

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Дедова Сергея Игоревича «Повышение энергоэффективности силовой гибридной установки автономного транспортного средства»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **05.09.03 -Электротехнические комплексы и системы**

### **Актуальность работы**

В связи с переходом на экологические виды транспорта, на современном этапе развития установился тренд, направленный на увеличение производимых электротранспортных средств. В качестве накопителя энергии, входящего в состав тягового электропривода, как правило, применяются литий-ионные аккумуляторы, подверженные уменьшению номинальной емкости со скоростью, определяемой множеством факторов: величина токов заряда-разряда, цикличность нагрузки, глубина разряда, температурные режимы работы и хранения, уровень заряда при хранении и т.д. В отличие от стационарных систем, деградационные процессы в литий-ионных аккумуляторах, применяемых в динамических системах, таких как электротранспорт, исследованы недостаточно. В этой связи рецензируемая диссертационная работа, направленная на повышение эффективности использования энергоресурса тяговых литий-ионных аккумуляторных батарей электромобиля, является актуальной. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений. Работа изложена на 121 страницах машинописного текста, список литературы содержит 109 наименований.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы научные положения, их новизна и практическая значимость.

В первой главе приведены результаты анализа факторов и механизмов, вызывающих уменьшение емкости литий-ионных аккумуляторов в составе тягового привода электротранспортного средства. Отмечена необходимость более детального изучения деградационных процессов в системах с динамической нагрузкой, изменяющейся по величине в режимах разряда и подзаряда.

Во второй главе выполнена обработка стандартизированных ездовых циклов с позиций реализуемой динамики транспортного средства и удельных затрат энергии на перемещения, по результатам которой выбран Всемирный согласованный цикл испытаний легковых автомобилей (WLTC). Выполнен расчет токовых диаграмм, возникающих при движении согласно выбранному циклу в ячейке типового аккумулятора электромобиля разной энергоемкости.

Третья глава посвящена разработке и созданию специализированного исследовательского комплекса и программы управления для ЭВМ для проведения ресурсных испытаний аккумуляторных ячеек типоразмера 18650.

Приведены результаты проведения полного факторного эксперимента, направленного на исследование влияния величины зарядного и разрядного токов, длительности режима разряда и общего времени в работе на деградацию литий-ионного аккумулятора. По полученным данным сформировано уравнение регрессии. Выявлено, что наибольшее влияние на уменьшение емкости литий-ионного аккумулятора оказывают длительность и величина разрядного тока.

В четвертой главе разработана имитационная модель тягового привода электромобиля с типовой и гибридной накопительной установкой, позволяющей формировать токовую нагрузку на аккумулятор в зависимости от заданного ездового цикла и параметров электротранспортного средства. Полученные результаты имитационного математического моделирования подтверждают эффективность применения гибридной накопительной установки, включающей в себя буферный накопитель энергии высокой мощности, принимающий энергию при рекуперативном торможении и отдающий ее при пиковых нагрузках.

В результате сравнения результатов моделирования продолжительной эксплуатации ЛИА установлено, что при движении согласно циклу WLTC применение гибридной накопительной установки повышает срок службы на 26%, что говорит о высокой эффективности предложенного схемотехнического решения.

В заключении представлены основные результаты исследований в диссертационной работе.

**Научная новизна** темы диссертационного исследования

К наиболее значимым научным результатам диссертационной работы соискателя можно отнести:

1. По результатам обработки стандартизированных ездовых циклов определен режим, наиболее полно учитывающий особенности реального процесса движения. Проведен анализ выбранного цикла с позиций токов, возникающий в одиночной ячейке блока накопителей электромобиля различной энергоемкости.

2. В результате проведения полного факторного эксперимента на разработанном специализированном исследовательском комплексе и обработки полученного массива данных сформировано уравнение регрессии, связывающее величину уменьшения емкости литий-ионного аккумулятора с такими факторами, как величина тока заряда и разряда, длительность режима разряда и общее время нахождения в работе.

3. 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, которая показала возможность увеличения ресурса литий-ионного аккумулятора на 26%.

#### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки**

1. Создан специализированный исследовательский комплекс и программа управления для ЭВМ, позволяющие проводить ресурсные испытания одновременно до 30 ячеек с возможностью регистрации изменения основных эксплуатационных параметров.

2. Получено уравнение регрессии, позволяющее по четырем критериям прогнозировать срок службы и определить ресурсосберегающие режимы работы литий-ионного аккумулятора.

3. Разработаны рекомендации по повышению ресурса и регулированию режимов работы литий-ионных аккумуляторов в составе тягового привода электромобиля, позволяющие увеличить срок службы без снижения динамических свойств транспортного средства.

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

5. Результаты диссертации могут быть использованы для усовершенствования системы управления батареями, учитывающей данные, полученные в результате тестирования литиевых ячеек, с целью регулирования токовых нагрузок.

#### **Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы**

Обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы соискателя подтверждается применением классических методов электротехники, корректностью принятых допущений, согласованностью результатов математического имитационного моделирования и физического эксперимента.

Для оценки достоверности выводов диссертации автором использованы методы имитационного математического моделирования, физического эксперимента с достаточным количеством дублированных опытов и их корректной интерпретации.

## Реализация результатов диссертационного исследования

На основе результатов научно-исследовательской работы создан специализированный исследовательский стенд для тестирования аккумуляторов, на котором по заказу компании ООО «Новосибирский завод конденсаторов» проводятся ресурсные испытания опытной партии литий-никель-марганец-кобальт-оксидных (Li-NMC) аккумуляторов 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 «ЯРОСТАН-МАШ», 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».

Результаты работы достаточно полно отражены в 12 публикациях, в том числе в 3 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК, 7 статьях в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus и/или Web of Science, а также в свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Содержание автореферата в достаточной степени отражает содержание диссертационной работы.

### Замечания по диссертационной работе

1. В пункте 3 выводов по первой главе (стр. 36) автор делает заключение, что *«...существует тренд, направленный на увеличение ЭТС с БН на базе LFP...»*, однако на рисунке 1.3 показано, что доля рынка ЛИА на базе LFP в 2020 г. составляет менее 20%, а положительный тренд значительно меньше представленных NMC и NCA аккумуляторов. Кроме этого, утверждение, что LFP аккумулятор *«...обладает характеристиками, подходящими для применения в ЭТС...»* является недостаточным обоснованием для проведения исследования.

2. При анализе изменения параметров литиевых ячеек (стр. 70) в процессе тестирования при различных токовых нагрузках не анализируются влияние изменения внутреннего сопротивления и изменения КПД литиевых ячеек, что является важным техническим показателем при исследовании методов повышения энергоэффективности тягового привода с электрохимическим накопителем.

3. На стр. 95 автором делается вывод об эффективности предложенного решения на основе сравнения результатов моделирования нагрузки согласно полному циклу WLTC, что некорректно, т.к., во-первых, ездовой цикл разбит на фазы для имитации конкретных условий поездки, и следовало бы проводить моделирование для каждой из них отдельно для определения режима, в котором гибридная установка дает наилучший эффект, и во-вторых, для проверки

эффективности не применялись другие ездовые циклы (японский JC-08, китайский CLTC, американский FTP-75 и др.), обладающие иной динамикой движения.

4. В работе недостаточно обоснована принятая емкость буферного накопителя, также нет информации о возможном её изменении при изменении энергоёмкости основного источника энергии и о соотношении выбранных параметров накопительной установки с массогабаритными показателями транспортного средства.

5. На стр. 93 приведены основные зависимости, согласно которым формируются ограничения по току основного накопителя энергии, однако, во-первых, не даны пояснения, как они были получены автором, во-вторых, не приведено описание практической реализации предложенного принципа распределения токовой нагрузки между источниками энергии.

#### **Общее заключение по диссертации**

Отмеченные недостатки не изменяют общей положительной оценки диссертации, которая обобщает достигнутые результаты научной и практической деятельности автора и представляет собой комплексное завершённое исследование, выполненное автором самостоятельно.

Диссертация может квалифицироваться как содержащая новое решение задачи, имеющей существенное значение для повышения энергетической эффективности силовых установок автономных электротранспортных средств.

Считаю, что диссертационная работа С.И. Дедова по своей актуальности, новизне, научной и практической значимости результатов соответствует требованиям Положения ВАК РФ (п. 9-14) в части, касающейся кандидатских диссертаций, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика»,  
Политехнического института ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный  
университет» д-р техн. наук, профессор  Пантелеев Василий Иванович

15.08.2022

Подпись Пантелеева  
и.о. проректора по на

Мезит А.Э.

*Отзыв получен 23.08.2022 ММ / Дедов С.И.*  
Адрес: 660074, г. Красноярск, ул. акад. Киренского, 26

Телефон: 8 (391) 2912063, e-mail: vpanteleev@sfu-kras.ru

*С отзывом ознакомлен 24.08.2022 [подпись] / Дедов С.И.*