результаты измерений емкости ячеек в опыте 3-20-05-5

ячейка №1				ячейка №2				ячейка №3			
Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$
24.11.2021	0,00	1640,00	0,00	24.11.2021	0,00	1640,00	0,00	24.11.2021	0,00	1640,00	0,00
29.11.2021	4,50	1615,99	1,46	29.11.2021	4,71	1599,88	2,45	29.11.2021	5,11	1585,86	3,30
03.12.2021	9,08	1605,42	2,11	04.12.2021	9,52	1569,21	4,32	04.12.2021	10,22	1548,60	5,57
08.12.2021	13,46	1505,05	8,23	08.12.2021	14,20	1522,25	7,18	09.12.2021	14,98	1438,05	12,31
12.12.2021	17,51	1360,02	17,07	13.12.2021	18,57	1356,13	17,31	14.12.2021	19,46	1367,55	16,61
15.12.2021	21,19	1242,61	24,23	17.12.2021	22,37	1133,13	30,91	18.12.2021	23,82	1312,65	19,96
19.12.2021	24,68	1224,60	25,33	20.12.2021	25,65	988,48	39,73	23.12.2021	27,99	1264,06	22,92
22.12.2021	27,94	1224,60	25,33	23.12.2021	27,92	1139,51	30,52	28.12.2021	32,60	1293,01	21,16
23.12.2021	27,95	1264,22	22,91	27.12.2021	31,31	1158,38	29,37	01.01.2022	36,93	1255,50	23,45
27.12.2021	31,35	1230,12	24,99	30.12.2021	34,86	1133,13	30,91	05.01.2022	41,11	1208,41	26,32
30.12.2021	34,86	1218,59	25,70	03.01.2022	38,32	1079,80	34,16	09.01.2022	45,16	1210,67	26,18
03.01.2022	38,38	1239,72	24,41	06.01.2022	41,76	1089,95	33,54	14.01.2022	49,19	1144,70	30,20
06.01.2022	41,89	1223,64	25,39	10.01.2022	45,09	1051,49	35,88	17.01.2022	53,04	1038,69	36,67
10.01.2022	45,35	1198,66	26,91	13.01.2022	48,21	992,02	39,51	21.01.2022	56,53	982,04	40,12

Таблица А.7 – Результаты измерений емкости ячеек в опыте 3-65-3-5

ячейка №1				ячейка №2				ячейка №3			
Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$
24.11.2021	0,00	1640,00	0,00	24.11.2021	0,00	1640,00	0,00	26.01.2022	0,00	1640,00	0,00
29.11.2021	4,53	1566,97	4,45	29.11.2021	4,29	1602,65	2,28	31.01.2022	5,01	1586,56	3,26
03.12.2021	9,01	1477,63	9,90	03.12.2021	8,62	1557,95	5,00	06.02.2022	10,13	1575,77	3,92
07.12.2021	12,94	1267,95	22,69	07.12.2021	12,55	1394,05	15,00	10.02.2022	14,89	1438,36	12,30
11.12.2021	16,38	1217,89	25,74	10.12.2021	15,87	1162,19	29,14	14.02.2022	19,09	1257,25	23,34
14.12.2021	19,71	1140,49	30,46	13.12.2021	18,69	980,33	40,22	18.02.2022	23,05	1154,58	29,60
17.12.2021	22,91	1075,04	34,45	15.12.2021	21,01	810,30	50,59	22.02.2022	26,83	1076,92	34,33
20.12.2021	25,98	1013,49	38,20	17.12.2021	23,11	809,90	50,62	26.02.2022	30,59	1077,98	34,27
28.12.2021	28,04	1265,20	22,85	20.12.2021	25,37	906,24	44,74	02.03.2022	34,41	1132,73	30,93
01.01.2022	31,32	1059,88	35,37	28.12.2021	27,98	1062,99	35,18				
04.01.2022	34,38	1015,33	38,09	01.01.2022	31,39	1137,69	30,63				
07.01.2022	37,44	1064,01	35,12	04.01.2022	34,32	1033,39	36,99				
10.01.2022	40,62	1071,82	34,65	07.01.2022	37,17	1028,50	37,29				
13.01.2022	43,67	984,32	39,98	09.01.2022	40,01	1011,35	38,33				
16.01.2022	46,53	933,11	43,10	12.01.2022	42,79	983,18	40,05				

Таблица А.8 – Результаты измерений емкости ячеек в опыте 3-65-05-5

ячейка №1				ячейка №2				ячейка №3			
Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$	Дата	<i>T, сут</i>	<i>Q, мА·ч</i>	$\Delta Q, \%$
24.11.2021	0,00	1640,00	0,00	24.11.2021	0,00	1640,00	0,00	26.01.2022	0,00	1640,00	0,00
30.11.2021	5,45	1604,52	2,16	29.11.2021	5,11	1585,86	3,30	31.01.2022	5,06	1623,64	1,00
05.12.2021	10,70	1549,86	5,50	04.12.2021	10,22	1548,60	5,57	06.02.2022	10,22	1605,70	2,09
10.12.2021	15,98	1505,22	8,22	09.12.2021	14,98	1438,05	12,31	11.02.2022	15,21	1575,62	3,93
15.12.2021	21,21	1441,40	12,11	14.12.2021	19,46	1367,55	16,61	15.02.2022	20,09	1544,23	5,84
20.12.2021	26,25	1365,86	16,72	18.12.2021	23,82	1312,65	19,96	20.02.2022	24,88	1494,63	8,86
23.12.2021	28,05	1431,39	12,72	23.12.2021	27,99	1264,06	22,92	25.02.2022	29,61	1454,52	11,31
28.12.2021	32,40	1355,27	17,36	28.12.2021	32,60	1293,01	21,16	02.03.2022	34,12	1400,44	14,61
01.01.2022	36,99	1367,00	16,65	01.01.2022	36,93	1255,50	23,45	06.03.2022	38,53	1375,37	16,14
06.01.2022	41,56	1361,85	16,96	05.01.2022	41,11	1208,41	26,32				
10.01.2022	46,12	1346,11	17,92	09.01.2022	45,16	1210,67	26,18				
15.01.2022	50,62	1306,33	20,35	14.01.2022	49,19	1144,70	30,20				
19.01.2022	55,02	1267,99	22,68	17.01.2022	53,04	1038,69	36,67				

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт и справка о внедрении результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе НГТУ
д-р техн. наук, доцент

 С.В. Брованов



 2022г.

СПРАВКА


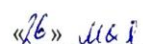
Об использовании в учебном процессе результатов диссертационной работы
Дедова С.И.

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой электротехнических комплексов, д.т.н. профессор Н.И. Щуров и декан факультета мехатроники и автоматизации, к.т.н. доцент М.Е. Вильбергер составили настоящую справку о том, что научные результаты диссертационной работы С.И. Дедова на тему «Повышение энергоэффективности силовой гибридной установки автономного транспортного средства» внедрены в учебный процесс и используются в курсе «Накопители энергии в электротранспортном комплексе» для магистрантов направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» по магистерской программе «Повышение энергоэффективности систем электрического транспорта».

Заведующий кафедрой
электротехнических
комплексов, д-р. техн. наук,
профессор


_____ Н.И. Щуров
«16»  2022г.

Декан факультета мехатроники
и автоматизации, канд. техн.
наук, доцент


_____ М.Е. Вильбергер
«16»  2022г.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022614086

**Программа управления устройством для определения
электрических параметров и срока службы
аккумуляторов**

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

Авторы: **Щуров Николай Иванович (RU), Ярославцев Михаил
Викторович (RU), Абрамов Евгений Юрьевич (RU), Штанг
Александр Александрович (RU), Дедов Сергей (KZ), Спиридонов
Егор Александрович (RU)**

Заявка № 2022613353

Дата поступления 15 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 марта 2022 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077614e41f0a94edbd24145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов