

КАРЛАКОВ ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ОТ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
СЕЛЬСКИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Специальность: 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и
энергоснабжение агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Научный руководитель	Белов Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И. А. Будзко ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева
Официальные оппоненты	Даус Юлия Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина» Жилин Евгений Витальевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергетики и энергоэффективности горной промышленности ФГАОУ ВО НИТУ МИСИС
Ведущая организация	ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет»

Защита состоится «17» декабря 2026 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Бесперебойное электроснабжение сельских потребителей и объектов агропромышленного комплекса является важной стратегической задачей, от выполнения которой зависит не только качество выпускаемой продукции, но и продовольственная безопасность страны. Кроме того, существенное влияние на производство сельскохозяйственной продукции оказывает наблюдающийся в последние годы рост тарифов на электроэнергию.

Возможным решением, способным повысить энергоэффективность и надёжность электроснабжения сельских потребителей, а также снизить финансовые затраты на электроэнергию является применение возобновляемых источников энергии. Наиболее распространёнными и доступными для широкого применения среди таких источников в настоящее время являются фотоэлектрические и ветроэнергетические установки. Однако, несмотря на преимущества в виде длительного срока службы, удобства эксплуатации и снижения негативного воздействия на окружающую среду, выработка этих установок часто меняется ввиду непостоянства величин солнечного излучения и скорости ветра, что существенно снижает их эффективность.

С целью повышения эффективности применения возобновляемых источников энергии для электроснабжения сельских потребителей предлагается использовать аккумуляторные батареи, необходимые для промежуточного накопления энергии в периоды, когда выработка превышает совокупную потребляемую мощность и последующего использования накопленной энергии в периоды, когда выработка не может покрыть спрос на электроэнергию.

На сегодняшний день широкое распространение получили литий-ионные аккумуляторы, активно используемые в электротранспорте, однако, высокая стоимость аккумуляторов данного типа препятствует их применению для накопления энергии от возобновляемых источников. Возможным решением для снижения затрат в системах электроснабжения сельских потребителей с возобновляемыми источниками энергии может служить вторичное применение литий-ионных аккумуляторов электромобилей, списанных в связи со снижением ёмкости. Так, к 2025 году по всему миру было списано около 3,4 миллиона батарей электромобилей. В свою очередь, оптимизация диапазонов рабочих напряжений вторично используемых литий-ионных аккумуляторов может снизить деградацию их энергоёмкости в процессе эксплуатации, а также повысить эффективность накопления энергии благодаря повышению коэффициента полезного действия (КПД) цикла «заряд-разряд».

Таким образом, повышение эффективности аккумулялирования энергии за счёт совершенствования систем хранения энергии и режимов их работы, а также снижение стоимости хранения энергии и повышение надёжности электроснабжения сельских потребителей являются актуальными вопросами современной электроэнергетики.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам применения возобновляемых источников энергии посвящены научные работы российских и зарубежных учёных. Значимый вклад в развитие данной области знаний внесли

П.П. Безруких, С.И. Белов, О.В. Лештаев, Ю.В. Даус, И.В. Юдаев, О.В. Григораш, Г.В. Никитенко, Ф.Р. Исмагилов, Дж. Лакап и многие другие.

В работах Е.В. Жилина, Т.Л. Куловой, А.И. Русина, В.П. Степаненко, А.Н. Киндряшова рассмотрено применение накопителей энергии, в том числе совместно с возобновляемыми источниками энергии.

Изучением химических источников тока занимались О.А. Лебедев, А.Ш. Алиев, Г.П. Сметанкин, Д.А. Хрусталёв, А.А. Таганова, С.Б. Орлов, Е.В. Иноземцева, А.М. Скундин и ряд других учёных.

Режимы эксплуатации, характеристики, перспективы применения и увеличение срока службы литий-ионных аккумуляторов освещены в работах Х.Х. Альвиева, Р.Р. Фатыхова, С.М. Хантимерова, Н.М. Сулейманова, А.В. Садовникова, И.А. Кедринского.

Анализ научных работ показал, что ещё недостаточно изучено влияние диапазонов рабочих напряжений литий-ионных аккумуляторов на КПД цикла «заряд-разряд» и изменение энергоёмкости при циклическом режиме эксплуатации. В свою очередь, изучение данных вопросов необходимо для повышения энергоэффективности и срока службы литий-ионных аккумуляторов.

Цель диссертационной работы: Выявление диапазона рабочих напряжений вторично используемых литий-ионных аккумуляторов, обеспечивающего повышение КПД цикла «заряд-разряд» и увеличение числа циклов до списания аккумуляторов для повышения эффективности накопления энергии от возобновляемых источников при электроснабжении сельских потребителей.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ текущего состояния сельских электрических сетей, систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии, существующих типов химических аккумуляторов и дать оценку возможности вторичного применения аккумуляторов электромобилей для накопления энергии от возобновляемых источников при электроснабжении сельских потребителей.

2. Выполнить теоретическое обоснование деградации литий-ионных аккумуляторов и дать оценку технического состояния вторично используемых аккумуляторных модулей электромобиля.

3. Провести исследования влияния диапазона рабочих напряжений на изменение энергоёмкости и величину КПД цикла «заряд-разряд» литий-ионных аккумуляторов при циклическом режиме эксплуатации;

4. Выполнить статистическую обработку полученных экспериментальных данных и разработать математические модели изменения энергоёмкости литий-ионных аккумуляторов при циклическом режиме эксплуатации и различных диапазонах рабочих напряжений;

5. Разработать технические и схемные решения по вторичному применению литий-ионных аккумуляторов в системах электроснабжения сельских потребителей с возобновляемыми источниками энергии, определить технико-экономические показатели их применения.

Объекты исследования: вторично используемые литий-ионные аккумуляторы и собранные на их основе аккумуляторные батареи для накопления энергии от возобновляемых источников при электроснабжении сельских потребителей.

Предмет исследования: энергоёмкость вторично используемых литий-ионных аккумуляторов при циклическом режиме эксплуатации и КПД цикла «заряд-разряд» при различных диапазонах рабочих напряжений.

Научная новизна исследования:

- разработанные математические модели, описывающие деградацию энергоёмкости литий-ионных аккумуляторов при циклическом режиме эксплуатации и различных диапазонах рабочих напряжений;
- выявленное влияние диапазона рабочих напряжений на КПД цикла «заряд-разряд» литий-ионных аккумуляторов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработанные меры для продления срока службы вторично используемых литий-ионных аккумуляторов и увеличения числа циклов «заряд-разряд» до их списания;
- увеличение КПД цикла «заряд-разряд литий-ионных аккумуляторов за счёт выбора оптимальных диапазонов рабочих напряжений;
- разработанная схема балансировки литий-ионных аккумуляторных батарей с балластным аккумулятором, позволяющая повысить используемую энергоёмкость и обеспечить защиту батарей от глубокого разряда;
- разработанные мероприятия по повышению эффективности накопления энергии за счёт применения литий-ионных аккумуляторных батарей и оптимизации режимов их работы в источниках бесперебойного питания и системах хранения энергии свиноводческого комплекса;
- разработанная программа для ЭВМ «Калькулятор ёмкости Li-NMC аккумулятора», позволяющая упростить проведение технико-экономического обоснования при выборе типа и параметров накопителей энергии, оптимизировать эксплуатационные показатели накопителей энергии и снизить затраты на реконструкцию систем бесперебойного питания, применённая на ферме по производству молока.

Методология и методы исследования. При проведении исследований применялся эмпирический метод – проведение экспериментов по определению влияния диапазонов рабочих напряжений литий-ионных аккумуляторов на их КПД и изменение энергоёмкости при циклическом режиме эксплуатации. Проведена статистическая обработка полученных экспериментальных данных, выполнено математическое моделирование деградации энергоёмкости литий-ионных аккумуляторов при циклическом режиме эксплуатации и различных диапазонах рабочих напряжений.

Положения, выносимые на защиту:

- экспериментально выявленный энергоэффективный диапазон рабочих напряжений литий-ионных аккумуляторов, составляющий от 4,10 до 3,50 Вольт и обеспечивающий повышение КПД цикла «заряд-разряд» до 96,42%;
- математические модели прогноза деградации энергоёмкости литий-ионных аккумуляторов при циклическом режиме эксплуатации и различных диапазонах рабочих напряжений, позволяющие рассчитать число циклов «заряд-разряд» до списания аккумуляторов;
- разработанная схема балансировки литий-ионных аккумуляторных батарей с балластным аккумулятором, позволяющая повысить используемую энергоёмкость на 12% и обеспечить защиту батарей от глубокого разряда.

Степень достоверности. Достоверность положений диссертационной работы подтверждается сопоставимостью результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, использованием традиционных методических принципов современной науки и известных методов анализа и синтеза, непротиворечивостью математических выкладок и преобразований.

Апробация результатов работы. Положения данной работы ранее были доложены на российских и международных конференциях, круглых столах и научных семинарах, а также были представлены на конкурсах:

- 76-я всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 155-летию со дня рождения В.П. Горячкина, Москва, 14–17 марта 2023 г.;
- Всероссийская научно-практическая конференция «Наука без границ и языковых барьеров», Орёл, 16-17 мая 2024 г.;
- Всероссийский конкурс на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, Ставрополь, 21 мая 2024 г.;
- Международная научно-практическая конференция по энергетической науке и технологиям «Устойчивое и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса: энергетические системы, технологии и материалы» (ICEST 2024), 13-14 ноября 2024 г.;
- Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы энергоэффективности агроинженерных исследований в условиях цифровой трансформации», Балашиха, 20 мая 2025 г.;
- Всероссийский конкурс на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, Ставрополь, 28 мая 2025 г. (Диплом III степени);
- XXIX Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий «Архимед 2026», Москва, 17-19 марта 2026 г. (Золотая медаль в номинации «Программы для ЭВМ»).

Публикации научных работ. По теме опубликовано 11 печатных работ, в том числе 2 работы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК Российской Федерации и 6 работ в прочих изданиях, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (№ 2025665761, № 2026666448), 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных (№ 2026623297) (2,56 авторских печатных листов).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 133 страницах, состоит из введения, основной части, содержащей 32 рисунка и 19 таблиц, заключения, списка литературы, включающего 160 наименований, в том числе 57 на иностранном языке и 41 приложения.

Личный вклад соискателя. Личный вклад соискателя состоит в формулировании цели и задач, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке экспериментальных данных, разработке моделей деградации энергоёмкости литий-ионных аккумуляторов при различных диапазонах рабочих напряжений, апробации результатов исследований, написании диссертации и подготовке публикаций по выполненной работе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определена степень её разработанности, сформулированы цель, задачи и научная новизна исследования, выведены теоретическая и практическая значимость, выбраны методология и методы исследования, выявлены положения, выносимые на защиту, проведена апробация результатов.

В первой главе работы проведён анализ сельских электрических сетей, показавший необходимость их модернизации и внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Анализ современного состояния ВИЭ показал рост их численности, установленной мощности и доли вырабатываемой электроэнергии. Обзор существующих типов систем электроснабжения с ВИЭ показал возможность и необходимость применения аккумуляторных батарей в таких установках.

Анализ существующих типов химических аккумуляторов показал, что на данный момент литий-ионные аккумуляторы являются наиболее совершенным типом аккумуляторов благодаря высокой плотности хранения энергии, эксплуатационному ресурсу и допустимым токам заряда и разряда. При этом, несмотря на широкое распространение и постепенное снижение стоимости аккумуляторов, их цена остаётся довольно высокой, что ограничивает применение аккумуляторных батарей в системах электроснабжения с ВИЭ. Установлено, что данная проблема может быть решена за счёт определения оптимального режима работы аккумуляторов и вторичного применения аккумуляторов, эксплуатировавшихся в электротранспорте.

Выполненный анализ показал, что наиболее перспективными для вторичного применения в системах электроснабжения с ВИЭ представляются батареи электромобилей Nissan Leaf. Описаны параметры литий-ионных аккумуляторных модулей электромобилей Nissan Leaf различных поколений. При этом, в зарубежной литературе существуют примеры вторичного применения аккумуляторов электромобилей в системах электроснабжения с ВИЭ, что указывает на целесообразность дальнейшего изучения данного вопроса.

Во второй главе работы выполнено теоретическое обоснование деградации литий-ионных аккумуляторов, выявлены наиболее значимые факторы, способствующие ускоренной деградации, а именно: высокие токи заряда и разряда, работа при температурах свыше 25°C и заряд при температуре менее 0°C , высокое напряжение заряда, а также глубокий разряд аккумуляторов. Для проведения экспериментальных исследований на вторичном рынке приобретены модули второго поколения от Nissan Leaf AZE0 2014 года выпуска. Данные модули состоят из четырёх аккумуляторов, соединённых по схеме 2S2P, т.е. первая пара параллельно подключенных аккумуляторов соединена последовательно со второй парой параллельно подключенных аккумуляторов (рисунок 1). Номинальное напряжение аккумуляторов составляет 3,75 В, а диапазон рабочих напряжений составляет 4,15-2,50 В. Модуль имеет размеры 303*223*35 мм, весит 3,8 кг, а его номинальная энергоёмкость составляет 500 Вт*ч.

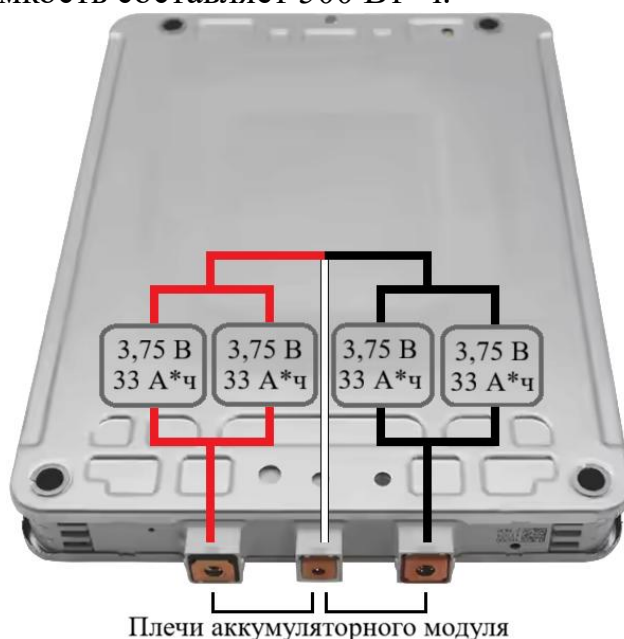


Рисунок 1 – Внешний вид и схема подключения аккумуляторов в модуле второго поколения

Разработана и описана методика диагностики бывших в употреблении аккумуляторных модулей для определения их пригодности для дальнейшего применения, на основе которой разработана программа для ЭВМ (номер свидетельства RU 2026666448). Диагностика модулей показала их работоспособность: напряжения плеч модулей составляли около 4,03 В, разница напряжений не превышала 20 мВ, среднее внутреннее сопротивление плеча модуля составляло 1,17 мОм, т.е. за период эксплуатации в среднем возросло на 17%. С помощью нагрузочного тестера ZKETECH EBC-A20 была измерена энергоёмкость аккумуляторных модулей. Схема подключения испытательной установки представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема подключения испытательной установки

1 – блок питания нагрузочного тестера; 2 – нагрузочный тестер; 3 – кабель USB-TTL конвертера; 4 – блок питания ноутбука; 5 – источник бесперебойного питания; 6 – испытываемый аккумуляторный модуль; 7 – ноутбук

Средняя измеренная энергоёмкость плеча модуля составила 141,9 Вт*ч, что соответствует 57% от номинальной энергоёмкости. Средний саморазряд плеч модулей после хранения в течение месяца составил 52 мВ, а разброс величин саморазряда не превышал 7 мВ.

Оценка влияния конечного напряжения разряда на энергоёмкость плеча модуля при заряде до 4,15 В показала, что по мере разряда напряжение меняется нелинейно: плечо модуля отдаёт около 80% энергоёмкости при разряде в диапазоне от 4,15 до 3,75 В, составляющем менее 25% от полного диапазона рабочих напряжений и 90% при разряде в диапазоне от 4,15 до 3,50 В, составляющем 39% от полного диапазона рабочих напряжений.

Анализ влияния величины зарядного напряжения на энергоёмкость плеча модуля показал, что повышение зарядного напряжения с 4,15 до 4,20 В приводит к незначительному повышению энергоёмкости. В то же время, снижение зарядного напряжения существенно влияет на энергоёмкость (рисунок 3).

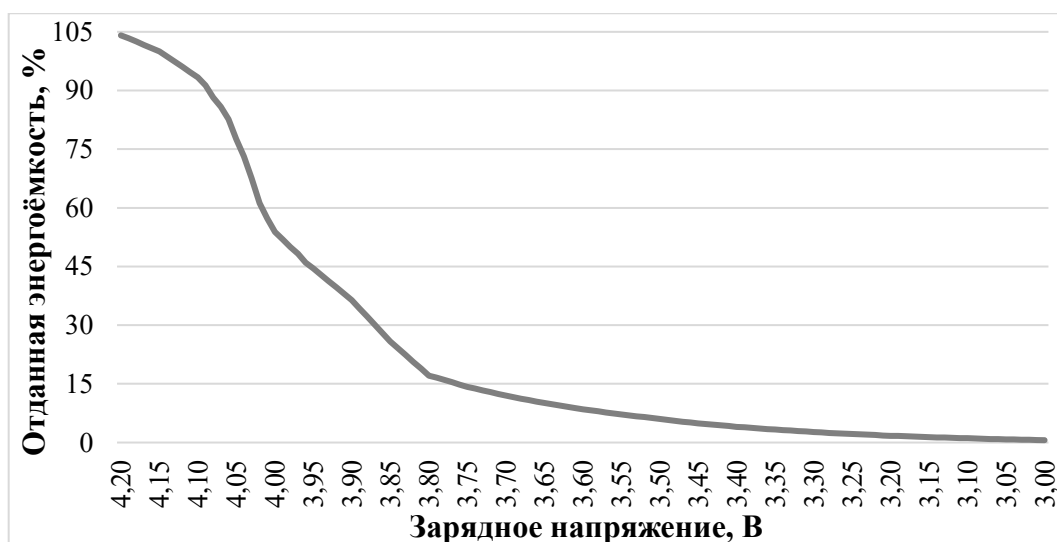


Рисунок 3 – Зависимость энергоёмкости плеча модуля от величины зарядного напряжения

На основе полученного массива экспериментальных данных были разработаны база данных (номер свидетельства RU 2026623297) и программа для ЭВМ (номер свидетельства RU 2025665761), позволяющая рассчитать процент от полной энергоёмкости плеча аккумуляторного модуля при работе в заданном пользователем диапазоне напряжений, а также вычислить полезную энергоёмкость плеча модуля в заданном пользователем диапазоне напряжений.

Для проведения исследования влияния диапазона рабочих напряжений на изменение энергоёмкости и величину КПД цикла «заряд-разряд» плеч аккумуляторных модулей при циклическом режиме эксплуатации было составлено 9 диапазонов рабочих напряжений (таблица 1).

Таблица 1 – Исследуемые диапазоны рабочих напряжений

№ диапазона	Диапазон рабочих напряжений, В	Доля от энергоёмкости, в диапазоне 4,15-2,50 В, %
1	4,05÷3,00	76%
2	4,05÷3,25	74%
3	4,05÷3,50	70%
4	4,10÷3,00	91%
5	4,10÷3,25	89%
6	4,10÷3,50	85%
7	4,15÷3,00	97%
8	4,15÷3,25	95%
9	4,15÷3,50	90%

Разработана методика проведения экспериментального исследования по выявлению оптимального диапазона рабочих напряжений плеч аккумуляторных модулей, согласно которой отобрано 9 аккумуляторных модулей с наиболее близкими параметрами энергоёмкости и внутреннего сопротивления плеч. Каждому модулю присваивался один из девяти диапазонов рабочих напряжений плеча, причём оба плеча одного модуля проходили циклические испытания поочерёдно при идентичных условиях.

При проведении циклических испытаний плечо аккумуляторного модуля сначала заряжалось нагрузочным тестером ZKETECH EBC-A20 по алгоритму CC-CV начальным током 5 А до конечного напряжения заряда присвоенного ему диапазона и снижения тока заряда до 0,1 А. Затем, плечо модуля разряжалось током 10 А до конечного напряжения разряда присвоенного ему диапазона для измерения энергоёмкости, после чего цикл «заряд-разряд» повторялся.

Оба плеча каждого из девяти аккумуляторных модулей прошли по 25 циклов «заряд-разряд» для выявления тенденций по изменению энергоёмкости в циклическом режиме эксплуатации при заданном диапазоне рабочих напряжений. Данные, полученные при проведении экспериментов, выводились на ноутбук с помощью программы «EB Tester Software V1.8.5» и сохранялись в формате XLSX посредством программы «Microsoft Excel» для дальнейшей обработки.

В третьей главе представлены результаты проведённого двухфакторного эксперимента с тремя уровнями варьирования каждого фактора. Исследовано девять диапазонов рабочих напряжений плеч аккумуляторных модулей. В каждой из девяти комбинаций уровней факторов применялась двухкратная повторность, проведено 18 независимых опытов, каждый из которых включал 25 циклов «заряд-разряд» при заданных диапазонах рабочих напряжений. Отданная плечом модуля энергоёмкость в каждом цикле была выражена в процентах относительно отданной энергоёмкости в первом цикле «заряд-разряд».

Выполнен поиск и исключение аномальных значений энергоёмкостей при помощи Z-теста. После исключения аномальных значений для определения возможности объединения массивов данных проведена проверка однородности дисперсий параллельных опытов посредством критерия Фишера. Проверка показала, что вычисленные критерии Фишера меньше критических значений, разница между дисперсиями массивов данных параллельных опытов статистически не значима, а выборки могут быть объединены. Проведено объединение массивов данных параллельных опытов по средневзвешенным значениям.

С помощью метода конечных разностей установлено, что наилучшим образом обработанные экспериментальные данные описывает экспоненциальная функция с уравнением вида $y = a \times e^{b \times t}$, где: y – энергоёмкость; a – начальное значение функции; b – темп роста функции; t – число циклов «заряд-разряд». При помощи метода наименьших квадратов найдены параметры экспоненциальных уравнений, описывающих деградацию плеч аккумуляторных модулей при различных диапазонах рабочих напряжений (таблица 2).

Таблица 2 – Полученные уравнения регрессии, описывающие деградацию энергоёмкости при различных диапазонах рабочих напряжений

№ диапазона	Диапазон напряжений, В	Уравнение регрессии
1	4,05÷3,00	$y = 97,81 \times e^{-0,0007 \times t}$
2	4,05÷3,25	$y = 98,65 \times e^{-0,0011 \times t}$
3	4,05÷3,50	$y = 98,73 \times e^{-0,0008 \times t}$
4	4,10÷3,00	$y = 99,60 \times e^{-0,0005 \times t}$
5	4,10÷3,25	$y = 100,12 \times e^{-0,0005 \times t}$
6	4,10÷3,50	$y = 99,70 \times e^{-0,0005 \times t}$
7	4,15÷3,00	$y = 99,04 \times e^{-0,0006 \times t}$
8	4,15÷3,25	$y = 99,02 \times e^{-0,0010 \times t}$
9	4,15÷3,50	$y = 99,65 \times e^{-0,0005 \times t}$

Для проверки качества полученных уравнений, для каждого уравнения определена средняя относительная ошибка аппроксимации $\bar{A}$, демонстрирующая усреднённое процентное отклонение предсказанных значений от объединённых экспериментальных значений. Максимальная ошибка аппроксимации составила 0,23%, следовательно, уравнения описывают деградацию плеч аккумуляторных модулей с высокой точностью.

Для оценки прогноза уравнений регрессии рассчитан коэффициент несоответствия Тейла, позволяющий оценить качество воспроизведения моделью исходного массива данных. Рассчитанные коэффициенты Тейла близки к нулю, следовательно, разработанные модели описывают массивы экспериментальных данных с высокой точностью.

Проведён расчёт коэффициента детерминации R^2 , демонстрирующего долю дисперсии зависимой переменной, объяснённую уравнением регрессии. Расчёт показал, что для всех разработанных уравнений $R^2 > 0,8$, что свидетельствует о высокой точности подбора уравнений регрессии. Для проверки значимости моделей аппроксимации, рассчитан критерий Фишера, показавший статистическую значимость коэффициентов детерминации уравнений.

Наименьшая деградация энергоёмкости плеч аккумуляторных модулей наблюдалась при диапазоне рабочих напряжений 4,10-3,50 В. Согласно разработанной математической модели, снижение энергоёмкости на 20% прогнозируется через 450 циклов «заряд-разряд», на 40% – через 1000, а на 60% – через 1800 циклов «заряд-разряд». Проведён расчёт и анализ средних энергетических КПД циклов «заряд-разряд» плеч аккумуляторных модулей при различных диапазонах рабочих напряжений. Выполнен поиск аномальных значений КПД методом Z-оценки, показавший отсутствие выпадающих значений.

Для оценки возможности объединения массивов данных, полученных при проведении параллельных опытов, проведена проверка статистического равенства массивов данных посредством двухвыборочного теста Стьюдента, показавшая, что вычисленный критерий Стьюдента меньше критического значения, разница между средними значениями массивов данных параллельных опытов статистически не значима, а выборки можно принять как однородные и объединить.

Выполнены расчёты взвешенных средних значений КПД циклов «заряд-разряд», а также расчёты средних арифметических взвешенных КПД для каждого диапазона рабочих напряжений, результаты которых представлены в таблице 3. Установлено, что наибольший КПД цикла «заряд-разряд» с величиной 96,42% наблюдается при диапазоне рабочих напряжений 4,10-3,50 В.

Таблица 3 –КПД плеч аккумуляторных модулей при различных диапазонах рабочих напряжений

Конечное напряжение разряда, В	Зарядное напряжение, В		
	4,05	4,10	4,15
3,00	95,40%	95,78%	95,42%
3,25	95,75%	96,17%	95,55%
3,50	96,20%	96,42%	96,04%

В четвертой главе работы представлены разработанные схемы подключения плат BMS (Battery Management System – система управления батареей) и активных балансиров к батарее из аккумуляторных модулей. Разработан, описан и протестирован принцип активной балансировки аккумуляторной батареи с балластным плечом, согласно которому плата BMS подключается ко всем

последовательно соединённым плечам модулей за исключением последнего, а активный балансир подключается ко всем плечам модулей. В предложенной схеме, плата BMS предназначена для защиты подключенных к ней плеч аккумуляторных модулей при их заряде и разряде, а заряд и разряд балластного плеча обеспечивается работой активного балансира, перераспределяющего заряд от плеч с большим, к плечам с меньшим напряжением.

Для оценки предложенного принципа был изготовлен стенд для измерения параметров балансировки батареи из двух соединённых последовательно аккумуляторных модулей с одним балластным плечом (рисунок 4).

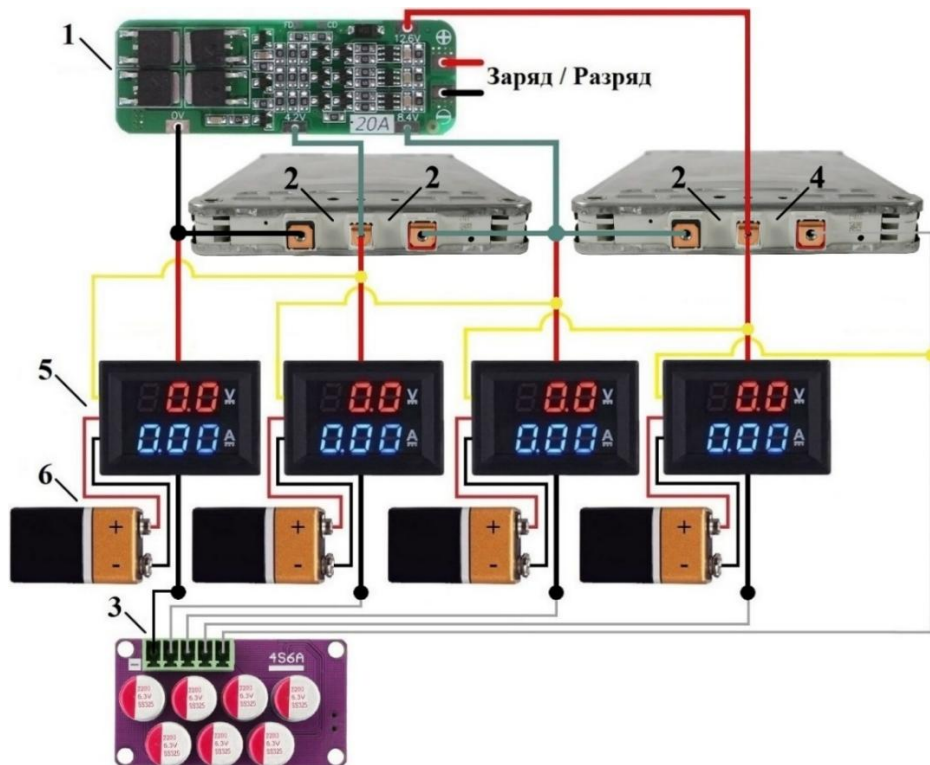


Рисунок 4 – Измерительная схема параметров балансировки, где: 1 – BMS, 2 – рабочие плечи аккумуляторных модулей, 3 – активный балансир, 4 – балластное плечо аккумуляторного модуля, 5 – вольтамперметры, 6 – источники питания вольтамперметров

Для проведения заряда и разряда рабочих плеч аккумуляторной батареи использовалась плата BMS 3S. Для обеспечения балансировки батареи был использован активный балансир 4S.

При проведении первого опыта аккумуляторная батарея была заряжена через плату BMS до напряжения 12,45 В, а балластное плечо батареи было разряжено до 2,50 В. Далее, активный балансир был включён, а изменения напряжений плеч батареи и тока заряда балластного плеча фиксировались для построения графика балансировки (рисунок 5).

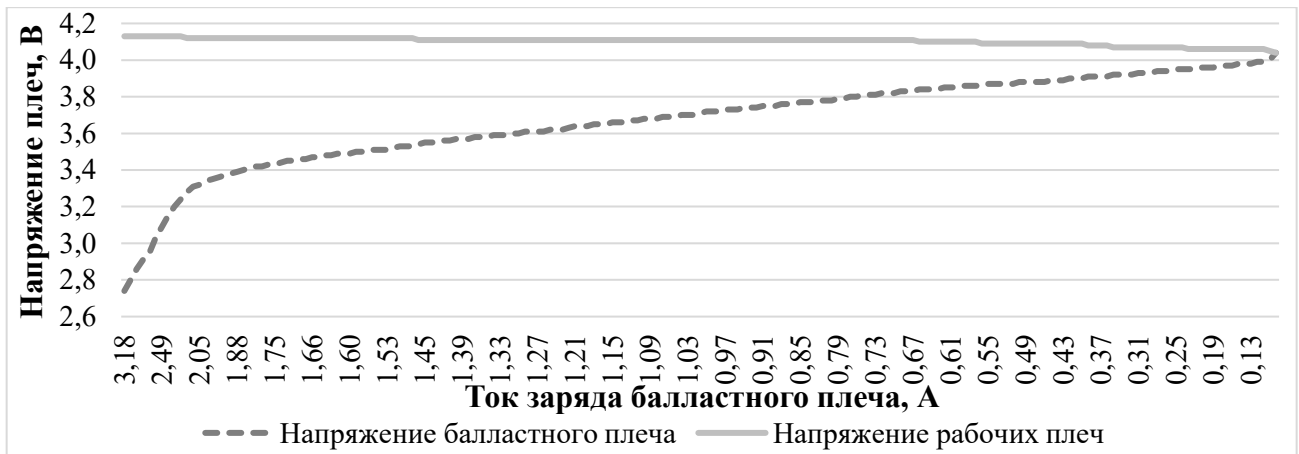


Рисунок 5 – График балансировки заряженной аккумуляторной батареи с разряженным балластным плечом

При проведении второго опыта аккумуляторная батарея была разряжена через плату BMS до напряжения 7,50 В, а балластное плечо батареи было заряжено до напряжения 4,15 В. Затем, активный балансир был включён, а изменения напряжений плеч батареи и тока разряда балластного плеча фиксировались для построения графика балансировки (рисунок 6).

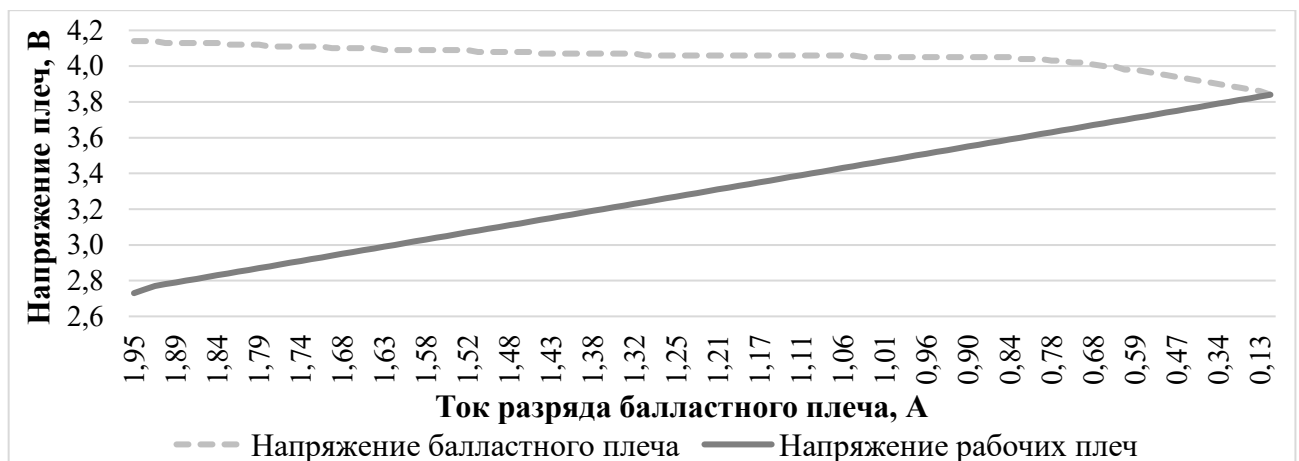


Рисунок 6 – График балансировки разряженной аккумуляторной батареи с заряженным балластным плечом

Результаты опытов демонстрируют, что разработанный принцип балансировки позволяет эффективно использовать ёмкость балластного плеча как при заряде, так и при разряде аккумуляторной батареи, обеспечивает защиту батареи от глубокого разряда, высокую скорость и точность балансировки. Таким образом, при сборке батареи из 4 последовательно соединённых аккумуляторных модулей с одним балластным плечом, используемая энергоёмкость батареи увеличивается на 12% за счёт переноса накопленной балластным плечом энергии к рабочим плечам батареи.

Предложен и описан способ модернизации источников бесперебойного питания (ИБП), позволяющий применять ИБП совместно с батареями из аккумуляторных модулей в качестве комбинированного инвертора в системах электроснабжения с ВИЭ. Схема ИБП после модернизации и внешний вид разработанного устройства представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

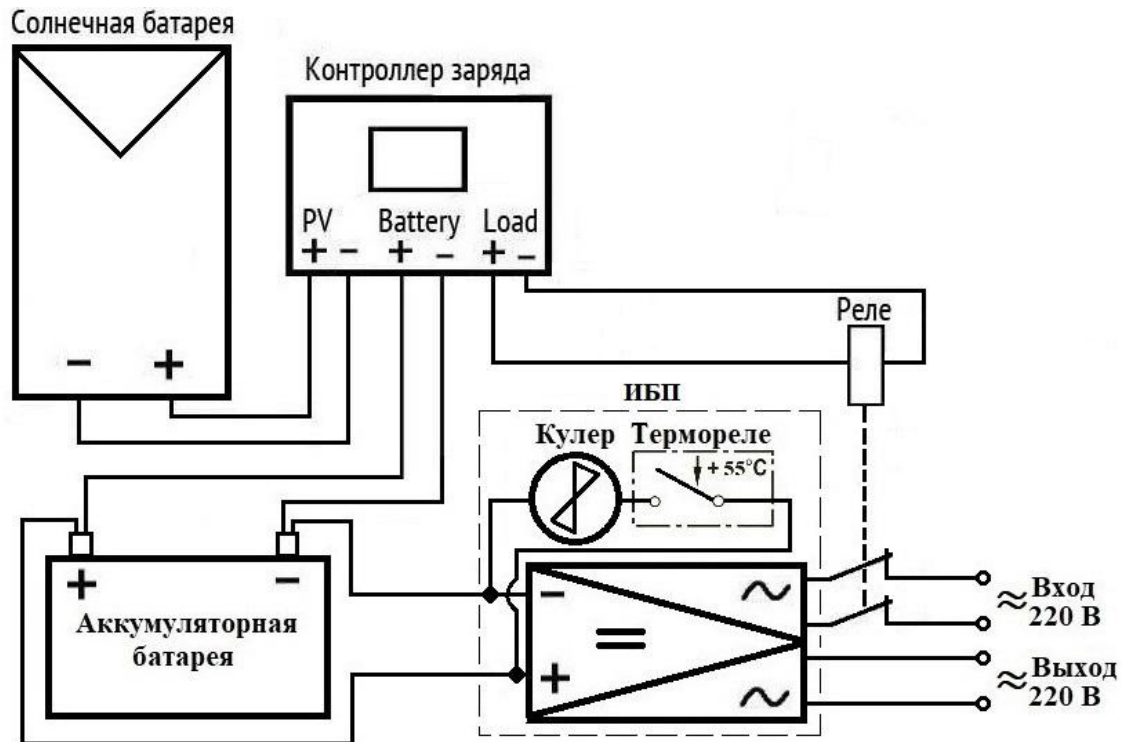


Рисунок 7 – Схема ИБП после модернизации

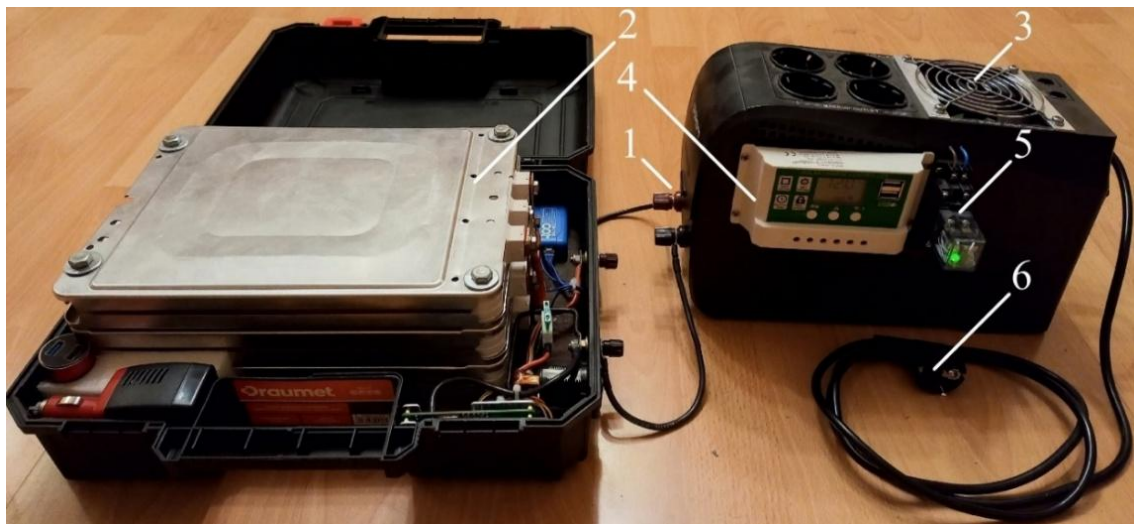


Рисунок 8 – Модернизированный ИБП с батареями из аккумуляторных модулей без солнечной батареи

При модернизации ИБП в его конструкцию был внесён ряд изменений, позволяющих применять источник бесперебойного питания в качестве комбинированного инвертора. Контакты (1) для подключения аккумуляторной батареи (2) перемещены на внешнюю часть корпуса ИБП. Для охлаждения трансформатора и электронных компонентов при продолжительной работе под нагрузкой ИБП оснащён кулером (3), подключенным последовательно с нормально разомкнутым термостатом с температурой срабатывания 55°C к контактам для подключения аккумуляторной батареи. Крепление термостата производилось на радиатор охлаждения силовых транзисторов, что позволило обеспечить автоматическое управление кулером.

На боковой части корпуса ИБП установлен солнечный контроллер заряда (4), а его контакты «Battery» подключены к контактам для подключения аккумуляторной батареи на корпусе ИБП. На боковой части корпуса ИБП установлено электромагнитное реле (5) с нормально замкнутыми контактами, причём его электромагнитная катушка подключена к контактам «Load» на солнечном контроллере. Шнур питания ИБП (6) подключен через электромагнитного реле так, чтобы при подаче напряжения с контактов «Load» солнечного контроллера на катушку электромагнитного реле его силовые контакты размыкались, а ИБП переключался на режим работы от аккумуляторной батареи.

Применённый солнечный контроллер имеет функцию управления нагрузкой, подключенной к контактам «Load». В целях изменения алгоритма работы ИБП, данную функцию можно применять для управления работой электромагнитного реле, установив на контроллере конечное напряжение заряда батареи, конечное напряжение разряда батареи, а также напряжение, при котором питание нагрузки от батареи возобновляется (рисунок 9).

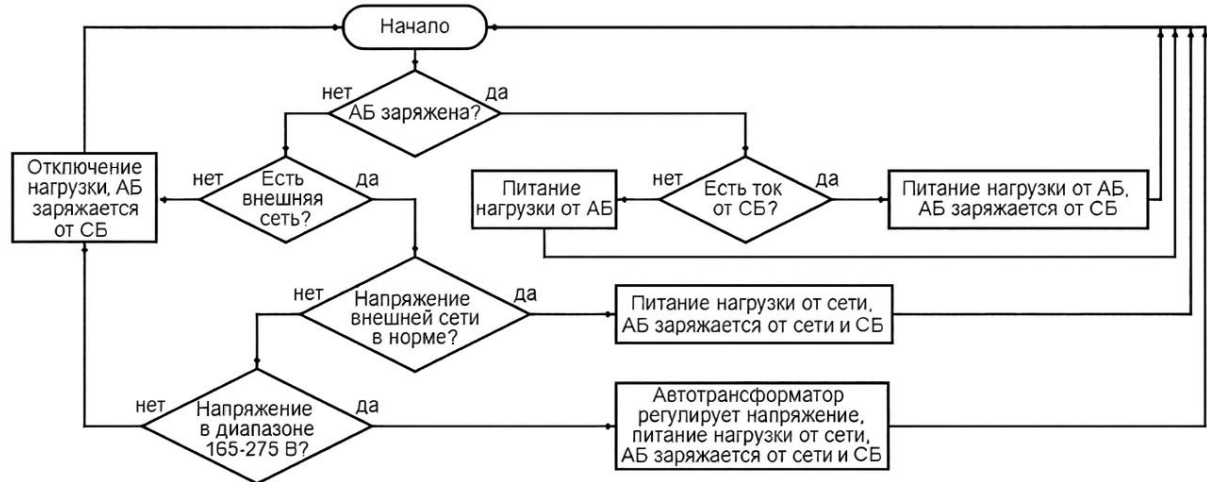


Рисунок 9 – Алгоритм работы ИБП после модернизации

При разряде аккумуляторной батареи до заданного на контроллере напряжения отключения нагрузки происходит отключение питания катушки реле, что приводит к замыканию его контактов, а ИБП переходит на питание от сети. При заряде аккумуляторной батареи до заданного на контроллере напряжения возобновления питания нагрузки, контроллер подаёт питание на катушку реле, что приводит к размыканию его контактов и переключению ИБП на питание от аккумуляторной батареи.

Проведено технико-экономическое сравнение различных видов химических аккумуляторов с модулями электромобиля Nissan Leaf для применения в системах электроснабжения с ВИЭ, показавшее, что стоимость приобретения батарей типа AGM и LiFePO4 превышает стоимость батарей из аккумуляторных модулей в 4 и 6 раз соответственно. При этом, себестоимость накопления энергии у батарей из аккумуляторных модулей (при расчёте до снижения энергоёмкости на 20%) составляет 17,1 руб/кВт*ч, что в 4,6 раз ниже по сравнению с AGM батареями, но на 5% выше по сравнению с батареями типа LiFePO4. В то же время, при эксплуатации батарей из аккумуляторных модулей до снижения их энергоёмкости на 60% себестоимость накопления энергии составит 5,5 руб/кВт*ч.

Результаты проведённых исследований были применены при разработке системы электроснабжения сельского дома, расположенного в Московской области ($56,255603^\circ$ северной широты, $37,508429^\circ$ восточной долготы). На данном объекте электроснабжения была установлена солнечная батарея мощностью 1600 Вт (рисунок 10) и сетевой инвертор SOFAR 1600TL-G3 мощностью 1600 Вт (рисунок 11). Выдача выработанной электроэнергии в сеть не осуществлялась, а направлялась на питание нагрузок сельского дома.



Рисунок 10 – Установленные солнечные панели



Рисунок 11 – Установленный сетевой инвертор

Анализ полученных данных показал, что среднесуточное потребление электроэнергии в сельском доме составляет $5,98 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, среднесуточная выработка солнечной батареи с сетевым инвертором составляет $1,66 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, а пиковая потребляемая мощность не превышает 3 кВт .

С целью увеличения выработки солнечной батареи, для обеспечения накопления вырабатываемой энергии в периоды, когда вырабатываемая мощность превышает потребляемую мощность, была проведена замена сетевого инвертора на модернизированный ИБП APC Smart UPS 3000 VA с батареями из аккумуляторных модулей (рисунок 12).



Рисунок 12 – Установленный модернизированный ИБП и батареи из аккумуляторных модулей

Затем, было проведено сравнение данных о выработке солнечной батареи с сетевым инвертором, с данными о выработке солнечной батареи с модернизированным ИБП и аккумуляторными батареями (рисунок 13).

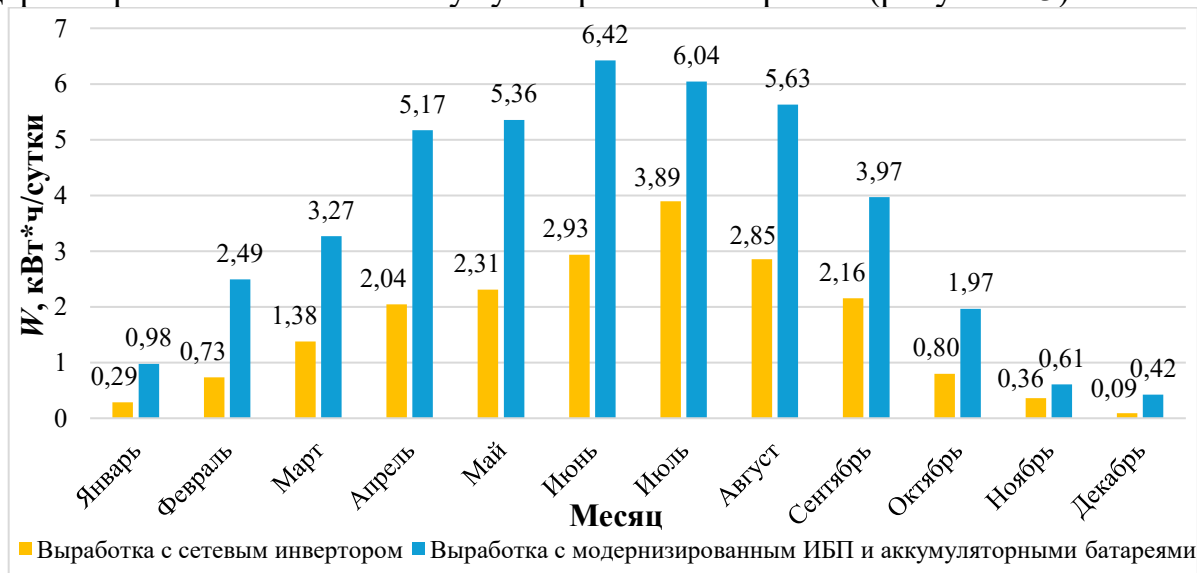


Рисунок 13 – Среднесуточная выработка солнечной батареи мощностью 1,6 кВт с ориентацией на юг и углом наклона 40° в Московской области при использовании сетевого инвертора и модернизированного ИБП с батареями из аккумуляторных модулей

Полученные данные показали, что замена сетевого инвертора на модернизированный ИБП с батареями из аккумуляторных модулей позволила увеличить среднесуточную выработку солнечной батареи с 1,66 кВт*ч до 3,53 кВт*ч, т.е. более чем в 2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ сельских электрических сетей показал необходимость их модернизации и использования местных возобновляемых источников энергии. Рост применения систем электроснабжения с ВИЭ сопровождается увеличением потребностей в накопителях энергии. В настоящее время, наиболее совершенным типом накопителей являются литий-ионные аккумуляторы, отличающиеся длительным ресурсом эксплуатации, высокими допустимыми токами заряда и разряда, высокой плотностью хранения энергии и высоким КПД. Актуальным направлением снижения затрат в системах электроснабжения с ВИЭ является вторичное применение аккумуляторов, эксплуатировавшихся в электротранспорте.

2. Высокие токи заряда и разряда, работа при температурах менее 0°C и более 25°C, высокое напряжение заряда и глубокий разряд аккумуляторов ускоряют их деградацию, что следует учитывать при выборе режимов работы. Исследование параметров вторично используемых аккумуляторных модулей показало, что за период эксплуатации их внутреннее сопротивление в среднем выросло на 17%, ёмкость снизилась в среднем на 43%, а аккумуляторные модули сохраняют работоспособность. Установлено, что плечо аккумуляторного модуля отдаёт 90% энергоёмкости при разряде с 4,15 до 3,50 Вольт. При этом, снижение зарядного напряжения до 4,10 Вольт уменьшает энергоёмкость на 6,6%, а снижение до 4,05 Вольт – на 22,4%. Для исследования влияния зарядного напряжения на изменение энергоёмкости плеча аккумуляторного модуля при циклическом режиме эксплуатации выбраны значения 4,15; 4,10 и 4,05 Вольт, а для исследования влияния конечного напряжения разряда выбраны значения 3,50; 3,25 и 3,00 Вольт.

3. Экспериментальные исследования показали, что после проведения 25 циклов «заряд-разряд» при всех исследуемых диапазонах рабочих напряжений плечи аккумуляторных модулей сохранили более 95,8% энергоёмкости, относительно отданной энергоёмкости в первом цикле. При всех исследуемых диапазонах рабочих напряжений энергетический КПД цикла «заряд-разряд» превышает 95%, что сопоставимо с КПД новых литий-ионных аккумуляторов и превышает КПД цикла «заряд-разряд» аккумуляторов прочих типов.

4. На основании экспериментальных данных разработаны математические модели деградации энергоёмкости плеч аккумуляторных модулей при различных диапазонах рабочих напряжений. Коэффициенты детерминации всех полученных уравнений регрессии превышают 83%. Наименьшая деградация энергоёмкости отмечена при диапазоне 4,10-3,50 Вольт, где снижение энергоёмкости плеча модуля на 20% прогнозируется через 450 циклов «заряд-разряд», а снижение на 60% – через 1800 циклов. Установлено, что повышение конечного напряжения разряда аккумуляторов приводит к увеличению коэффициента полезного действия, а наибольший КПД цикла «заряд-разряд», составляющий 96,42% наблюдается при диапазоне рабочих напряжений 4,10-3,50 Вольт.

5. Разработан принцип активной балансировки аккумуляторной батареи с балластным плечом, позволяющий повысить используемую энергоёмкость на 12% и обеспечить защиту батарей от глубокого разряда. Разработан метод модернизации источников бесперебойного питания, позволяющий использовать ИБП совместно с изготовленными из аккумуляторных модулей батареями в системах электроснабжения сельских потребителей с применением ВИЭ в качестве комбинированного инвертора.

Проведённая экономическая оценка показала, что стоимость приобретения новых аккумуляторных батарей типа AGM и LiFePO₄ превышает стоимость батарей из вторично используемых аккумуляторных модулей в 4 и 6 раз соответственно. Установлено, что себестоимость накопления энергии у батарей из аккумуляторных модулей при расчёте до снижения энергоёмкости на 20% составляет 17,1 руб/кВт*ч, что в 4,6 раз ниже по сравнению с AGM батареями, но на 5% выше по сравнению с батареями типа LiFePO₄. При эксплуатации батарей из аккумуляторных модулей до снижения энергоёмкости на 60% себестоимость накопления энергии составляет 5,5 руб/кВт*ч.

Замена сетевого инвертора на модернизированный источник бесперебойного питания с батареями из аккумуляторных модулей в системе электроснабжения сельского дома с солнечной батареей обеспечила увеличение среднесуточной выработки электроэнергии с 1,66 кВт*ч до 3,53 кВт*ч, т.е. более чем в 2 раза.

Рекомендации и предложения производству

Для снижения затрат на приобретение аккумуляторных батарей и уменьшения потерь при накоплении энергии рекомендуется осуществлять замену свинцово-кислотных аккумуляторных батарей в источниках бесперебойного питания и системах электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии на батареи из литий-ионных аккумуляторных модулей. При настройке диапазонов рабочих напряжений литий-ионных аккумуляторных батарей предлагается использовать результаты исследований, представленных в данной работе

Перспективы дальнейших исследований

Разработка универсальной математической модели для прогнозирования ресурса эксплуатации и КПД цикла «заряд-разряд» литий-ионных аккумуляторов при различных диапазонах рабочих напряжений.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК Российской Федерации

1. Карлаков, Д. С. Расширение функциональных возможностей источника бесперебойного питания / Д. С. Карлаков, О. В. Лештаев, В. И. Загинайлов // Международный технический журнал. – 2024. – № 2(89). – С. 39-47. – DOI 10.34286/2949-4176-2024-89-2-39-47. – EDN CYAQUL.

2. Карлаков, Д. С. Метод активной балансировки аккумуляторной батареи с балластным аккумулятором / Д. С. Карлаков, О. В. Лештаев, С. И. Белов // Международный технический журнал. – 2026. – № 1(101). – С. 93-103. – DOI 10.34286/29449-4176-2026-101-1-93-103. – EDN BKHSAE.

Свидетельства

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025665761 Российская Федерация. «Калькулятор емкости Li-NMC аккумулятора» : заявл. 17.04.2025 : опубл. 19.06.2025 / С. И. Белов, Д. С. Карлаков, О. В. Лештаев, В. И. Загинайлов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева». – EDN JQVONC.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026666448 Российская Федерация. Подбор бывших в употреблении аккумуляторных модулей электромобиля Nissan Leaf : заявл. 14.05.2026 : опубл. 01.06.2026 / Д. С. Карлаков, С. И. Белов, О. В. Лештаев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

3. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026623297 Российская Федерация. Влияние зарядного напряжения и конечного напряжения разряда на энергоёмкость аккумулятора LiMn_2O_4 : заявл. 26.06.2026 : опубл. 13.07.2026 / Д. С. Карлаков, С. И. Белов, К. А. Гарькавый [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева». – EDN HCGLMJ.

Научные статьи, материалы конференций и иные издания

1. Карлаков, Д. С. Влияние величины зарядного напряжения на сокращение ёмкости свинцово-кислотных аккумуляторных батарей / Д. С. Карлаков, Н. А. Стушкина // Агротехника и энергообеспечение. – 2022. – № 2(35). – С. 25-29. – EDN WHJRHL.

2. Карлаков, Д. С. Влияние зарядного напряжения на снижение ёмкости свинцово-кислотных аккумуляторных батарей / Д.С. Карлаков, О.В. Лештаев, Н.А. Стушкина // Развитие электроснабжения и применения электроэнергии в АПК / В. И. Трухачев, В. Ф. Сторчевой, Н. Е. Кабдин [и др.]. – Москва : ООО «Мегаполис», 2022. – 250 с. – ISBN 978-5-6049928-3-8. – EDN QXUUOP.

3. Карлаков, Д. С. Портативный автономный источник электроэнергии / Д. С. Карлаков // Сборник трудов, приуроченных к 76-й Всероссийской студенческой научно-практической конференции, посвященной 155-летию со дня рождения В. П. Горячкина, Москва, 14–17 марта 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2023. – С. 27-29. – EDN PXAYYI.

4. Karlakov, D. S. Influence of charging voltage on capacity reduction of lead-acid batterie / D. S. Karlakov // Scientific Journal of Young Scientists. – 2024. – No. 3(38). – P. 57-61. – EDN FUVSVQ.

5. Karlakov, D. S. Self-contained portable power source / D. S. Karlakov // Scientific Journal of Young Scientists. – 2024. – No. 3(38). – P. 54-57. – EDN WBCELX.

6. Карлаков, Д. С. Технические решения вторичного применения литий-ионных аккумуляторов / Д. С. Карлаков, О. В. Лештаев, С. И. Белов // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 28–29 января 2026 года. Том 3. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2026. – 230 с. – ISBN 978-5-9675-2137-9. – EDN NSVTIV.