

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Белов Сергей Иванович,
кандидат технических наук, доцент

МОСКВА – 2026

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Анализ состояния вопроса, постановка цели и задач исследования..	11
1.1. Особенности сельских электрических сетей России	11
1.2. Современное состояние возобновляемой энергетики.....	13
1.3. Анализ существующих типов систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии.....	17
1.3.1. Система электроснабжения с сетевым инвертором	17
1.3.2. Система электроснабжения с автономным инвертором	20
1.3.3. Система электроснабжения с комбинированным инвертором.....	23
1.3.4. Система электроснабжения с гибридным инвертором	24
1.4. Анализ существующих типов химических аккумуляторов.....	26
1.4.1. Свинцово-кислотные аккумуляторы.....	26
1.4.2. Щелочные аккумуляторы	29
1.4.3. Литий-ионные аккумуляторы	33
1.4.4. Натрий-ионные аккумуляторы	37
1.5. Обзор высоковольтных батарей наиболее распространённых электромобилей в России	40
1.6. Обзор вторичного применения аккумуляторов электромобилей в системах электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии.....	46
Выводы по первой главе.....	48
Глава 2. Теоретическое обоснование деградации литий-ионных аккумуляторов и проведение рекогносцировочных экспериментов	49
2.1. Исследование механизма деградации литий-ионных аккумуляторов.....	49
2.2. Методика подбора и оценки технического состояния вторично используемых аккумуляторных модулей.....	51
2.3. Проведение рекогносцировочного исследования параметров аккумуляторных модулей и анализ полученных данных	55
2.3.1. Влияние конечного напряжения разряда на энергоёмкость	58
2.3.2. Влияние зарядного напряжения на энергоёмкость и скорость заряда	60
2.4. Методика проведения экспериментального исследования по выявлению оптимального диапазона рабочих напряжений литий-ионных аккумуляторов ..	67
Выводы по второй главе	70

Глава 3. Прогнозирование деградации энергоёмкости литий-ионных аккумуляторов при циклическом режиме эксплуатации	72
3.1. Исключение аномальных значений, проверка однородности дисперсий и объединение результатов параллельных опытов	72
3.2. Определение вида, параметров уравнений регрессии и оценка достоверности полученных результатов	77
3.3. Анализ коэффициентов полезного действия циклов «заряд-разряд» плеч аккумуляторных модулей при различных диапазонах напряжений	86
Выводы по третьей главе.....	89
Глава 4. Разработка технических решений по оптимизации изготовления и применения аккумуляторных батарей для стационарного хранения энергии.....	90
4.1. Конструкции и применение аккумуляторных батарей, изготовленных из аккумуляторных модулей в установках электроснабжения с ВИЭ	90
4.2 Модернизация источников бесперебойного питания для применения в установках электроснабжения с ВИЭ совместно с батареями из аккумуляторных модулей	96
4.3. Техничко-экономическое сравнение различных типов химических аккумуляторов с аккумуляторными модулями для использования в системах электроснабжения с ВИЭ	100
4.4. Электроснабжение сельского дома с применением возобновляемых источников энергии.....	103
Выводы по четвёртой главе.....	109
Заключение	110
Список литературы.....	113
Приложения	134

Введение

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 [89].

Возможным решением, способным повысить энергоэффективность и надёжность электроснабжения сельских потребителей, а также снизить финансовые затраты на электроэнергию является применение возобновляемых источников энергии [51, 60]. 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 [34].

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 [154]. 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 аккумулирования 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.

Область исследований. Диссертация соответствует пункту 9 паспорта специальности 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса: Энергоустановки, электростанции и энергетические комплексы на базе возобновляемых видов энергии для объектов АПК и социальной сферы на селе [66]. Рассматриваемая тема входит в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации [94]. Также, данная тема входит в перечень критических технологий Российской Федерации [95].

Глава 1. Анализ состояния вопроса, постановка цели и задач исследования

1.1. Особенности сельских электрических сетей России

Сельские электрические сети России, являющиеся неотъемлемой частью единой энергосистемы страны, имеют ряд существенных отличий от городских и промышленных электросетей. Так, электроснабжение сельских потребителей осуществляется преимущественно по низковольтным сетям с номинальным напряжением 0,4 кВ, причём воздушные линии электропередачи (ВЛ) преобладают над кабельными линиями (КЛ).

Большая часть сельских электрических сетей была спроектирована ещё в шестидесятых-семидесятых годах 20 века, на настоящее время существенно устарела и перестала соответствовать современному уровню потребления электроэнергии, поскольку с тех пор средняя установленная мощность увеличилась примерно в пять раз, т.е. с 1,3 кВт до 6,5 кВт на каждое подворье [28].

В сельских электрических сетях с напряжением 0,4 кВ используются преимущественно радиальные тупиковые, радиальные с отпайками и магистральные схемы электроснабжения без применения сетевого резервирования, а питание, в большинстве случаев, обеспечивается от одного источника, причём местные источники электроэнергии практически не применяются, что снижает надёжность электроснабжения потребителей [28, 16, 14].

Воздушные распределительные сети класса напряжения 0,4 кВ, обеспечивающие электроснабжение сельских территорий, имеют совокупную протяжённость более 800 тысяч километров, т.е. около 32% от общей протяжённости воздушных линий электропередачи в стране [31].

Анализ параметров линий электропередачи с напряжением 0,4 кВ, расположенных на территории двадцати регионов Центрального федерального округа России, показал, что их средняя длина составляет 787 метров, а в отдельных регионах более 70% линий эксплуатируются дольше 35 лет и характеризуются высокой степенью износа (свыше 75%) [16, 28, 14].

Например, на территории Орловской области максимально допустимой длине линии до наиболее удалённой точки в 500 метров (согласно Положению ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе») соответствуют 190 из 406 линий (рисунок 1.1) [28].

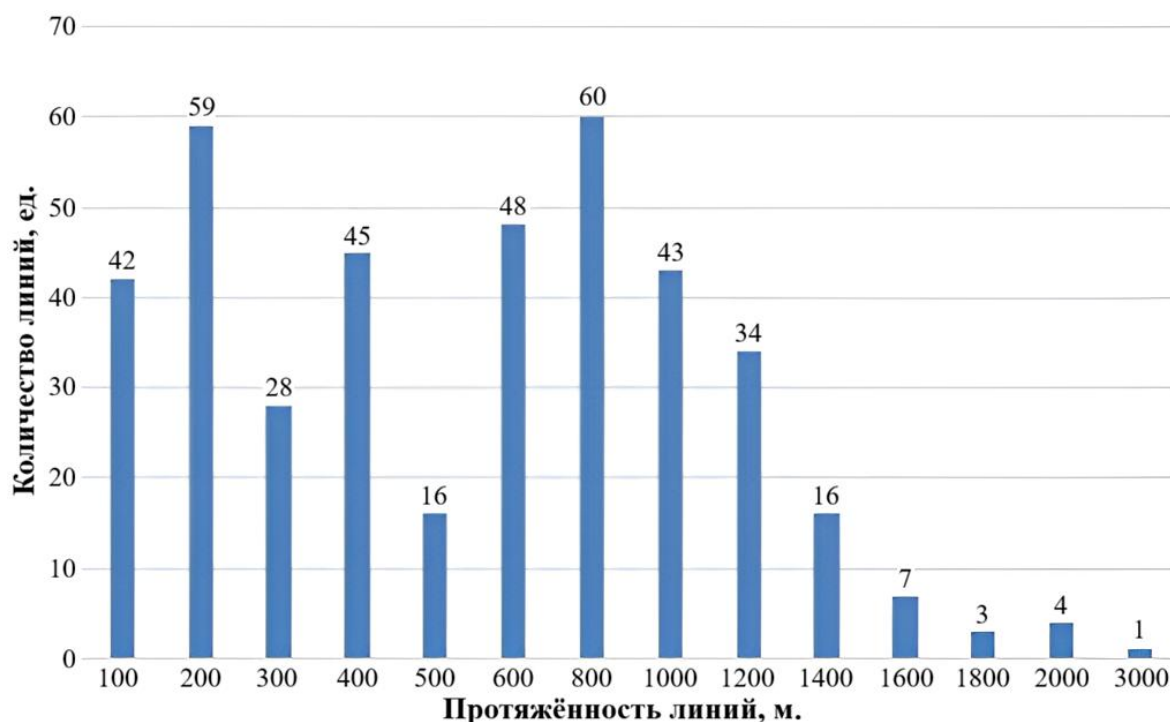


Рисунок 1.1 – Протяжённость ВЛ 0,4 кВ до наиболее удалённой точки [15, 17]

Основной причиной большой длины сельских ВЛ 0,4 кВ является низкая единичная мощность и высокая рассредоточенность потребителей. Так, для сельской местности характерна плотность электрических нагрузок 5–10 кВт/км², но в отдельных районах она может составлять до 20 кВт/км² [28, 73].

Большая протяжённость сельских воздушных линий 0,4 кВ в совокупности с их высоким износом, чувствительностью к внешним негативным воздействиям (в том числе из-за выполнения линий неизолированными алюминиевыми проводами с заниженным сечением) делает их наиболее ненадёжным элементом в системе электроснабжения сельских территорий [15, 28]. Количество отказов на 100 километров линий зачастую исчисляется десятками случаев в течение года, а время восстановления электроснабжения может достигать восьми часов и более, что приводит к недоотпускам электрической энергии, ущербы от которых могут превышать 300 руб./кВт*ч [16].

Также, из-за большой длины линий, заниженного сечения проводов, большого количества однофазных нагрузок и неравномерности их распределения по фазам (несимметрии) растут потери и падение напряжения в линии, а аппараты защиты, установленные в начале линии, не срабатывают при удалённых коротких замыканиях, что повышает пожарную опасность и увеличивает вероятность поражения людей и животных электрическим током [28, 73, 16].

Кроме того, для сельских сетей 0,4 кВ характерно неравномерное распределение отключений в течение года: анализ частоты отключений показал существенное увеличение их числа в летние месяцы, что по всей видимости связано с ростом нагрузок в период дачного сезона. Так, в течение лета число отключений в 2,4 раза выше чем зимой, а также примерно вдвое больше чем весной или осенью [18].

Текущее состояние сельских электрических сетей свидетельствует о необходимости проведения мероприятий по их модернизации для увеличения надёжности электроснабжения и повышения параметров качества электроэнергии, поставляемой сельским потребителям. Требуется ремонт или замена изношенного оборудования и применение самонесущих изолированных проводов достаточного сечения взамен устаревших неизолированных. Наконец, необходимо сокращение протяжённости линий электропередачи от центра питания до наиболее удалённых точек, внедрение резервирования, а также применение местных, и, в том числе, возобновляемых источников энергии.

1.2. Современное состояние возобновляемой энергетики

За последние десятилетия активного развития мировая энергосистема претерпела ряд существенных изменений. В связи с ростом негативного антропогенного воздействия на окружающую среду, снижением запасов и ростом стоимости ископаемых топлив особое внимание уделяется применению возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Немаловажную роль в распространении возобновляемых источников энергии играют такие факторы как их неисчерпаемость и экономическая целесообразность применения, а также повышение энергетической безопасности страны.

Выраженный рост числа установок на основе ВИЭ, их установленной мощности, а также рост доли электроэнергии, вырабатываемой такими установками, является характерной особенностью современной электроэнергетики [33]. С 2012 года общемировой объём ввода мощностей возобновляемых источников энергии стабильно превышает объём ввода традиционной электроэнергетики, а в 2021 году ВИЭ обеспечили прирост 84% генерирующих мощностей [19].

Следует отметить устойчивое общемировое снижение стоимости наиболее численно распространённых и активно развивающихся технологий ВИЭ – ветроэнергетических и фотоэлектрических установок, а также литий-ионных аккумуляторов, необходимых для накопления вырабатываемой энергии. Так, за период с 2013 по 2023 годы средневзвешенная стоимость ветроустановок сократилась в 1,6 раза, солнечных батарей – в 2,6 раза, а литий ионных аккумуляторов – в 5 раз (рисунок 1.2).

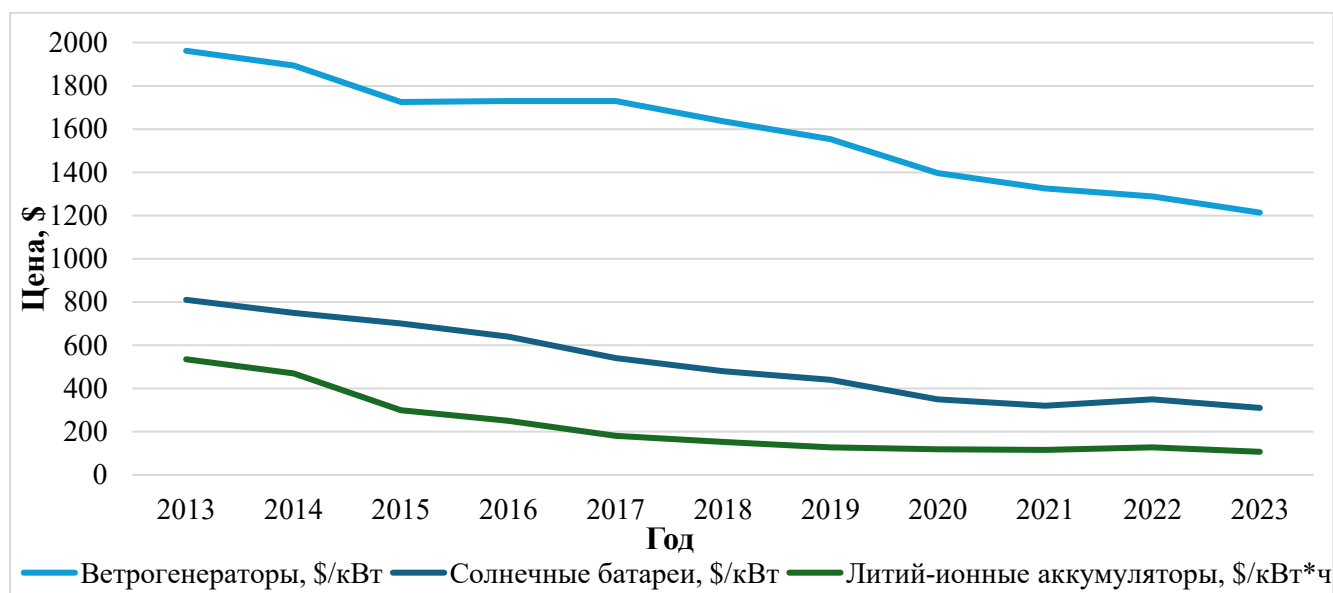


Рисунок 1.2 – Средневзвешенная стоимость солнечных батарей, ветрогенераторов и литий-ионных аккумуляторов с 2013 по 2023 годы [132, 144, 13]

Стоимость киловатта установленной мощности ГЭС (на данный момент являющихся ВИЭ с наибольшей установленной мощностью в мире) за период с 2010 по 2022 годы, напротив, увеличилась более чем вдвое – с 1407 до 2881 доллара

[141]. Это послужило одной из причин снижения доли ГЭС в мировой установленной электрической мощности за период с 2012 по 2021 годы с 17,9% до 15,4% [19]. Несмотря на это, за период с 2012 по 2021 годы мировая установленная электрическая мощность ГЭС всё же выросла с 0,98 до 1,23 ТВт. По состоянию на 2021 год ГЭС обеспечивали около 15% от мировой выработки электроэнергии.

За период с 2012 по 2021 годы, мировая установленная мощность возобновляемых источников энергии удвоилась, а установленная мощность фотоэлектрических станций за тот же период увеличилась более чем в 8 раз [19, 121]. Доля выработки электроэнергии ветроэнергетическими и фотоэлектрическими установками в мировом энергобалансе также растёт, в 2021 году достигнув 6,6% и 3,6% соответственно [19, 111]. Диаграмма общемирового энергетического баланса с учётом доли ВИЭ представлена на рисунке 1.3.

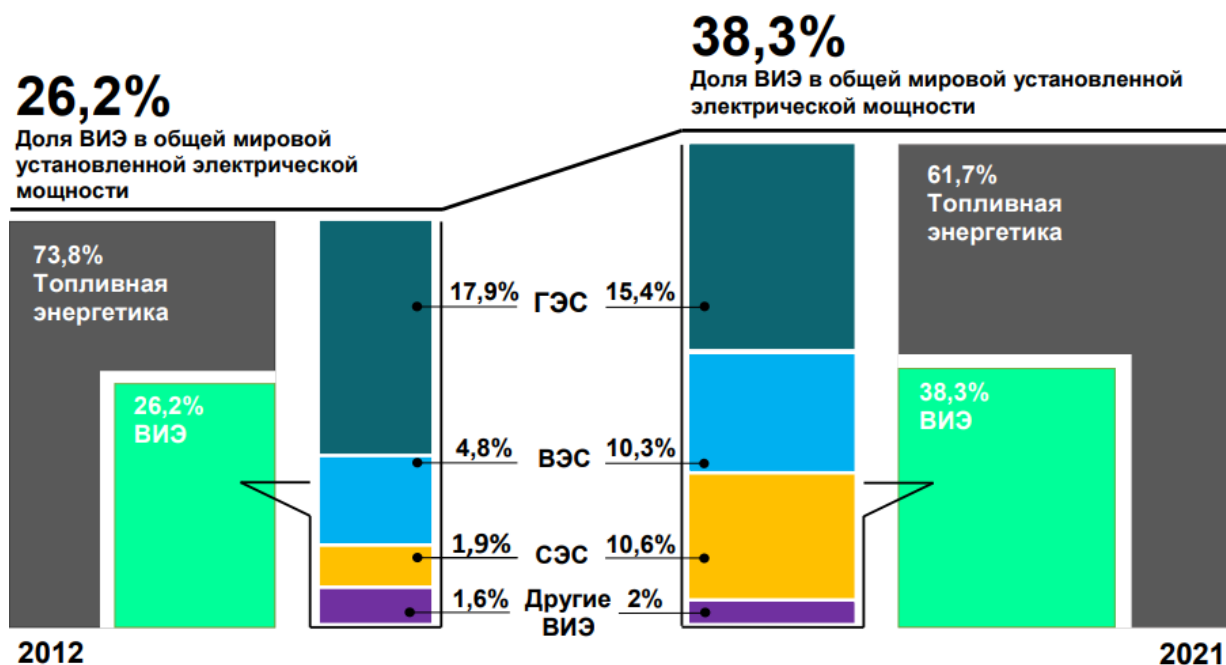


Рисунок 1.3 – Доля возобновляемых источников энергии в общей установленной электрической мощности мировой энергосистемы [121, 19]

Согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 года, недостаточное применение возобновляемых источников энергии является одной из основных проблем в области формирования топливно-энергетического баланса, а увеличение доли нетопливной энергетики является актуальной задачей [70].

За период с 2012 по 2021 годы доля ежегодно вводимых в эксплуатацию мощностей объектов генерации на основе ВИЭ в нашей стране постоянно росла, превысив в 2021 году отметку 44% без учёта крупных ГЭС, доля которых составила около 7%. Доля установленной электрической мощности ВИЭ (без учёта ГЭС) в России за период с 2012 по 2021 год, оставаясь весьма низкой в абсолютных величинах, увеличилась с 0,05% до 1,65%, что означает более чем тридцатикратный рост [121, 19]. По показателю установленной мощности среди ВИЭ (без учёта крупных ГЭС) по данным 2021 года в России лидируют ВЭС, на долю которых приходилось 38,4%. СЭС обеспечивали 37,3%, а малые гидроэлектростанции – 21,8%. Долю всех прочих ВИЭ, имевших суммарный показатель 2,5% можно считать незначительной [19]. Доля выработки СЭС и ВЭС в энергетическом балансе России, оставаясь весьма низкой, продолжает расти (рисунок 1.4).

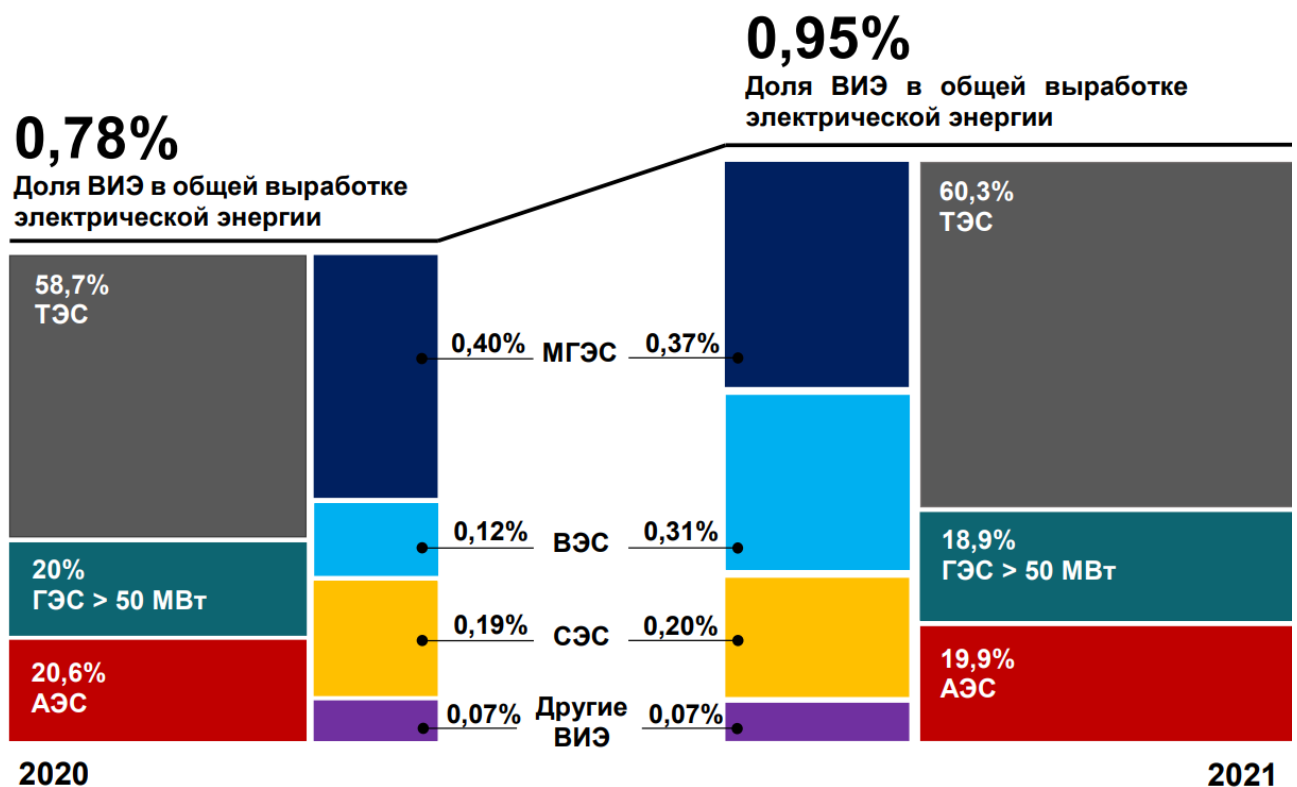


Рисунок 1.4 – Доля возобновляемых источников энергии в общей выработке электроэнергии в России [121, 19]

Поскольку параметры электроэнергии, вырабатываемой возобновляемыми источниками энергии в большинстве случаев не соответствуют требованиям потребителей (величина напряжения, род тока, частота и т.д.), для дальнейшего использования полученной от ВИЭ электрической энергии необходимо применение различных преобразователей (инверторов). Рассмотрим основные типы инверторов, применяемых совместно с установками на основе ВИЭ.

1.3. Анализ существующих типов систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии

Для преобразования электрической энергии, получаемой от возобновляемых источников, в соответствующую требуемым показателям качества и пригодную для дальнейшего использования электроэнергию применяют устройства, преобразующие постоянный ток в переменный, с возможным изменением величины напряжения – инверторы.

Инвертор может представлять собой как отдельный прибор, так и являться компонентом более технически сложного устройства, например, источника бесперебойного питания. Применительно к системам электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии существует множество разновидностей инверторов.

1.3.1. Система электроснабжения с сетевым инвертором

На сегодняшний день сетевые инверторы (зависимые, ведомые сетью, grid-tie инверторы) получили широкое распространение в системах распределённой генерации. Согласно исследованию Research Nester Company прогнозируется, что к 2035 году сетевые инверторы займут около 70% рынка инверторов для фотоэлектрических систем [62].

Данные устройства предназначены для параллельной работы фотоэлектрических или ветроэлектрических установок с сетью переменного тока без использования аккумуляторных батарей (АБ). Сетевой инвертор преобразует постоянный ток от возобновляемых источников энергии в переменный ток с частотой, равной частоте питающей сети (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Схема системы электроснабжения
с grid-tie инвертором [51]

В данной системе электроснабжения однофазная или трёхфазная питающая сеть переменного тока выступает источником опорного напряжения и в случае её отключения сетевой инвертор также автоматически отключится.

В сетевых инверторах, в виду высокого входного напряжения и широкого диапазона его изменения, применяются встроенные MPPT контроллеры (от англ. «Maximum Power Point Tracking»), служащие для отслеживания точки максимальной мощности посредством регулирования напряжения и тока, что обеспечивает высокий КПД преобразования электроэнергии от ВИЭ.

Выбор системы электроснабжения с применением сетевого инвертора оправдан для сельскохозяйственных потребителей, суточный график активной нагрузки которых аналогичен суточному графику выработки электроэнергии солнечными батареями. Так, суточный график активной нагрузки установки мелкомассивного орошения в весенне-летний период имеет форму напоминающую параболу (рисунок 1.6), схожую с формой суточного графика выработки электроэнергии солнечными батареями [30].

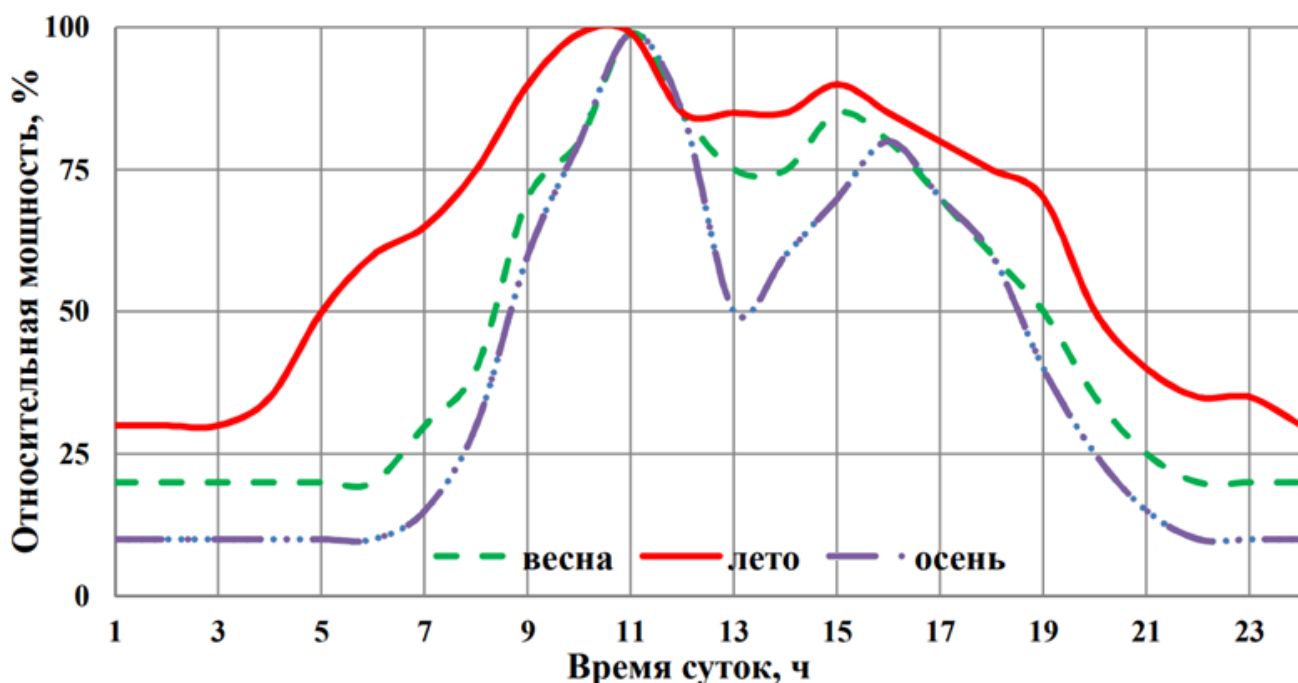


Рисунок 1.6 – Суточный график активной нагрузки установки мелкомассивного орошения [10, 11, 30]

В данном случае наибольшая часть энергии, вырабатываемой ВИЭ будет направлена на покрытие спроса, что приведёт к снижению потребления электроэнергии от централизованной системы электроснабжения и как следствие к снижению затрат на оплату электроэнергии.

Также, применение сетевого инвертора является целесообразным в случае наличия возможности подключения так называемого «зелёного тарифа» – юридического механизма, позволяющего продавать в сеть электроэнергию, полученную от ВИЭ с установленной мощностью до 15 кВт [56]. Таким образом, даже при отсутствии потребления электроэнергии объектом, электроснабжение которого выполняется с применением grid-tie инвертора, вырабатываемая солнечными батареями мощность будет востребована, а именно продана объектом микрогенерации в сеть по оптовому тарифу.

В случае отсутствия двунаправленного счётчика электроэнергии, позволяющего продавать излишки выработанной электрической энергии в сеть, при монтаже сетевого инвертора требуется установка датчика тока, необходимого для отслеживания направления тока и предотвращения экспорта электроэнергии в сеть.

Если суточный график активной нагрузки объекта электроснабжения существенно отличается от суточного графика выработки электроэнергии ВИЭ, а возможность подключения «зелёного тарифа» отсутствует, целесообразным будет применение сетевой установки с установленной мощностью, равной минимальной потребляемой мощности объекта электроснабжения. Таким образом, вырабатываемая ВИЭ мощность, покрывая лишь малую долю потребности в электроэнергии, всё же будет направлена на работу потребителей, что также снизит затраты на электроэнергию. Для решения подобных задач зачастую применяют микроинверторы – сетевые инверторы с малой выходной мощностью (от 100 Вт), рассчитанные на подключение одной солнечной батареи, причём схема системы электроснабжения с микроинвертором аналогична схеме, представленной на рисунке 1.5.

Достоинствами данной системы электроснабжения являются простота её установки и обслуживания ввиду отсутствия аккумуляторных батарей и сопутствующего оборудования, а также меньшие затраты на приобретение оборудования. Основным недостатком данной системы является невозможность работы сетевого инвертора при отсутствии опорного сетевого напряжения.

1.3.2. Система электроснабжения с автономным инвертором

Автономные установки электроснабжения на основе ВИЭ применяются, прежде всего, в условиях отсутствия централизованного электроснабжения и не могут работать без аккумуляторных батарей. В сельском хозяйстве данные установки применяют для электроснабжения полевых станков, овцеводческих точек, пасек, водоподъёмных установок и ряда аналогичных потребителей.

Наиболее распространены системы с номинальным напряжением АБ 12 и 24, реже 48 Вольт. Вырабатываемая ВИЭ электроэнергия подаётся на контроллер заряда, а затем накапливается в аккумуляторных батареях [103]. Далее, энергия от АБ подаётся на инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный с требуемой величиной напряжения для питания нагрузки (рисунок 1.7).

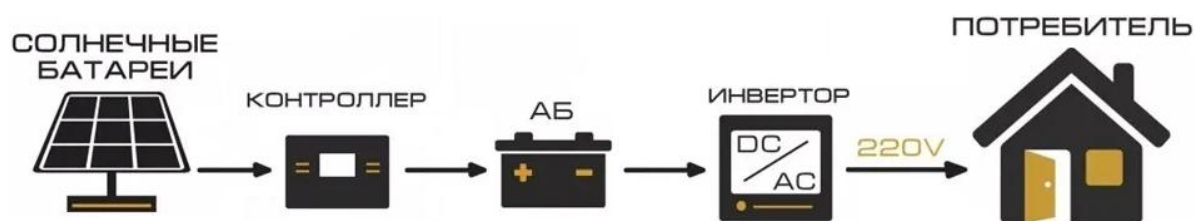


Рисунок 1.7 – Схема системы электроснабжения с автономным инвертором

Данные системы являются наиболее простыми со схемотехнической точки зрения и зачастую обладают низкой стоимостью. Исходя из стоимости имеющегося в продаже оборудования, построение таких систем обычно оправдано при малой установленной электрической мощности ВИЭ, номинальном напряжении аккумуляторных батарей 12 или 24 Вольт и применении инверторов с максимальной выходной мощностью как правило не превышающей 2 кВт. Данный способ построения допускает возможность подключения зарядного устройства к аккумуляторным батареям для их зарядки от внешнего источника питания (топливного генератора или централизованной системы электроснабжения), однако, в случае наличия такого источника зачастую более целесообразным является построение автономных установок электроснабжения с применением комбинированного инвертора.

В системе электроснабжения с автономным инвертором может быть применён как ШИМ, так и MPPT контроллер заряда аккумуляторных батарей. ШИМ контроллер регулирует величину зарядного тока посредством широтно-импульсной модуляции: по мере заряда аккумуляторных батарей контроллер уменьшает ширину импульса тока. Такие контроллеры дешёвы, широкое распространение получили модели с номинальным напряжением 12/24 Вольт и максимальной рабочей силой тока до 60 Ампер. Основным недостатком ШИМ контроллеров является низкая эффективность, зависящая в том числе от разницы напряжений источника энергии и аккумуляторных батарей: с ростом разницы напряжений эффективность снижается. Так, в случае подбора оборудования, например, для фотоэлектрической станции, солнечную батарею следует подбирать таким образом, чтобы её напряжение в точке максимальной мощности (паспортная величина) превышало, но было приближено к напряжению заряженных аккумуляторных батарей.

MPPT контроллеры заряда аккумуляторных батарей выгодно отличаются от ШИМ контроллеров более высоким КПД и широким диапазоном входного напряжения, однако их стоимость зачастую превышает стоимость ШИМ контроллеров аналогичной мощности в 2-3 раза. При выборе типа контроллера заряда для маломощных установок с автономным инвертором следует сопоставлять разницу в стоимости ШИМ и MPPT контроллеров со стоимостью увеличения мощности ВИЭ, поскольку MPPT контроллер способен увеличить выработку электроэнергии по сравнению с ШИМ не более чем на 20-30% [67, 99].

Таким образом, если разница в стоимости ШИМ и MPPT контроллеров превышает стоимость увеличения мощности ВИЭ на 20-30%, то в таком случае увеличение мощности ВИЭ позволит повысить выработку электроэнергии при меньших финансовых затратах, несмотря на более низкий КПД такой системы. На примере фотоэлектрической станции, если на сумму, равную разнице в стоимости между MPPT и ШИМ контроллерами можно приобрести солнечные батареи, суммарная мощность которых позволит повысить установленную мощность фотоэлектрического массива более чем на 20%, то в такой системе электроснабжения следует отказаться от MPPT контроллера в пользу ШИМ контроллера и увеличения мощности фотоэлектрического массива.

Такое решение позволит повысить среднегодовую выработку электроэнергии в большей степени, по сравнению с применением MPPT контроллера без увеличения установленной мощности фотоэлектрического массива при аналогичных или меньших финансовых затратах.

Основным недостатком системы электроснабжения с автономным инвертором является узкий диапазон настроек параметров системы: невозможность изменения выходного напряжения без изменения схемотехники инвертора, отсутствие возможности настройки порога конечного напряжения разряда аккумуляторных батарей (т.е. напряжения, при котором завершается разряд аккумуляторных батарей) и т.д. [23]. Достоинствами описанной системы являются её ремонтпригодность и модульность, позволяющая заменять контроллер или

инвертор по отдельности, возможность параллельного подключения к аккумуляторным батареям нескольких контроллеров заряда или инверторов для увеличения входной или выходной мощности соответственно. Также, значимым преимуществом такой системы является низкий ток холостого хода автономного инвертора, по сравнению с прочими типами инверторов.

1.3.3. Система электроснабжения с комбинированным инвертором

Комбинированный инвертор сочетает в себе функции контроллера заряда, зарядного устройства и инвертора. Как и автономный инвертор, он не может работать без аккумуляторных батарей (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Схема системы электроснабжения с комбинированным инвертором

Комбинированные инверторы целесообразно применять для электроснабжения большинства сельских потребителей как для повышения надёжности электроснабжения, так и для снижения затрат на электроэнергию. Наиболее распространены комбинированные инверторы, рассчитанные на номинальное напряжение аккумуляторных батарей 24 и 48 Вольт. Реже встречаются устройства, рассчитанные на питание от АБ с номинальным напряжением 12 Вольт, однако их максимальная выходная мощность не превышает 2 кВт, а у большинства моделей составляет 1 кВт.

Большинство современных комбинированных инверторов являются высокотехнологичными устройствами, позволяющими пользователю устанавливать приоритет источника питания нагрузки и зарядки аккумуляторных батарей, задавать рабочий диапазон напряжений АБ, изменять величину зарядного тока как от ВИЭ, так и от сети переменного тока (или топливного генератора), корректировать величину подаваемого на нагрузку переменного напряжения и т.д.

Любой комбинированный инвертор имеет встроенный ШИМ или MPPT контроллер заряда аккумуляторных батарей. Однако, стоимость комбинированных инверторов, оснащённых MPPT контроллерами, зачастую, лишь немного превышает стоимость комбинированных инверторов с ШИМ контроллерами, что в большинстве случаев делает приобретение последних нецелесообразным. Всё большее распространение на рынке комбинированных инверторов получают модели с MPPT контроллерами заряда аккумуляторных батарей, способными работать в широком диапазоне питающего напряжения от ВИЭ (около 30-400 Вольт для инверторов с номинальным напряжением аккумуляторных батарей 24 Вольт).

Ввиду широкого распространения комбинированных инверторов, в настоящее время стоимость такого устройства зачастую сопоставима с совокупной стоимостью автономного инвертора и контроллера заряда аналогичной мощности, однако, комбинированный инвертор представляет пользователю возможность настройки системы в широких пределах, что является несомненным преимуществом данного устройства. Недостатком комбинированных инверторов является больший в сравнении с автономными инверторами ток холостого хода, что ведёт к необходимости увеличения установленной мощности ВИЭ и ёмкости аккумуляторных батарей.

1.3.4. Система электроснабжения с гибридным инвертором

Гибридные инверторы представляют собой устройства, сочетающие функциональные возможности сетевых и комбинированных инверторов. Наиболее важным отличием гибридного инвертора от комбинированного является наличие функции подмешивания, позволяющей использовать в качестве основного

источника энергию, получаемую от ВИЭ, а в случае её нехватки потреблять недостающую мощность из централизованной электрической сети.

Подавляющее большинство существующих на рынке моделей рассчитаны на подключение аккумуляторных батарей с номинальным напряжением 24 или 48 Вольт. Существуют гибридные инверторы, предназначенные для работы с АБ, имеющими номинальное напряжение 12 Вольт, однако, из-за низкой мощности в совокупности с высокой стоимостью устройства, широкого распространения они не получили.

Некоторые модели гибридных инверторов имеют возможность работы без аккумуляторных батарей, однако, при данном режиме для запуска встроенного MPPT контроллера зачастую требуется более высокое напряжение источника генерации, нежели чем при работе с подключенными АБ. MPPT контроллеры гибридных инверторов рассчитаны на широкий диапазон входного напряжения (для моделей с номинальным напряжением 24 Вольт около 30-400 Вольт при работе с аккумуляторными батареями и 60-400 Вольт при работе без АБ). Режим работы без аккумуляторных батарей даёт возможность использовать гибридный инвертор в качестве grid-tie инвертора, однако, в отличие от последнего, допустимая мощность подключаемой нагрузки будет ограничена максимальной мощностью гибридного инвертора.

Наличие описанного режима работы является техническим преимуществом и при работе с аккумуляторными батареями, поскольку в случае нештатного отключения АБ от инвертора (например, при срабатывании платы защиты аккумуляторов) отсутствует вероятность выхода гибридного инвертора из строя. Так, для автономных и комбинированных инверторов отключение аккумуляторных батарей во время работы (особенно при наличии входного напряжения от ВИЭ) зачастую приводит к повреждениям устройств.

Основными недостатками, ограничивающим применение гибридных инверторов являются высокий, по сравнению с любыми другими инверторами, ток холостого хода, что ведёт к необходимости наращивания мощности ВИЭ и ёмкости аккумуляторных батарей, а также более высокая стоимость.

Поскольку для большинства типов инверторов применение аккумуляторных батарей является обязательным (как для автономных и комбинированных инверторов), или во всяком случае возможным (как для гибридных инверторов) рассмотрим основные характеристики наиболее распространённых типов аккумуляторов.

1.4. Анализ существующих типов химических аккумуляторов

По мере роста установленной мощности и доли выработки ВИЭ в общем объёме электрогенерации, объёмов рынка электротранспорта в целом и электромобилей в частности, всё большее внимание уделяется вопросам накопления энергии при помощи химических источников тока (ХИТ) [35, 106].

В настоящее время на рынке существует несколько десятков видов аккумуляторов, а по всему миру продолжают проводиться исследования по созданию химических источников тока нового поколения [4]. В зависимости от химического состава электролита, материалов катода и анода, потребительские свойства аккумуляторов могут кардинально различаться, что приводит к необходимости подбора аккумуляторных батарей не только по номинальному напряжению и ёмкости, но и по множеству параметров, включая рабочий диапазон напряжений, устойчивость к низким или высоким температурам, допустимые токи заряда и разряда, величину саморазряда, пожароопасность, срок службы, устойчивость к перезаряду, глубокому разряду и т.д. [91, 151]. Рассмотрим основные технические характеристики и особенности эксплуатации наиболее распространённых, а также перспективных типов аккумуляторов, из числа представленных на рынке.

1.4.1. Свинцово-кислотные аккумуляторы

Свинцово-кислотный аккумулятор, изобретённый в 1859 году, является старейшим представителем химических источников тока и по сей день находит широкое применение [41]. Аккумуляторные кислотные батареи (АКБ) являются наиболее распространённым типом стартерных батарей в автомобильном транспорте, зачастую применяются на железнодорожном транспорте, в различных

транспортно-технологических машинах, например, в электроштабелёрах и электропогрузчиках, используются в источниках бесперебойного питания и системах электроснабжения с ВИЭ. Напряжение заряженного свинцово-кислотного аккумулятора составляет около 2,15 Вольт, разряженного – 1,75 Вольт, номинальное напряжение – 2 Вольт [22]. Зарядка аккумулятора при циклическом режиме эксплуатации обычно выполняется напряжением от 2,40 до 2,68 Вольт [27].

Принцип работы аккумуляторов данного типа заключается в накоплении энергии посредством химической окислительно-восстановительной реакции отрицательного электрода, выполненного из губчатого свинца, и положительного электрода, представляющего собой свинцовую рамку с впрессованной в неё активной массой из диоксида свинца. Реакция происходит в электролите, представляющем собой раствор серной кислоты, плотность которого составляет около 1,27–1,29 г/см³ и может быть скорректирована в зависимости от температурных условий эксплуатации [24]. В случае эксплуатации батареи на открытом воздухе, плотность электролита корректируют исходя из средней температуры самого холодного месяца в году: при использовании в условиях холодного климата плотность электролита повышают в целях недопущения его замерзания, а при работе в тёплом климате, напротив, понижают для снижения коррозионного воздействия на материалы катода и анода [47, 9, 22].

По конструкции выделяют обслуживаемые свинцово-кислотные аккумуляторы, позволяющие выполнять доливку дистиллированной воды для компенсации потерь её испарения из электролита, и необслуживаемые. Для улучшения эксплуатационных характеристик свинцово-кислотных аккумуляторов зачастую применяют легирование электродов сурьмой, кальцием и углеродом [29, 36, 39].

Исходя из особенностей применённого электролита, АКБ разделяют на батареи с жидким электролитом, батареи с пропитанными электролитом стекловолоконными матами (AGM, от англ. «Absorbent Glass Mat») и батареи с загущенным, гелеобразным электролитом (Gel). Выполненные по технологии AGM батареи отличаются наличием пористых гигроскопичных матов, расположенных между пластинами положительных и отрицательных электродов.

АКБ, выполненные по технологии Gel, отличаются гелеобразным электролитом, в качестве загустителя для которого обычно применяют двуокись кремния [82, 97].

В свинцово-кислотных аккумуляторах, изготовленных по технологиям AGM и Gel как правило применяется легирование пластин кальцием, что позволяет снизить вызванные электролизом потери воды из электролита и сделать аккумуляторы необслуживаемыми. При этом, за счёт отсутствия в AGM и Gel аккумуляторах электролита в жидком виде, для них характерно меньшее расслоение электролита по сравнению с аккумуляторами, в которых применяется жидкий электролит, что способствует более равномерному прохождению окислительно-восстановительной реакции по всей площади электродов [137]. Следует отметить, что на сегодняшний день наиболее распространённым накопителями энергии в источниках бесперебойного питания и системах электроснабжения с применением ВИЭ являются свинцово-кислотные батареи, как правило выполненные по технологиям AGM и GEL [48, 74, 138, 114].

Достоинства свинцово-кислотных аккумуляторов заключаются в устойчивости к перезаряду и как следствие отсутствию необходимости применения плат защиты аккумуляторов, низкой стоимости (особенно аккумуляторов с жидким электролитом), устойчивости к низким температурам, наличии отработанных и экономически-целесообразных технологий переработки для получения вторичного свинца [7, 57].

К недостаткам свинцово-кислотных аккумуляторов относятся ускоренная деградация ёмкости при глубоких разрядах и хранении в разряженном состоянии [124, 139], снижение ёмкости при регулярном недозаряде вследствие сульфатации [41, 69, 125], низкий ток заряда (при превышении тока заряда выше 1/10 от ёмкости снижается срок службы аккумулятора и происходит более активный электролиз, приводящий к большему выделению гремучего газа), низкий эффективный ток разряда (при длительном превышении тока разряда свыше 1/10 от ёмкости снижается отданная ёмкость и падает ресурс эксплуатации аккумулятора), низкий КПД цикла «заряд-разряд» (около 70-80%), а также низкая плотность хранения энергии (около 30-45 Вт·ч/кг) [84, 88, 117]. Основные характеристики свинцово-кислотных аккумуляторов представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные характеристики свинцово-кислотных аккумуляторов

Критерий сравнения	Аккумуляторы с жидким электролитом	Аккумуляторы AGM	Аккумуляторы Gel
Техническое обслуживание	Измерение уровня электролита и долив дистиллированной воды	Не требуется	Не требуется
Число циклов «заряд-разряд»	250–1400	250–1400	250–1400
Удельная энергоёмкость, Вт·ч/кг	30–45	30–45	30–45
Номинальное напряжение, В	2,0	2,0	2,0
Зарядное напряжение, В	2,40–2,68	2,40–2,68	2,40–2,68
Конечное напряжение разряда, В	1,75	1,75	1,75
Саморазряд за месяц, %	3–5	2–3	2–3
Ток заряда	0,1–0,15С	0,1–0,15С	0,1–0,15С
Ток разряда	0,1–0,2С	0,1–0,2С	0,1–0,2С
КПД, %	70–80	70–80	70–80
Требования безопасности	Установка в проветриваемом помещении, контроль зарядного напряжения	Контроль зарядного напряжения	Контроль зарядного напряжения
Стоимость	Низкая	Средняя	Высокая

Основываясь на ключевых эксплуатационных характеристиках свинцово-кислотных аккумуляторов следует констатировать, что данный тип накопителей энергии морально устарел и будет постепенно заменяться новыми, более совершенными типами аккумуляторов. Однако, можно предположить, что благодаря низкой стоимости в совокупности с широким диапазоном допустимых температур эксплуатации и устойчивости к перезаряду, свинцово-кислотные батареи ещё долгое время будут востребованы в сферах применения и режимах работы, не предусматривающих частых и глубоких циклов «заряд-разряд», например, в качестве стартерных батарей в автомобильном транспорте.

1.4.2. Щелочные аккумуляторы

Щелочные аккумуляторы представляют собой группу накопителей энергии, электролитами в которых выступают водные растворы щелочей, преимущественно гидроксидов калия или натрия с добавлением гидроксида лития. Характерной особенностью щелочных ХИТ является низкое рабочее напряжение: около 1,4 Вольт в полностью заряженном и 1-0,9 Вольт в полностью разряженном состоянии.

Зарядка щелочных аккумуляторов, как правило, должна выполняться током, равным $1/5$ ёмкости аккумулятора ($0,2C$) до напряжения 1,6 Вольт, в течение не более 8 часов [24, 21, 26]. Наибольшее распространение получили никель-кадмиевые, никель-железные и никель-металлгидридные аккумуляторы.

В никель-кадмиевых (Ni-Cd) ХИТ активная масса отрицательного электрода состоит преимущественно из измельчённого металлического кадмия. Активной массой положительного электрода зачастую выступает оксид никеля (III) – Ni_2O_3 . При изготовлении электродов анодная и катодная активные массы помещаются в перфорированные тонкостенные стальные никелированные оболочки, которые, в свою очередь, размещаются в стальной никелированной решётке. Во время зарядки происходит окисление кадмия до гидроксида, а при разряде – восстановление до металла [12, 81].

Важной характерной особенностью никель-кадмиевых аккумуляторов является возможность длительного хранения в разряженном состоянии без значимого снижения эксплуатационного ресурса. Кроме того, к достоинствам данного элемента питания относятся устойчивость к перезаряду, способность выдерживать высокие зарядные и разрядные токи, длительный ресурс эксплуатации и возможность работы в широком диапазоне температур [24].

Несмотря на преимущества никель-кадмиевых аккумуляторов, в настоящее время распространённость накопителей данного вида снижается, что вызвано рядом нерешённых проблем этой технологии хранения энергии. Так, никель-кадмиевые аккумуляторы подвержены «эффекту памяти» – снижению полезной ёмкости при частичном разряде и последующем заряде, а также при работе в буферном режиме [53]. Т.е. для эффективной работы аккумуляторы данного вида следует полностью разряжать, что существенно снижает возможность их широкого применения. Кроме того, токсичность кадмия накладывает ограничения на производство данных ХИТ [20]. Помимо прочего, КПД цикла «заряд-разряд» никель-кадмиевого аккумулятора не превышает 60-65%, существенно уступая в эффективности прочим ХИТ [8].

Никель-железные аккумуляторы отличаются от никель-кадмиевых аккумуляторов активной массой отрицательного электрода, состоящей из очищенного железного порошка, при этом электрохимические реакции, протекающие в данных ХИТ аналогичны. Будучи близки по эксплуатационным свойствам к никель-кадмиевым аккумуляторам, никель-железные аккумуляторы дешевле в производстве и представляют меньшую опасность для человека и окружающей среды за счёт отсутствия токсичного кадмия, благодаря чему в настоящее время получили большее распространение, в том числе на железнодорожном транспорте и в военной технике [50, 75].

Никель-металлгидридные (Ni-MH) аккумуляторы по своему химическому составу и общему виду протекающих во время заряда и разряда реакций схожи с ранее описанными щелочными ХИТ, отличаясь материалом активной массы, представляющим собой металлгидридный сплав, способный поглощать и выделять водород. В отличие от никель-кадмиевых и никель-железных, никель-металлгидридные аккумуляторы могут быть более устойчивы к низким температурам, что способствовало их широкому распространению в портативной электронике [54, 93].

Никель-металлгидридные аккумуляторы были разработаны в качестве альтернативы прочим щелочным ХИТ: при несколько меньшем эксплуатационном ресурсе у них отсутствует «эффект памяти», более высокая плотность хранения энергии (60-80 Вт*ч/кг против 40-60 Вт*ч/кг у Ni-Cd и никель-железных аккумуляторов), более высокий КПД цикла «заряд-разряд», а в составе отсутствует токсичный кадмий [50, 85].

Однако, по сравнению с прочими щелочными ХИТ, Ni-MH аккумуляторы плохо переносят глубокие разряды и хранение в разряженном состоянии, хуже переносят перезаряд, имеют меньшие допустимые токи заряда и разряда, а также обладают большей стоимостью [50, 85]. Благодаря совокупности имеющихся свойств, в особенности номинальному напряжению, возможности изготовления герметичной конструкции и отсутствию эффекта памяти Ni-MH аккумуляторы применяются в качестве замены первичных ХИТ в портативной электронике. Основные характеристики щелочных аккумуляторов представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Основные характеристики щелочных аккумуляторов

Критерий сравнения	Никель-кадмиевые аккумуляторы	Никель-железные аккумуляторы	Никель-металлогидридные аккумуляторы
Техническое обслуживание	Проведение цикла «заряд–разряд» для устранения эффекта памяти	Замена электролита, проведение цикла «заряд–разряд» для устранения эффекта памяти	Не требуется
Число циклов «заряд–разряд»	500–1000	500–1000	350–750
Удельная энергоёмкость, Вт·ч/кг	40–60	40–60	60–80
Номинальное напряжение, В	1,2	1,2	1,2
Зарядное напряжение, В	1,45	1,45	1,45
Конечное напряжение разряда, В	0,9–1	0,9–1	0,9–1
Саморазряд за месяц, %	10	10–15	15
Ток заряда	0,2С	0,2С	0,2С
Ток разряда	0,2С	0,2С	0,2С
КПД, %	60-65	60-65	70-75
Требования безопасности	Контроль зарядного напряжения	Контроль зарядного напряжения	Контроль зарядного напряжения
Стоимость	Средняя	Средняя	Средняя

Учитывая основные эксплуатационные параметры щелочных аккумуляторов следует отметить, что применение накопителей энергии данного типа для решения технических задач, ставящих высокие требования к энергоэффективности (из-за низкого КПД цикла «заряд–разряд») и длительности хранения энергии (из-за высокого саморазряда) не целесообразно.

При этом, никель-кадмиевые и никель-железные аккумуляторы, за счёт своей надёжности, неприхотливости к условиям эксплуатации и простоте обслуживания, благодаря возможности хранения в разряженном состоянии, устойчивости к перезаряду и отсутствию необходимости применения дорогостоящей электроники ещё долгое время могут оставаться востребованы на железнодорожном транспорте, в горнодобывающей промышленности и военной технике [75, 64].

1.4.3. Литий-ионные аккумуляторы

Литий-ионные аккумуляторы, промышленное производство которых началось лишь в 1991 году, в настоящее время получили широкое распространение и активно вытесняют прочие химические источники тока [59, 63].

Литий-ионный аккумулятор состоит из положительного электрода, как правило представляющего собой алюминиевую подложку с нанесённым на неё катодным материалом, отрицательного электрода, обычно изготавливаемого из медной фольги с нанесённой на неё анодным материалом, сепаратора, разделяющего электроды и электролита [2]. Литий-ионные аккумуляторы изготавливаются герметичными, но могут быть оснащены защитным клапаном, служащим для аварийного сброса излишнего давления.

Основным анодным материалом в большинстве видов литий-ионных аккумуляторов выступает графит, графен и прочие формы углерода [46]. Роль катодного материала зачастую выполняют оксиды и фосфаты различных металлов [90]. В качестве электролитов применяют органические растворители [5].

Принцип работы литий-ионного аккумулятора основан на способности иона лития во время заряда аккумулятора переходить из активной массы катода в электролит, а затем совершать интеркаляцию, т.е. внедряться в кристаллическую решётку материалов анода с образованием химических связей. При разряде аккумулятора направление реакции меняется на противоположное [2].

Существует множество видов литий-ионных аккумуляторов с различными эксплуатационными свойствами, зависящими не только от применённых материалов анода и катода, но и от их пропорций, что накладывает ограничения на создание точной классификации. Наименование конкретного вида литий-ионного аккумулятора чаще всего определяет состав активной массы положительного электрода: литий-кобальт оксидные (LiCoO_2), литий-никель-марганец-кобальт-оксидные (LiNiMnCoO_2), литий-марганец-оксидные (LiMn_2O_4), литий-железо-фосфатные (LiFePO_4) и т.д. Однако, название литий-титанатного аккумулятора обусловлено материалом активной массы отрицательного электрода ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), а материалом активной массы положительного электрода обычно выступает графит или прочие формы углерода [87, 90].

Литий-кобальт-оксидные (LCO) аккумуляторы являются одними из наиболее распространённых среди литий-ионных аккумуляторов и активно применяются в портативной электронике и мобильных устройствах [42]. Они имеют высокую плотность хранения энергии (150-200 Вт*ч/кг) и сравнительно низкую стоимость. К недостаткам LCO аккумулятора относятся низкий длительно-допустимый ток заряда и разряда, который не должен превышать его ёмкость (ток 1С), меньший по сравнению с прочими литий-ионными аккумуляторами ресурс эксплуатации, пожароопасность при сильном перезаряде или механическом повреждении корпуса, а также относительно высокое содержание в составе токсичного кадмия, стоимость которого в последние годы активно растёт [90, 87].

Для литий-марганец-оксидных (LMO) аккумуляторов характерны высокие допустимые токи заряда (до 3С) и разряда (до 3-10С), а также относительно низкая стоимость, благодаря чему они нашли широкое применение в электроинструменте. Однако, ресурс эксплуатации LMO аккумуляторов ниже, чем у всех прочих видов литий-ионных аккумуляторов, плотность хранения энергии составляет около 100-150 Вт*ч/кг, а при перезаряде или механическом повреждении существует риск возгорания, хоть и меньший, по сравнению с LCO аккумуляторами [87, 46].

Литий-никель-марганец-кобальт-оксидные (NMC) аккумуляторы имеют высокую плотность хранения энергии (150-250 Вт*ч/кг), длительный срок эксплуатации и представляют меньшую пожарную опасность по сравнению с ранее описанными литий-ионными аккумуляторами, что позволяет применять данный вид аккумуляторов в электротранспорте [87, 3].

Номинальное напряжение ранее описанных литий-ионных аккумуляторов составляет около 3,7 Вольт, при минимальном напряжении 2,5-3,0 Вольт и максимальном около 4,2 Вольт. Из-за практически идентичных диапазонов рабочих напряжений, а также схожести прочих параметров LCO, LMO и NMC аккумуляторов при изготовлении батарей из данных аккумуляторов применяют идентичные платы защиты и балансировки.

Литий-железо-фосфатные (LFP) аккумуляторы отличаются номинальным напряжением, составляющим 3,2 Вольт, при этом напряжение полностью заряженного аккумулятора составляет около 3,65 Вольт, а полностью разряженного – около 2,5 Вольт. LFP аккумуляторы не представляют пожарной опасности, что в совокупности с высокими токами заряда и разряда, приемлемой ценой и заявленным ресурсом эксплуатации в диапазоне от 2000 до 6000 циклов (что в разы превышает ресурс ранее описанных типов аккумуляторов) делает их востребованными накопителями энергии в источниках бесперебойного питания и установках на основе ВИЭ. Наиболее значимым недостатком литий-железо-фосфатных аккумуляторов является сравнительно низкая плотность хранения энергии, составляющая 120-200 Вт*ч/кг [87, 102, 130].

Литий-титанатные (LTO) аккумуляторы выделяются среди прочих типов аккумуляторов наиболее высокими допустимыми токами заряда и разряда, вплоть до 10С, а также огромным ресурсом эксплуатации, который может превышать 10 тысяч циклов «заряд-разряд». Однако, распространение LTO аккумуляторов ограничивает наибольшая среди существующих типов аккумуляторов стоимость, а также низкая плотность хранения энергии, составляющая 50-80 Вт*ч/кг [87, 3]. Типичный диапазон рабочих напряжений литий-титанатных аккумуляторов находится в пределах 2,75-1,8 Вольт при номинальном напряжении 2,3-2,4 Вольт. Основные характеристики литий-ионных аккумуляторов представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Основные характеристики литий-ионных аккумуляторов

Критерий сравнения	LCO аккумуляторы	LMO аккумуляторы	NMC аккумуляторы	LFP аккумуляторы	LTO аккумуляторы
Техническое обслуживание	Не требуется	Не требуется	Не требуется	Не требуется	Не требуется
Число циклов «заряд-разряд»	500–1000	300–700	До 2000	2000–6000	7000–10000
Удельная энергоёмкость, Вт·ч/кг	150–200	100–150	150–250	120–200	50–80
Номинальное напряжение, В	3,6–3,7	3,7	3,6–3,7	3,2	2,3–2,4
Зарядное напряжение, В	4,2	4,2	4,2	3,65	2,75
Конечное напряжение разряда, В	2,8–3,0	2,8–3,0	2,8–3,0	2,5	1,8
Саморазряд за месяц, %	1–3	1–3	1–3	1–3	1–3
Ток заряда	1С	1С	1С	1С	1–5С
Ток разряда	1С	3–10С	1–2С	2С	10С
КПД, %	95	95	95	95	95
Требования безопасности	Установка платы BMS	Установка платы BMS	Установка платы BMS	Установка платы BMS	Установка платы BMS
Стоимость	Средняя	Средняя	Средняя	Выше средней	Высокая

Таким образом, для литий-ионных аккумуляторов характерны высокий КПД цикла «заряд-разряд», низкий саморазряд и устойчивость к циклированию [44, 45]. Однако, все литий-ионные аккумуляторы чувствительны к перезаряду и глубокому разряду, что влечёт за собой необходимость применения плат защит [126].

В этих целях применяются платы «BMS» (от англ. Battery Management System) – системы управления батареями. Основное назначение BMS заключается в отслеживании напряжения каждого из последовательно соединённых аккумуляторов в батарее, а также в контроле зарядного и разрядного токов. Когда напряжение одного из аккумуляторов превышает установленное значение, плата размыкает цепь заряда батареи, однако не препятствует её разряду. При снижении напряжения одного из аккумуляторов ниже установленного порога плата BMS размыкает цепь разряда, при этом не препятствуя заряду батареи. При превышении заданной величины тока заряда или разряда, плата BMS также размыкает цепь заряда или разряда соответственно.

Для обеспечения длительной и безотказной работы литий-ионных аккумуляторных батарей применяют устройства, выравнивающие напряжения аккумуляторов в батарее – балансиры. Существуют пассивные балансиры, принцип работы которых заключается в параллельном подключении резисторов к наиболее заряженным аккумуляторам батареи на завершающем этапе заряда, что позволяет не допустить их перезаряд, а также даёт возможность дозарядить наименее заряженные аккумуляторы.

К преимуществам пассивных балансиров относится их низкая стоимость и простота конструкции, но при работе пассивные балансиры расходуют энергию, направленную на заряд батареи, что снижает эффективность цикла «заряд-разряд».

Однако, в настоящее время существуют активные балансиры, способные перераспределять энергию между последовательно соединёнными аккумуляторами, перенося заряд от наиболее заряженных к наименее заряженным аккумуляторам, тем самым выравнивая их напряжения. В отличие от пассивных балансиров, активные балансиры работают непрерывно, что позволяет обеспечить наименьшую разницу напряжений между аккумуляторами батареи и повысить энергоэффективность её работы.

На данный момент, литий-ионные аккумуляторы являются наиболее совершенным типом аккумуляторов с отработанными технологиями производства, налаженными каналами сбыта и изученными способами утилизации [55]. Благодаря совокупности параметров, (в частности, высокой плотности хранения энергии, эксплуатационному ресурсу и допустимой скорости заряда и разряда) литий-ионные аккумуляторы успешно вытесняют свинцово-кислотные и щелочные аккумуляторы из многих сфер применения, включая резервные и автономные источники питания [3, 98, 83, 105].

1.4.4. Натрий-ионные аккумуляторы

Натрий-ионные аккумуляторы являются новейшими и наименее изученными химическими источниками тока из числа представленных на рынке аккумуляторов.

Одним из факторов, повлиявших на запуск производства натрий-ионных аккумуляторов, стал рост стоимости сырья, необходимого для производства литий-ионных аккумуляторов, повлекший повышение интереса к исследованиям, посвящённым созданию аккумуляторов на основе натрия, как более дешёвого и распространённого щелочного металла [108, 122]. Характерной особенностью натрий-ионных аккумуляторов (как и литий-ионных) является существование множества комбинаций химических составов и технологий производства электролитов, а также материалов анода и катода.

Основы функционирования натрий-ионных и литий-ионных аккумуляторов аналогичны: при заряде ионы натрия переходят из активной массы положительного электрода в электролит, после чего взаимодействуют с активной массой отрицательного электрода. В процессе разряда происходят противоположные процессы [58].

Положительный электрод (катод) натрий-ионного аккумулятора состоит из алюминиевой токосъёмной подложки с нанесённым на неё катодным материалом, который может иметь различные химические составы, среди которых наиболее распространёнными являются слоистые оксиды переходных металлов (например, железа или марганца) [127, 160], полианионные соединения [140], а также аналоги берлинской лазури [157, 32].

Отрицательный электрод (анод) натрий-ионного аккумулятора, как правило, представляет собой алюминиевую подложку, покрытую неграфитизируемым аморфным углеродом [61, 58]. Анод и катод отделены друг от друга при помощи сепаратора.

В качестве электролита обычно применяются соли натрия в органических неводных растворителях, зачастую эфиров и карбонатов [129, 131]. Натрий-ионные аккумуляторы, также как и литий-ионные, герметичны, но могут быть оснащены аварийным клапаном сброса давления.

Поскольку массовое производство натрий-ионных аккумуляторов началось сравнительно недавно, на текущий момент существует лишь ограниченное число моделей, дошедших до этапа коммерческой реализации. У большинства

аккумуляторов данного типа, производителями заявляется минимально-допустимое напряжение равное 1,5 Вольт. Максимально-допустимое напряжение аккумулятора в зависимости от конкретной модели указывается в диапазоне от 3,9 до 4,1 Вольт. Таким образом, рабочий диапазон напряжений натрий-ионных аккумуляторов является наиболее широким среди всех существующих на рынке ХИТ, что накладывает ограничения на возможность их применения, поскольку далеко не все потребители рассчитаны на работу в широком диапазоне входного напряжения. Кроме того, на данный момент на рынке представлен сравнительно малый ассортимент плат BMS, необходимых для изготовления натрий-ионных батарей, однако, по всей видимости, в скором времени эта проблема будет решена.

КПД цикла «заряд-разряд» натрий-ионных аккумуляторов составляет около 92%, что сопоставимо с коэффициентом полезного действия литий-ионных ХИТ и существенно превосходит КПД свинцово-кислотных и щелочных батарей [145]. Плотность хранения энергии натрий-ионных аккумуляторов не превышает 150 Вт*ч/кг, т.е. несколько ниже плотности хранения энергии многих видов литий-ионных аккумуляторов, что обусловлено различиями в физико-химических свойствах данных щелочных металлов. Однако, следует выделить устойчивость натрий-ионных аккумуляторов к отрицательным температурам, возможность заряда и разряда высокими токами, пожаробезопасность, а также высокую устойчивость к глубоким разрядам [58, 32, 157, 49]. Основные характеристики натрий-ионных аккумуляторов представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Основные характеристики натрий-ионных аккумуляторов

Критерий сравнения	Натрий-ионные аккумуляторы
Техническое обслуживание	Не требуется
Число циклов «заряд-разряд»	4000-6000
Удельная энергоёмкость, Вт·ч/кг	120–150
Номинальное напряжение, В	2,9–3,1
Зарядное напряжение, В	3,9–4,1
Конечное напряжение разряда, В	1,5
Саморазряд за месяц, %	1–3
Ток заряда	1С
Ток разряда	1,5С
КПД, %	92
Требования безопасности	Установка платы BMS
Стоимость	Выше средней

Учитывая рост научного и коммерческого интереса к натрий-ионным аккумуляторам, в ближайшие годы можно ожидать появления на рынке разнообразных аккумуляторов данного типа с различными свойствами, зависящими от химического состава материалов катода, анода и электролита. Также, можно полагать, что по мере роста объёмов производства параметры натрий-ионных аккумуляторов будут совершенствоваться, а стоимость, напротив, снижаться, что позволит данным ХИТ в полной мере конкурировать с литий-ионными аккумуляторами.

Несмотря на повсеместное распространение аккумуляторов различных типов и снижение стоимости многих из них с течением времени, а также по мере развития технологий и наращивания объёмов производства, цена на аккумуляторы остаётся довольно высокой, что ограничивает их применение в качестве накопителей энергии в системах электроснабжения с ВИЭ. Данная проблема может быть частично решена за счёт грамотного выбора типа аккумуляторных батарей, режима их работы, а также вторичного применения аккумуляторов, ранее эксплуатировавшихся в электротранспорте и утративших часть своего ресурса.

Рассмотрим высоковольтные аккумуляторные батареи наиболее распространённых в России электромобилей на предмет возможности их вторичного применения в системах хранения энергии.

1.5. Обзор высоковольтных батарей наиболее распространённых электромобилей в России

В настоящее время Nissan Leaf является самым распространённым электромобилем в России. По состоянию на июль 2025 года в нашей стране насчитывалось более 17 тысяч таких машин, а их доля от общего парка электромобилей составляла более 26% [38].

С 2009 по 2017 годы выпускались электромобили Nissan Leaf AZE0 и ZE0, комплектовавшиеся аккумуляторной батареей с номинальной энергоёмкостью 24 кВт*ч. Рабочий диапазон напряжений батареи находится в пределах от 240 до 398,4 Вольт, а номинальное напряжение составляет 360 Вольт. Батарея состоит из 48 последовательно соединённых аккумуляторных модулей.

Существуют модификации аккумуляторных батарей с номинальной энергоёмкостью 30 кВт*ч (выпускались с конца 2015 по конец 2017 года) и 40 кВт*ч (выпускаются с 2018 года) и состоящие из 24 двояных модулей, конструктивно схожих с модулями первого поколения. Кроме того, встречаются электромобили Nissan Leaf с аккумуляторной батареей, имеющей номинальную энергоёмкость 62 кВт*ч и выпускающиеся с 2019 года [1].

Существует четыре поколения аккумуляторных модулей электромобилей Nissan Leaf. Модули первого поколения применяются в батареях Nissan Leaf ZE0. Каждый модуль состоит из четырёх литий-ионных аккумуляторов (материал катода LiMn_2O_4 с добавлением LiNiO_2), соединённых по схеме 2S2P, т.е. первая пара параллельно подключенных аккумуляторов соединена последовательно со второй парой параллельно подключенных аккумуляторов. Аккумуляторный модуль имеет размеры 303*223*35 мм, весит 3,8 кг, его номинальная энергоёмкость составляет 500 Вт*ч, а диапазон рабочих напряжений составляет от 5 до 8,3 Вольт при номинальном напряжении 7,5 Вольт [50]. При этом, плотность хранения энергии составляет 132 Вт*ч/кг. На модуле присутствует 3 клеммы с внутренней резьбой для подключения проводников, что существенно упрощает монтаж и демонтаж модулей. В батарее имеются модули прямой и обратной полярности, на что следует обращать внимание перед их приобретением. Из-за несимметричной формы корпуса модуля, с одной стороны имеющего вальцовку, при сборке батареи, для повышения удобства монтажа, следует располагать модули таким образом, чтобы вальцовка корпуса на всех модулях располагалась в одном направлении. Модули первого поколения часто встречаются на вторичном рынке, а энергоёмкость большинства существующих в продаже модулей составляет 200-300 Вт*ч.

Модули второго поколения применяются в батареях Nissan Leaf AZE0. При идентичных модулям первого поколения размерах, номинальной ёмкости, и конфигурации соединения аккумуляторов, модули второго поколения имеют симметричный корпус, что упрощает сборку батарей из таких модулей. Данные модули получили наибольшее распространение на вторичном рынке, причём чаще всего в продаже встречаются модули с энергоёмкостью 200-300 Вт*ч.

С 2015 года в батареях Nissan Leaf AZE0 также применяются сдвоенные модули третьего поколения с номинальной энергоёмкостью 1250 Вт*ч. В батареях Nissan Leaf ZE1 применяются сдвоенные модули третьего поколения, имеющие увеличенную номинальную энергоёмкость около 1666 Вт*ч. Модули третьего поколения имеют конфигурацию 4S2P, что позволяет использовать их при сборке аккумуляторных батарей с числом последовательно соединённых аккумуляторов кратным четырём. Данные модули встречаются в продаже сравнительно редко.

Существуют электромобили Nissan Leaf ZE1 e+ с аккумуляторными батареями, имеющими номинальную энергоёмкость 62 кВт*ч, в составе которых применяются модули четвёртого поколения. Данные модули практически отсутствуют на вторичном рынке и потому имеют низкий потенциал для вторичного применения. Внешний вид аккумуляторных модулей всех существующих поколений представлен на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Аккумуляторные модули первого (1), второго (2), третьего (3) и четвёртого (4) поколений

Электромобиль Zeekr 001, выпуск которого начался в 2021 году по состоянию на июль 2025 года занимает второе место по распространённости среди электромобилей в России: на его долю приходится более 13% парка всех электромобилей в стране, а численность превышает 8,6 тысяч экземпляров [38].

Аккумуляторная батарея электромобиля Zeekr 001 выпускавшегося до 2024 года имеет номинальное напряжение 407 Вольт и состоит из 110 Li-NMC аккумуляторов: в корпусе батареи расположено шесть блоков из 16 и два блока из 7 аккумуляторов. Аккумуляторы в блоках, как и блоки между собой соединены последовательно [101]. Номинальная энергоёмкость батареи равна 100 кВт*ч.

Номинальная энергоёмкость одного аккумулятора составляет около 900 Вт*ч, номинальное напряжение 3,7 Вольт, а примерный диапазон рабочих напряжений находится в пределах 2,8-4,2 Вольт.

В 2024 году был проведён рестайлинг Zeekr 001, затронувший в том числе и архитектуру аккумуляторной батареи, чьё номинальное напряжение было повышено до 800 Вольт. Кроме того, электромобиль начали выпускать с батареями двух видов: Li-NMC с номинальной энергоёмкостью 100 кВт*ч или LiFePO₄ с номинальной энергоёмкостью 95 кВт*ч [159, 72]. При этом номинальная энергоёмкость Li-NMC аккумулятора составляет около 460 Вт*ч, а литий-железо-фосфатного – около 380 Вт*ч. Точные данные о диапазонах рабочих напряжений данных аккумуляторов отсутствуют, но исходя из видов применённых аккумуляторов можно сделать предположение, что данные диапазоны будут составлять около 2,8-4,2 Вольт и 2,5-3,65 Вольт соответственно. Следует отметить, что в батарее электромобиля Zeekr 001 алюминиевые клеммы аккумуляторов соединены друг с другом шинопроводом при помощи сварки, что затрудняет повторное поштучное применение данных аккумуляторов вне блоков.

Tesla Model 3 замыкает тройку наиболее распространённых электромобилей в России: доля этих машин, производство которых было запущено в 2017 году, в настоящее время составляет 4,4% от общего рынка электромобилей, т.е. чуть менее 2,9 тысяч экземпляров [38].

Аккумуляторные батареи электромобилей Tesla, и в частности, Model 3 существенно отличаются от батарей большинства прочих производителей числом используемых аккумуляторов. Так, батарея с номинальной энергоёмкостью 50 кВт*ч собрана из 2976 Li-NMC аккумуляторов типоразмера 2170 (21*70 мм) по схеме 96S31P, т.е. 96 последовательно соединённых блоков, каждый из которых состоит из 31 параллельно соединённого аккумулятора. Батарея с номинальной энергоёмкостью 75 кВт*ч состоит из 4416 аккумуляторов и собрана по схеме 96S46P [153, 150].

Соединения аккумуляторов в батарее выполнены тонкими привариваемыми проводниками, способными выполнять функцию плавкой вставки, что должно повысить безопасность эксплуатации батареи. Номинальное напряжение батареи составляет 345,5 Вольт, напряжение полностью заряженной батареи 400 Вольт, а полностью разряженной – 242 Вольт [150, 153].

Кроме того, запущено производство батарей с номинальной энергоёмкостью 50 кВт*ч из призматических LiFePO_4 аккумуляторов. Батарея имеет номинальное напряжение 339,2 Вольт и состоит из 106 последовательно соединённых аккумуляторов, причём аккумуляторы поделены на 4 блока: два блока по 25, и два блока по 28 последовательно соединённых аккумуляторов. Соединения аккумуляторов выполняются методом сварки [149]. В батарее применены аккумуляторы CATL BTF0 161Ah LFP, номинальное напряжение которых составляет 3,2 Вольт, максимальное – 3,65 Вольт, а минимальное – 2,5 Вольт [142].

Lixiang L7, производство которого началось в 2023 году, по состоянию на июль 2025 года является самым распространённым гибридным автомобилем в России. На его долю приходится почти 21% таких машин, то есть более 15 тысяч экземпляров [38]. Lixiang L7 первого поколения укомплектован батареей с номинальным напряжением 363 Вольт и энергоёмкостью 42,8 кВт*ч. Батарея состоит из 98 последовательно соединённых аккумуляторов, соединения клемм выполнены методом сварки. Номинальное напряжение аккумулятора составляет 3,7 Вольт, а энергоёмкость – около 440 Вт*ч [37].

Lixiang L9, запущенный в производство в 2022 году, занимающий 17,4% рынка гибридных автомобилей России и насчитывающий более 12,7 тысяч экземпляров на территории нашей страны по устройству батареи крайне похож на ранее описанную модель L7 той же марки. Батарея состоит из 102 последовательно соединённых Li-NMC аккумуляторов фирмы CATL, номинальное напряжение составляет 374,3 Вольт, а энергоёмкость батареи, в зависимости от комплектации, может составлять 44,5 или 52,3 кВт*ч.

Производство гибридного автомобиля Voyah Free было запущено в 2021 году, а на июль 2025 года данная модель насчитывала более 11,5 тысяч экземпляров на территории нашей страны и заняла 15,7% рынка гибридных автомобилей России

[38]. Модель выпускается с батареями различной энергоёмкости: 33 кВт*ч, 39,2 кВт*ч и 43 кВт*ч. Батарея с номинальной энергоёмкостью 33 кВт*ч имеет номинальное напряжение 329,4 Вольт и, по всей видимости, состоит из 90 последовательно соединённых Li-NMC аккумуляторов. Номинальное напряжение аккумулятора составляет около 3,7 Вольт, клеммы аккумуляторов соединяются между собой при помощи сварки [96].

Проведённый анализ высоковольтных тяговых аккумуляторных батарей электромобилей и гибридных автомобилей показывает, что в большинстве из них применяются литий-ионные аккумуляторы, что обусловлено их высокой плотностью хранения энергии и длительным сроком службы. Наиболее часто применяются аккумуляторы видов Li-NMC и LiFePO₄. Номинальное напряжение аккумуляторной батареи электромобиля или гибридного автомобиля зачастую находится в пределах около 320-410 Вольт, однако встречаются и батареи с более высоким номинальным напряжением. В большинстве изученных батарей применяются крупноформатные аккумуляторы со сравнительно высокой ёмкостью, что упрощает возможность их дальнейшего применения в целях стационарного хранения энергии, однако, наиболее распространённый метод соединения клемм аккумуляторов при помощи сварки усложняет разборку таких батарей и затрудняет применение соединённых таким способом аккумуляторов вне существующих блоков. Кроме того, производство большинства наиболее распространённых на территории нашей страны электромобилей и гибридных автомобилей было запущено лишь несколько лет назад, а потому бывшие в употреблении батареи этих машин ещё не поступили на вторичный рынок в должном объёме.

По результатам проведённого анализа, в настоящее время наиболее подходящими и перспективными для вторичного применения в системах электроснабжения с ВИЭ представляются батареи электромобилей Nissan Leaf. Данные батареи широко распространены на вторичном рынке и обладают сравнительно низкой стоимостью, а разборная конструкция позволяет изготавливать из аккумуляторных модулей батареи с любым чётным числом аккумуляторов.

Рассмотрим существующие примеры вторичного применения аккумуляторов и аккумуляторных батарей электромобилей в системах хранения энергии.

1.6. Обзор вторичного применения аккумуляторов электромобилей в системах электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии

Несмотря на то, что вторичное применение аккумуляторов на данный момент ещё не получило широкого распространения, подобные примеры существуют. Так, эксплуатируемые в московских электробусах литий-ионные аккумуляторные батареи после списания планируют применять для нужд метрополитена, в частности в источниках резервного питания [86].

В зарубежной литературе существует ряд научных исследований, посвящённых изучению возможности вторичного применения литий-ионных аккумуляторных батарей различных электромобилей и свидетельствующих о целесообразности такого решения для стационарного хранения энергии в установках с ВИЭ и зарядных станциях для электротранспорта [152, 128, 107, 134]. Вследствие повышения интереса ко вторичному применению аккумуляторов, в 2018 году международная компания по сертификации безопасности «Underwriters Laboratories» опубликовала один из первых нормативных документов, посвящённых стандартизации оценки безопасности и остаточного ресурса вторично используемых аккумуляторов – UL 1974.

Встречаются публикации, описывающие вторичное применение аккумуляторов или аккумуляторных батарей электромобилей в системах накопления энергии для фотоэлектрических установок. Так, энергетическая компания «B2U Storage Solutions» построила для Калифорнийской солнечной электростанции систему хранения энергии энергоёмкостью более 25 МВт*ч, задействовав более 1300 бывших в эксплуатации высоковольтных батарей от электромобилей Nissan и Honda, функционирующую уже более пяти лет [109].

На территории Калифорнийского университета с 2019 года эксплуатируется солнечная электростанция, накопителями в которой служат две литий-ионные батареи, изготовленные из вторично используемых аккумуляторных модулей от электромобилей Nissan Leaf и способные накапливать 262 кВт*ч энергии [123].

Бывшие в употреблении аккумуляторные модули электромобиля Nissan Leaf нашли применение и в Малайзии, где были использованы при изготовлении батареи с номинальным напряжением около 24 Вольт и запасаемой энергией 3,6 кВт*ч для автономной системы уличного освещения, источниками заряда для которой служат солнечные батареи [133].

Существуют примеры вторичного использования аккумуляторов электромобилей при создании зарядных станций для электротранспорта. Так, 135 бывших в употреблении LiFePO_4 аккумуляторов были применены для изготовления батареи с номинальным напряжением 48 Вольт и запасаемой энергией 13,9 кВт*ч. Данная аккумуляторная батарея заряжается от солнечных батарей при помощи MPPT контроллера, а накопленная энергия применяется для зарядки электротранспорта посредством инвертора [143].

Существует пример построения накопителя энергии из аккумуляторных батарей электромобилей BMW i3 с принудительным жидкостным охлаждением, что позволяет обеспечить оптимальный температурный режим работы аккумуляторов и способствует продлению срока их службы [107].

Применение находят батареи, ранее эксплуатировавшиеся не только в электромобилях, но и в гибридных автомобилях, где аккумуляторная батарея является вспомогательным источником энергии и обладает сравнительно небольшой ёмкостью. Так, в Таиланде было проведено исследование аккумуляторов, эксплуатировавшихся в гибридном автомобиле Nissan X-Trail, показавшее возможность их применения в системах хранения энергии [147].

Как правило, замену аккумуляторной батареи электромобиля выполняют, когда автовладелец перестаёт хватать запаса хода на одном полном заряде. Несмотря на снижение ёмкости, такие батареи в большинстве случаев находятся в работоспособном состоянии и могут быть использованы для стационарного хранения энергии, где цена батарей превалирует над габаритами накопителей.

Применение аккумуляторов, ранее эксплуатировавшихся в электротранспорте может являться целесообразным, поскольку они широко распространены на вторичном рынке, обладают достаточно большой ёмкостью и выгодно отличаются по цене от новых аккумуляторов. Существует гипотеза о

возможности достижения экономической целесообразности вторичного применения литий-ионных аккумуляторов электромобилей для стационарного накопления энергии при условии, что их цена не должна превышать 60% от цены новых аккумуляторов [120]. Кроме того, данное решение позволяет снизить потребность в производстве новых аккумуляторов и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Выводы по первой главе

1. Сельские электрические сети нуждаются в модернизации, ремонте или замене изношенного оборудования и применении самонесущих изолированных проводов достаточного сечения взамен устаревших неизолированных, сокращении протяжённости линий от центра питания до наиболее удалённых точек, внедрении резервирования и применении местных возобновляемых источников энергии.

2. Рост применения возобновляемых источников энергии увеличивает потребность в накопителях энергии. Несмотря на постепенное снижение стоимости аккумуляторов их цена остаётся высокой.

3. Аккумуляирование энергии повышает эффективность применения ВИЭ на объектах электроснабжения, суточный график активной нагрузки которых существенно отличается от суточного графика выработки энергии возобновляемыми источниками.

4. При выборе типа аккумуляторов для накопления энергии возобновляемых источников значимыми параметрами являются их стоимость, число циклов «заряд-разряд» до списания, КПД и плотность хранения энергии. В настоящее время, по совокупности данных параметров предпочтительным является применение литий-ионных аккумуляторов.

5. По мере появления на вторичном рынке и снижения стоимости эксплуатировавшихся в электротранспорте литий-ионных батарей, целесообразность их применения в стационарных накопителях энергии возрастает. Однако, для прогнозирования остаточного эксплуатационного ресурса и оптимизации режимов работы вторично используемых аккумуляторов требуются дополнительные исследования.

Глава 2. Теоретическое обоснование деградации литий-ионных аккумуляторов и проведение рекогносцировочных экспериментов

2.1. Исследование механизма деградации литий-ионных аккумуляторов

При проведении заряда и разряда литий-ионного аккумулятора, помимо обратимой интеркаляции и деинтеркаляции ионов лития, также происходит и ряд побочных, нежелательных физико-химических процессов, вызывающих его деградацию [65, 100].

В процессе эксплуатации аккумулятора, на поверхности анодного материала происходит рост пассивирующего слоя твёрдого электролита, отделяющего активное вещество анода от жидкого электролита и влияющего на интеркаляцию и деинтеркаляцию ионов лития. Данный пассивирующий слой снижает интенсивность побочных реакций, препятствует разложению электролита и обеспечивает механическую защиту активного вещества анода. Однако, чрезмерное увеличение толщины слоя твёрдого электролита препятствует проникновению ионов лития в кристаллическую решётку анодного материала, что приводит к снижению ёмкости и увеличению внутреннего сопротивления аккумулятора. К основным причинам чрезмерного увеличения толщины слоя твёрдого электролита при работе аккумулятора относят температуру эксплуатации выше 25°C, а также превышение допустимых токов заряда и разряда [156, 112].

Ещё одним нежелательным процессом является осаждение лития на поверхности анода, наблюдающееся при заряде аккумулятора в случаях, когда скорость подачи ионов лития к материалу анода превышает скорость их интеркаляции. Осаждённый на электроде литий перестаёт участвовать в интеркаляции, что приводит к снижению ёмкости. Также, осаждённый литий формирует дендритоподобные структуры, рост которых может приводить к повреждению сепаратора между анодом и катодом, что в свою очередь вызывает увеличение саморазряда аккумулятора. Основными причинами осаждения лития на поверхности анода являются высокие напряжение и ток заряда, а также заряд при температуре ниже 0°C [155, 119].

Кроме того, при эксплуатации литий-ионных аккумуляторов происходит постепенное растворение электролитом катодного материала, что особенно характерно для аккумуляторов, катодный материал которых содержит марганец, например Li-NMC и LMO. Поскольку скорость диффузии ионов лития в электролите превышает скорость диффузии в катодном материале, на поверхности катода растёт концентрация ионов лития и образуется область, обогащённая Mn^{3+} , что в свою очередь приводит к реакции диспропорционирования Mn^{3+} и растворению Mn^{2+} в электролите: $2Mn^{3+} \rightarrow Mn^{2+} + Mn^{4+}$. Следствием данного процесса является снижение энергоёмкости и рост внутреннего сопротивления аккумулятора, причём рост интенсивности реакции наблюдается при температурах эксплуатации аккумулятора свыше $25^{\circ}C$, а также при напряжении заряда свыше 4,10 Вольт и конечном напряжении разряда менее 3,10 Вольт [148].

Наконец, на деградацию литий-ионных аккумуляторов влияет механическое разрушение активной массы электродов (в особенности анода), обусловленное изменением объёма при интеркаляции и деинтеркаляции ионов лития во время заряда и разряда, с последующим растрескиванием и осыпанием активной массы электродов. Интенсивность разрушения активной массы нарастает при глубоких разрядах аккумуляторов, а также при высоких токах заряда и разряда [113].

Существуют и другие причины деградации литий-ионных аккумуляторов, однако, их влияние на износ считается менее значимым [112].

Таким образом, к наиболее значимым эксплуатационным факторам, способствующим ускоренной деградации литий-ионных аккумуляторов, относятся высокие токи заряда и разряда, работа при температурах свыше $25^{\circ}C$ и заряд при температуре менее $0^{\circ}C$, высокое напряжение заряда, а также глубокий разряд аккумулятора. При этом, влияние диапазона рабочих напряжений на деградацию энергоёмкости вторично используемых литий-ионных аккумуляторов изучено недостаточно.

Следует предположить, что существует оптимальный диапазон рабочих напряжений вторично используемых литий-ионных аккумуляторов, при котором будет наблюдаться наименьшее снижение энергоёмкости в процессе эксплуатации.

При этом, предполагается, что оптимальный диапазон рабочих напряжений может отличаться от номинального (заявленного производителем) диапазона более низким напряжением заряда и более высоким конечным напряжением разряда, т.е. располагаться в более узком интервале напряжений. Также, можно предположить, что при режиме рабочих напряжений, обеспечивающем наименьшую деградацию энергоёмкости, будет наблюдаться наивысший коэффициент полезного действия цикла «заряд-разряд», за счёт минимизации побочных нежелательных реакций в аккумуляторе. Данные гипотезы подлежат проверке в рамках данной работы.

2.2. Методика подбора и оценки технического состояния вторично используемых аккумуляторных модулей

Для проведения экспериментальных исследований, на вторичном рынке было приобретено 18 модулей второго поколения от электромобиля Nissan Leaf AZE0 2014 года выпуска. Согласно данным, полученным при помощи программы «Leaf Spy», перед демонтажом высоковольтной батареи она имела ёмкость около 56% от номинальной, что составляет примерно 37 А*ч. Внешний вид и схема соединения аккумуляторов в модуле Nissan Leaf представлены на рисунке 2.1.

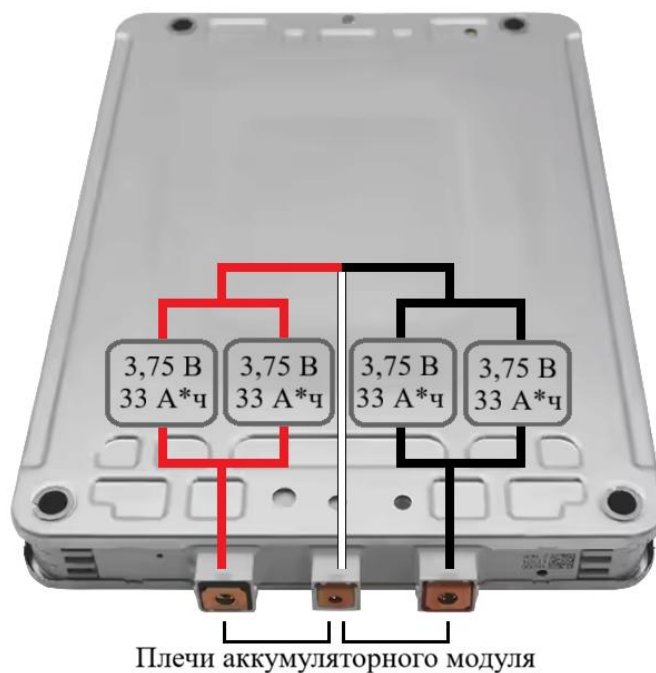


Рисунок 2.1 – Внешний вид и схема соединения аккумуляторов в модуле Nissan Leaf второго поколения

Перед приобретением бывших в эксплуатации аккумуляторных модулей следует выполнить ряд проверок, позволяющих косвенно оценить их техническое состояние. Разработанная методика первичной диагностики бывших в употреблении модулей состоит в следующем:

1. Необходимо проверить наличие механических повреждений модуля. Сквозные порезы, проколы, трещины, глубокие вмятины на алюминиевом корпусе недопустимы. Трещины и сколы пластиковых изоляторов клемм также не допускаются [104]. Неглубокие вмятины и царапины на алюминиевом корпусе и пластиковых элементах модулей допустимы. Модуль не должен иметь следов подтёков электролита или сильного постороннего запаха, что может указывать на разгерметизацию одного или нескольких аккумуляторов.

2. Следует убедиться в отсутствии электрического потенциала на корпусе модуля относительно его клемм. Затем, требуется измерить сопротивление между клеммами и корпусом модуля, причём данное сопротивление должно составлять не менее 100 МОм [104, 135].

3. Требуется проверить напряжение между клеммами модуля. Поскольку модуль имеет конфигурацию 2S2P, напряжение следует измерять в обоих плечах модуля: между центральной и крайними клеммами (рисунок 2.1). Напряжение в обоих плечах модуля должно соответствовать диапазону 2,5-4,15 Вольт, а разница напряжений ΔU между плечами не должна превышать 50 мВ. Кроме того, между плечами различных модулей ΔU также не должна превышать 50 мВ [136, 152]. Различие напряжений плеч модуля указывает на высокий саморазряд и/или отличие ёмкости плеча с наименьшим измеренным напряжением.

Следует отметить, что проверка напряжений плеч модулей перед их приобретением особенно полезна, если после снятия высоковольтной батареи и демонтажа модулей с ними не проводилось операций по заряду или разряду. При соблюдении данного условия, малый разброс напряжений плеч модулей указывает на схожие параметры их ёмкости и саморазряда. В случае, если напряжения модулей были искусственно выровнены (например, путём их параллельного соединения), следует выбирать модули, имеющие схожие, а одновременно с тем наиболее высокие напряжения, что косвенно указывает на их схожие величины саморазряда.

4. При помощи тестера внутреннего сопротивления аккумуляторов необходимо измерить внутреннее сопротивление обоих плеч модуля. У нового модуля внутреннее сопротивление каждого плеча составляет около 1 мОм, однако, в процессе эксплуатации внутреннее сопротивление аккумуляторов повышается [152]. Следует выбирать модули с наименьшим внутренним сопротивлением переменному току с частотой 1000 ± 100 Гц, не превышающим 2 мОм, причём внутреннее сопротивление как в разных плечах модуля, так и между модулями, должно быть схожим и отличаться менее чем на 50% [25, 152].

На основе разработанной методики была зарегистрирована программа для ЭВМ «Подбор бывших в употреблении аккумуляторных модулей электромобиля Nissan Leaf» (номер свидетельства RU 2026666448), позволяющая оценить возможность вторичного применения аккумуляторных модулей электромобиля Nissan Leaf с использованием предлагаемого чек-листа проверки [79].

После проведения первичной диагностики согласно описанной методике и приобретения отобранных модулей, необходимо провести их вторичную диагностику для выявления энергоёмкости и величины саморазряда. Для определения энергоёмкости модуля необходимо выполнить контрольный цикл «заряд-разряд». Цикл необходимо проводить для каждого плеча модуля, поскольку из-за различий в энергоёмкости, напряжении и внутреннем сопротивлении двух плеч одного модуля, при заряде или разряде модуля без контроля напряжения между крайними и центральной клеммами возможен перезаряд или глубокий разряд одного из плеч.

Заряд каждого плеча модуля необходимо выполнять по протоколу CC-CV, т.е. сначала при постоянном токе до достижения заданного напряжения заряда, а затем при постоянном зарядном напряжении и снижающемся токе. Для выявления энергоёмкости плечо модуля необходимо зарядить до напряжения 4,15 Вольт и снижения зарядного тока до 2-5% от начального. Величина тока заряда обычно не должна превышать ток разряда. Поскольку номинальная энергоёмкость батареи Nissan Leaf указывается для тока разряда, равного 0,3 от ёмкости (0,3C), измерение энергоёмкости вторично используемых модулей целесообразно проводить при токе разряда, составляющем около 0,3 от заявленной продавцом ёмкости [152].

После выявления энергоёмкости модуля путём проведения цикла «заряд-разряд», модуль необходимо зарядить до близкого к номинальному напряжения и оставить на хранение для определения величины саморазряда [136]. Оба плеча модуля должны быть заряжены независимо друг от друга до идентичного напряжения. Следует учитывать, что при хранении литий-ионных аккумуляторов в полностью заряженном состоянии их саморазряд увеличивается, а деградация возрастает. Кроме того, на величину саморазряда и деградацию влияет температура хранения выше 25°C [116].

Нормальная величина саморазряда аккумуляторов данных модулей в первый месяц хранения составляет около 2-3% от энергоёмкости. В течение года саморазряд не должен превышать 10%. При заряде до напряжения, близкого к номинальному, напряжения каждого плеча модуля в течение месяца хранения не должно снизиться более чем на 100 мВ [110].

Впоследствии, при сборке батарей, аккумуляторные модули необходимо подбирать таким образом, чтобы энергоёмкость, внутреннее сопротивление и величина саморазряда модулей в пределах одной батареи были максимально схожи. В противном случае, плечо модуля с наихудшими параметрами может существенно ограничивать ёмкость, отдаваемую батареей.

Для предварительной оценки технического состояния вторично используемых аккумуляторных модулей были выбраны мультиметр, необходимый для измерения сопротивления между клеммами модуля и его корпусом, а также тестер внутреннего сопротивления и напряжения аккумуляторов. В качестве мультиметра был применён ANENG PN 200. В качестве тестера внутреннего сопротивления и напряжения аккумуляторов был применён RC3563.

Для вторичной диагностики модулей путём измерения их зарядных и разрядных характеристик был применён нагрузочный тестер аккумуляторов ZKETECH EBC-A20, совмещающий в себе функции зарядного устройства и электронной нагрузки. Данный тестер имеет возможность подключения к персональному компьютеру (ПК) при помощи USB-TTL конвертера (преобразователя интерфейсов). При подключении к компьютеру возможна настройка циклического режима испытаний, при котором заряд и разряд аккумуляторов будут происходить поочерёдно заданное число раз.

Для работы нагрузочного тестера совместно с персональным компьютером на последний была установлена программа «EB Tester Software V1.8.5», позволяющая управлять тестером при помощи ПК, в том числе задавать зарядное напряжение, начальный ток заряда, конечное напряжение разряда, ток или мощность разряда, число циклов «заряд-разряд» и т.д.

Совместное применение тестера и ПК с установленной на нём программой «EB Tester Software V1.8.5» позволило выполнять автоматическое построение графиков заряда и разряда аккумуляторов, а также сохранять данные о ёмкости и энергоёмкости, полученной или отданной аккумулятором в каждом цикле испытаний. Кроме того, данная программа каждые две секунды сохраняет информацию о текущем напряжении, токе и времени, прошедшем с начала запуска испытания аккумулятора в текстовом формате CSV (Comma-Separated Values), предназначенном для хранения табличных данных.

Для обработки результатов экспериментов, в том числе для преобразования данных из формата CSV в формат XLSX была использована программа «Microsoft Excel», позволяющая не только работать с табличными и текстовыми данными, но и выполнять построение графиков для визуализации полученных результатов.

2.3. Проведение рекогносцировочного исследования параметров аккумуляторных модулей и анализ полученных данных

Первичная диагностика исследуемых модулей показала их работоспособность и пригодность для дальнейших испытаний. Так, напряжения плеч модулей имели значения около 4,03 Вольт, а разница напряжений не превышала 20 мВ, что косвенно указывает на схожие величины саморазряда и ёмкости модулей. Среднее значение внутреннего сопротивления плеча модуля составляло 1,17 мОм при минимальном значении 1,04 мОм и максимальном 1,25 мОм. Таким образом, сопротивление данных модулей переменному току с частотой 1000 Гц за период их эксплуатации в среднем выросло на 17%, а разброс внутренних сопротивлений плеч модулей составил около 16,8%.

Для осуществления вторичной диагностики технического состояния аккумуляторных модулей было необходимо произвести измерение их энергоёмкости при помощи нагрузочного тестера ZKETECH EBC-A20. В целях предотвращения сбоев работы нагрузочного тестера при отключениях и провалах сетевого напряжения он был подключен через источник бесперебойного питания. Для увеличения времени автономной работы тестера при отключении электроэнергии, ноутбук, имеющий встроенную аккумуляторную батарею, подключался непосредственно к сети переменного тока, чтобы не расходовать энергию, накопленную в аккумуляторной батарее источника бесперебойного питания. Схема подключения применённой испытательной установки приведена на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Схема подключения испытательной установки

- 1 – блок питания нагрузочного тестера; 2 – нагрузочный тестер ZKETECH EBC-A20; 3 – кабель USB-TTL конвертера; 4 – блок питания ноутбука; 5 – источник бесперебойного питания; 6 – испытываемый аккумуляторный модуль;
7 – ноутбук

Плечо каждого модуля заряжалось по алгоритму CC-CV начальным током 5 Ампер до напряжения 4,15 Вольт и снижения тока заряда до 0,1 Ампер. Затем, плечо модуля разряжалось током 10 Ампер до снижения напряжения под нагрузкой до 2,50 Вольт с целью измерения энергоёмкости плеча модуля.

Величина начального тока заряда плеча модуля была обусловлена характеристиками нагрузочного тестера, не способного обеспечить большой ток заряда. Величина тока разряда была выбрана примерно равной 30% от ожидаемой ёмкости модулей [152]. Величины зарядного напряжения и конечного напряжения разряда были выбраны исходя из требований технической документации, регламентирующих минимальное и максимальное напряжения плеч модулей [135].

По результатам проведённых испытаний было установлено, что средняя энергоёмкость плеча модуля составляет 141,9 Вт*ч, что соответствует 56,76% от номинальной энергоёмкости. Минимальная энергоёмкость плеча составляет 135,41 Вт*ч, максимальная – 145,65 Вт*ч.

Таким образом, разброс энергоёмкости плеч всех исследуемых модулей составил 7,03%. При этом, максимальный разброс энергоёмкости плеч одного модуля составил 3,22%. Диаграмма энергоёмкости и внутреннего сопротивления плеч модулей представлена на рисунке 2.3.

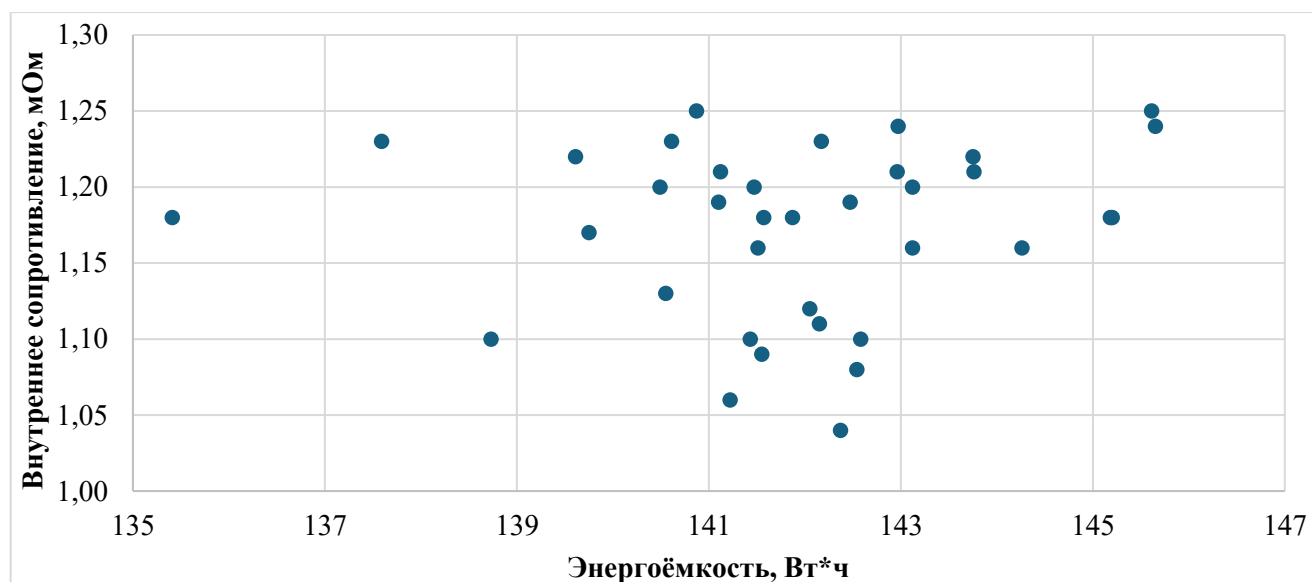


Рисунок 2.3 – Диаграмма энергоёмкости и внутреннего сопротивления плеч аккумуляторных модулей

После определения энергоёмкости, плечи модулей были заряжены по алгоритму CC-CV начальным током заряда 5 Ампер до напряжения 4,00 Вольт и снижения зарядного тока до 0,1 Ампер, после чего были оставлены на хранение в течение месяца для выявления величин их саморазряда.

За указанный период средний саморазряд плеч модулей составил около 52 мВ, причём разброс величин саморазряда не превышал 7 мВ, что наряду с низким внутренним сопротивлением говорит о надлежащем техническом состоянии аккумуляторных модулей и их пригодности для проведения дальнейших экспериментальных исследований.

2.3.1. Влияние конечного напряжения разряда на энергоёмкость

При проведении измерений энергоёмкости аккумуляторных модулей с помощью программы «EB Tester Software V1.8.5» был построен график разряда плеча модуля в диапазоне напряжений от 4,15 до 2,50 Вольт при токе разряда 10 Ампер. Данный график представлен на рисунке 2.4.

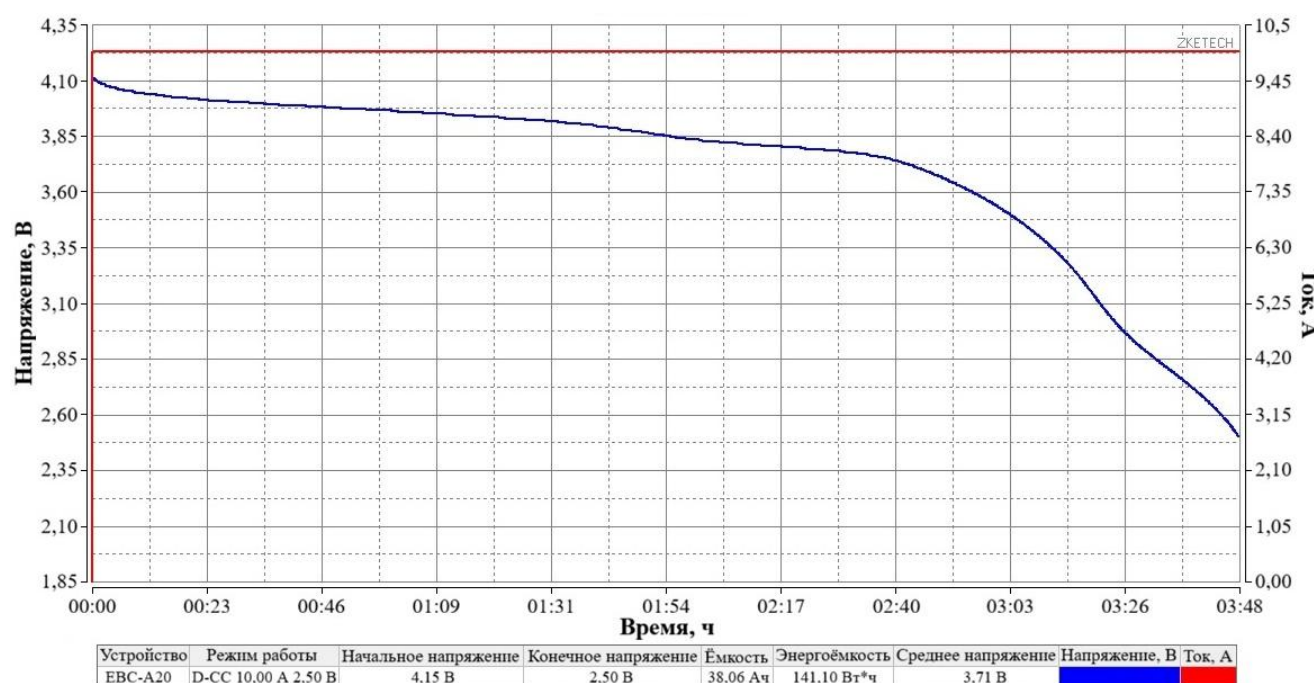


Рисунок 2.4 – График разряда плеча модуля в рабочем диапазоне напряжений 4,15-2,50 Вольт при токе разряда 10 Ампер

Как видно по графику, по мере разряда плеча модуля его напряжение меняется нелинейно: на участке от 4,15 до 3,75 Вольт напряжение снижается относительно плавно, после чего, на участке от 3,75 до 2,50 Вольт скорость снижения напряжения существенно возрастает. Очевидно, что наибольшую часть накапливаемой плечом модуля энергии можно получить, не прибегая к глубоким разрядам, негативно сказывающимся на сроке службы аккумуляторов.

Для более подробного рассмотрения влияния конечного напряжения разряда на энергоёмкость плеча модуля рассмотрим график, представленный на рисунке 2.5. График был построен в программе «Microsoft Excel» на основании табличных данных, полученных от нагрузочного тестера и автоматически обработанных программой «EB Tester Software V1.8.5» при проведении измерения энергоёмкости плеча аккумуляторного модуля.

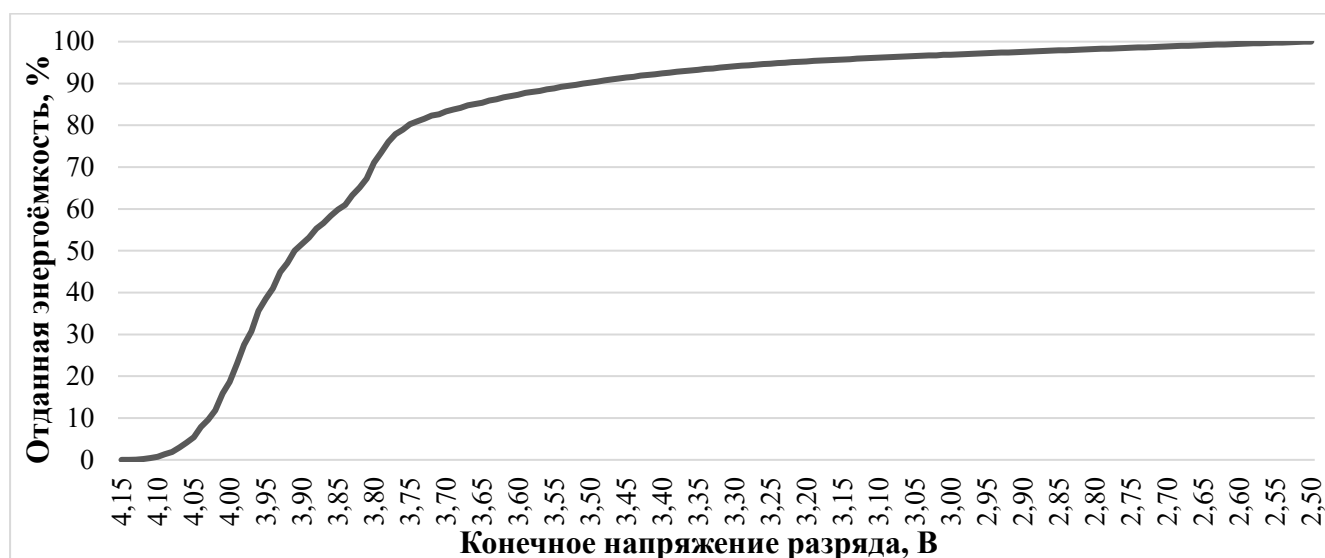


Рисунок 2.5 – Зависимость отданной энергоёмкости от конечного напряжения разряда при токе разряда 0,3С

Как можно заметить, несмотря на то что разность напряжений полностью заряженного и полностью разряженного плеча модуля составляет 1,65 Вольт, около 80% энергоёмкости можно получить при разряде в диапазоне от 4,15 до 3,75 Вольт, составляющем менее 25% от всего диапазона рабочих напряжений. Кроме того, 90% энергоёмкости можно получить при разряде в диапазоне от 4,15 до 3,50 Вольт, составляющем около 39% от всего диапазона рабочих напряжений.

Таким образом, можно сделать вывод, что выполнять разряд плеча модуля до минимального регламентированного напряжения 2,50 Вольт хоть и допустимо, но не оправдано, так как при разряде модулей в составе батареи из-за различий в ёмкости плеч модулей при глубоком разряде может наблюдаться существенный разброс напряжений плеч, что может привести к снижению напряжения отдельных плеч до величины менее 2,50 Вольт, что серьёзно снижает ресурс эксплуатации модулей и батареи в целом.

2.3.2. Влияние зарядного напряжения на энергоёмкость и скорость заряда

Отдаваемая аккумуляторным модулем ёмкость зависит не только от конечного напряжения разряда, но и от зарядного напряжения. Для оценки этого влияния был проведён ряд экспериментов.

Плечо аккумуляторного модуля разряжалось током 10 Ампер до напряжения 2,50 Вольт, после чего заряжалось нагрузочным тестером ZKETECH EBC-A20 по алгоритму CC-CV начальным током 5 Ампер до напряжения 4,20 Вольт и снижения тока заряда до 0,1 Ампер для измерения сообщаемой энергии. Затем экспериментальный цикл «разряд-заряд» повторялся, однако, в каждом последующем цикле напряжение заряда снижалось на 50 мВ. В качестве напряжения заряда устанавливались значения 4,20; 4,15; 4,10; 4,05 и 4,00 Вольт.

Следует отметить, что напряжение 4,20 Вольт превышает регламентированное допустимое зарядное напряжение плеча исследуемого аккумуляторного модуля на 50 мВ и такой режим эксплуатации является нежелательным. Однако, опираясь на регламентированное зарядное напряжение аналогичных аккумуляторов со схожими материалами анода и катода, можно предположить, что единоразовый заряд до данного напряжения не приведёт к существенной деградации плеча аккумуляторного модуля, но позволит получить ценные экспериментальные данные.

Для минимизации влияния возможных случайных отклонений в ходе проведения экспериментов было выполнено по 5 циклов «разряд-заряд» на 4 плечах двух аккумуляторных модулей. Численные данные были получены и выведены на ноутбук с помощью программы «EB Tester Software V1.8.5».

При помощи программы «Microsoft Excel» были вычислены средние арифметические значения времени, тока, напряжения и сообщаемой плечам модулей энергии в четырёх экспериментах, при пяти указанных напряжениях заряда. Полученные данные представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Зависимость сообщаемой плечу модуля энергии и времени заряда от величины зарядного напряжения

Сообщаемая энергия (СС-CV), Вт*ч	Время заряда (СС-CV), мин	Доля СС от сообщаемой энергии, %	Доля СС от времени заряда, %	Доля CV от сообщаемой энергии, %	Доля CV от времени заряда, %
Заряд в режиме СС-CV до 4,20 Вольт					
154,63	638	96%	70%	4%	30%
Заряд в режиме СС-CV до 4,15 Вольт					
147,18	589	95%	72%	5%	28%
Заряд в режиме СС-CV до 4,10 Вольт					
136,70	602	91%	63%	9%	37%
Заряд в режиме СС-CV до 4,05 Вольт					
112,53	611	82%	46%	18%	54%
Заряд в режиме СС-CV до 4,00 Вольт					
78,60	363	90%	61%	10%	39%

На основе полученных экспериментальных данных в программе «Microsoft Excel» были построены графики заряда, представленные на рисунке 2.6.

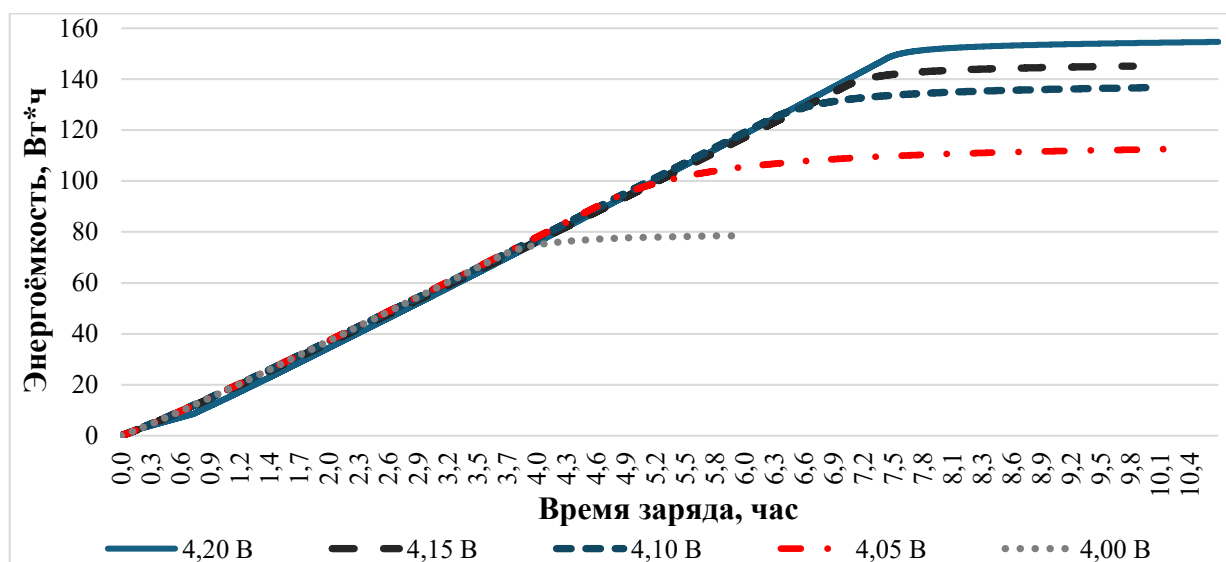


Рисунок 2.6 – Графики заряда в режиме СС-CV при напряжении 4,00; 4,05; 4,10; 4,15 и 4,20 Вольт

Как видно из приведённых графиков, существует выраженная зависимость между сообщаемой плечу модуля энергией и величиной зарядного напряжения. При повышении зарядного напряжения с 4,15 до 4,20 Вольт сообщаемая плечу модуля энергия увеличилась лишь на 5%, что говорит о нецелесообразности заряда до напряжения 4,20 Вольт, учитывая, что регламентированное максимальное зарядное напряжение плеча модуля, составляет 4,15 Вольт.

При снижении зарядного напряжения с 4,15 до 4,10 Вольт сообщаемая плечу модуля энергия снижается примерно на 7,7%. При снижении зарядного напряжения с 4,15 до 4,05 Вольт сообщаемая энергия снижается уже на 23,5%, а при снижении зарядного напряжения с 4,15 до 4,00 Вольт энергия, сообщаемая плечу модуля при заряде, снижается на 46,6%.

Очевидно, применение аккумуляторных модулей электромобиля Nissan Leaf при зарядном напряжении плеча менее 4,00 Вольт в большинстве случаев является нецелесообразным. Так, рассматриваемые модули сохранили около 57% от номинальной энергоёмкости, следовательно, их плотность хранения энергии при полном заряде и полном разряде составляет около 75 Вт*ч/кг.

В случае, если рассматриваемые модули будут заряжаться до напряжения 4,00 Вольт, при проведении полного разряда плотность хранения энергии составит лишь около 40 Вт*ч/кг, что аналогично плотности хранения энергии морально устаревших свинцово-кислотных аккумуляторных батарей.

Кроме того, при снижении зарядного напряжения с 4,15 до 4,10 или 4,05 Вольт, необходимое на заряд плеча модуля время возрастает за счёт увеличения времени заряда в режиме CV – при постоянном напряжении и снижающемся токе. А с увеличением времени заряда возрастает и доля энергии, сообщаемая плечу модуля при заряде в режиме CV.

Следует отметить, что наибольшую часть времени при режиме заряда CC, т.е. при постоянном токе и растущем напряжении, обеспечивается большая, по сравнению с режимом заряда CV мощность. Это следует учитывать при заряде аккумуляторных модулей от возобновляемых источников энергии, выработка которых зачастую бывает неравномерной, из-за чего может требоваться обеспечение максимально возможной мощности заряда аккумуляторных батарей в моменты повышенной выработки электроэнергии.

Ввиду высокого влияния величины зарядного напряжения на энергоёмкость аккумуляторных модулей электромобиля Nissan Leaf было принято решение о проведении расширенного исследования данной зависимости.

При проведении исследования плечо аккумуляторного модуля сначала заряжалось нагрузочным тестером ZKETECH EBC-A20 по алгоритму CC-CV начальным током 5 Ампер до напряжения 4,20 Вольт и снижения тока заряда до 0,1 Ампер, после чего разряжалось током 10 Ампер до напряжения 2,50 Вольт для измерения энергоёмкости. Затем цикл «заряд-разряд» повторялся, однако, в каждом последующем цикле напряжение заряда снижалось на определённую величину.

На интервале зарядных напряжений от 4,20 до 4,10 Вольт зарядное напряжение в каждом последующем цикле снижалось на 50 мВ. На интервале от 4,10 до 4,00 Вольт зарядное напряжение в каждом последующем цикле снижалось на 10 мВ. На интервале от 4,00 до 3,00 Вольт зарядное напряжение в каждом последующем цикле вновь снижалось на 50 мВ. Таким образом, для плеча модуля был последовательно проведено 33 цикла «заряд-разряд» при снижении напряжении заряда от 4,20 до 3,00 Вольт.

Решение о снижении шага зарядного напряжения на интервале от 4,10 до 4,00 Вольт с 50 мВ до 10 мВ было обусловлено результатами ранее описанных экспериментов, показавших особенно выраженное влияние величины зарядного напряжения в данном диапазоне на сообщаемую плечу модуля энергию.

Для снижения влияния потенциальных отклонений, измерения проводились на четырёх плечах двух аккумуляторных модулей. Данные были получены и выведены на ноутбук с помощью программы «ЕВ Tester Software V1.8.5». При помощи программы «Microsoft Excel» были вычислены средние арифметические значения отданной при разряде энергии в четырёх экспериментах, при 33 указанных напряжениях заряда. Также была рассчитана доля полученной при разряде энергоёмкости относительно полного диапазона рабочих напряжений плеча аккумуляторного модуля, указанного производителем и составляющего 4,15-2,50 Вольт. Полученные данные представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Зависимость отданной при разряде энергоёмкости
от величины зарядного напряжения

Зарядное напряжение, В	Энергоёмкость, Вт*ч	Доля энергоёмкости от диапазона 4,15-2,50 В
4,20	147,51	104,1%
4,15	141,62	100,0%
4,10	132,24	93,4%
4,09	129,32	91,3%
4,08	124,87	88,2%
4,07	121,54	85,8%
4,06	117,08	82,7%
4,05	109,91	77,6%
4,04	103,56	73,1%
4,03	95,70	67,6%
4,02	86,72	61,2%
4,01	81,14	57,3%
4,00	76,20	53,8%
3,95	62,98	44,5%
3,90	51,58	36,4%
3,85	36,59	25,8%
3,80	24,29	17,1%
3,75	20,17	14,2%
3,70	16,96	12,0%
3,65	14,29	10,1%
3,60	11,99	8,5%
3,55	10,19	7,2%
3,50	8,53	6,0%
3,45	6,91	4,9%
3,40	5,70	4,0%
3,35	4,68	3,3%
3,30	3,79	2,7%
3,25	3,07	2,2%
3,20	2,45	1,7%
3,15	1,95	1,4%
3,10	1,53	1,1%
3,05	1,15	0,8%
3,00	0,83	0,6%

Как видно из представленных данных, заряд плеча аккумуляторного модуля до напряжения 4,20 Вольт, превышающего максимальное регламентированное напряжение на 50 мВ, обеспечил прирост энергоёмкости всего на 4,1%, что в совокупности с повышенной деградацией аккумуляторов в данном режиме работы подтверждает предположение о его нецелесообразности.

Для повышения наглядности представления полученных данных в программе «Microsoft Excel» был построен график зависимости отдаваемой плечом модуля энергоёмкости от величины зарядного напряжения, представленный на рисунке 2.7.

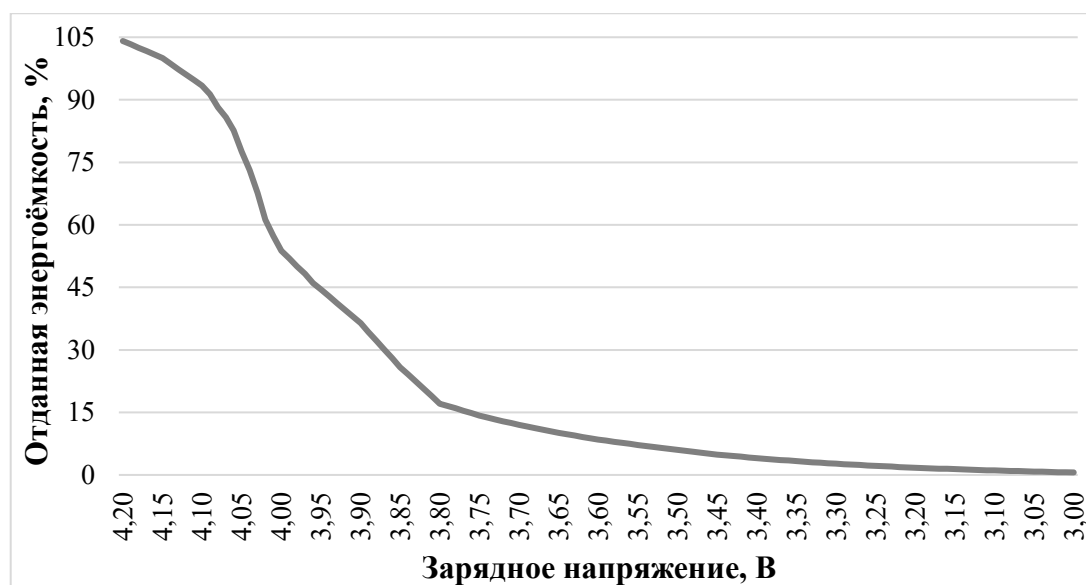


Рисунок 2.7 – Зависимость отданной плечом модуля энергоёмкости от величины зарядного напряжения

Следует отметить, что на графике, представленном на рисунке 2.7, отмечены значения зарядного напряжения от 4,20 до 3,00 Вольт с шагом 10 мВ. Значения энергоёмкости при напряжениях заряда, не рассматривавшихся в проведённых экспериментах (4,19-4,16; 4,14-4,11; 3,99-3,96 и т.д.) были найдены математически, как линейно убывающие от ближайшей большей до ближайшей меньшей известной энергоёмкости по формуле:

$$\begin{cases} E_2 = E_1 - \frac{(E_1 - E_6)}{5} \\ E_3 = E_2 - \frac{(E_2 - E_6)}{4} \\ E_4 = E_3 - \frac{(E_3 - E_6)}{3} \\ E_5 = E_4 - \frac{(E_4 - E_6)}{2} \end{cases} \quad (2.1)$$

где: E_1 – ближайшая большая известная энергоёмкость; E_6 – ближайшая меньшая известная энергоёмкость; E_2 , E_3 , E_4 , E_5 – неизвестные промежуточные энергоёмкости.

Кроме того, указанную систему уравнений можно преобразовать, выразив неизвестные промежуточные энергоёмкости исключительно через известные ближайшие большую и меньшую энергоёмкости:

$$\begin{cases} E_2 = 0,8E_1 + 0,2E_6 \\ E_3 = 0,6E_1 + 0,4E_6 \\ E_4 = 0,4E_1 + 0,6E_6 \\ E_5 = 0,2E_1 + 0,8E_6 \end{cases} \quad (2.2)$$

где: E_1 – ближайшая большая энергоёмкость; E_6 – ближайшая меньшая энергоёмкость; E_2, E_3, E_4, E_5 – неизвестные промежуточные энергоёмкости.

На основе полученного массива экспериментальных данных была разработана и зарегистрирована база данных (номер свидетельства RU 2026623297), содержащая более 41 тысячи ячеек с числовыми значениями зарядных напряжений (от 4,20 до 3,00 Вольт с шагом 10 мВ), напряжений в процессе разряда (при зарядных напряжениях от 4,20 до 3,00 Вольт с шагом 10 мВ) и процентным соотношением отданной энергоёмкости относительно заявленного производителем полного диапазона напряжений от 4,15 до 2,50 Вольт [77].

На основе созданной базы данных была зарегистрирована программа для ЭВМ (номер свидетельства RU 2025665761), позволяющая рассчитывать процент от полной энергоёмкости плеча аккумуляторного модуля (относительно заявленного производителем полного диапазона напряжений от 4,15 до 2,50 Вольт) при работе в заданном пользователем диапазоне напряжений, а также вычислять используемую энергоёмкость плеча модуля в заданном пользователем диапазоне напряжений от заданной полной энергоёмкости [78]. Разработанная программа призвана упростить вычисление энергоёмкости плеча модуля в задаваемом пользователем диапазоне рабочих напряжений, что позволит принимать решение о целесообразности или нецелесообразности применения батареи из аккумуляторных модулей в каждом конкретном случае.

2.4. Методика проведения экспериментального исследования по выявлению оптимального диапазона рабочих напряжений литий-ионных аккумуляторов

Одной из проблем применения аккумуляторных батарей в системах электроснабжения с ВИЭ является стоимость цикла «заряд-разряд», напрямую влияющая на себестоимость электроэнергии, получаемой от таких установок.

Существует ряд эксплуатационных факторов, непосредственно влияющих на срок службы аккумуляторных батарей. В их число входят ток заряда и разряда, температура эксплуатации, наличие плат защиты и устройств балансировки. Однако, одними из наиболее важных факторов, в существенной степени влияющих на деградацию ёмкости аккумуляторных батарей является напряжение их заряда и конечное напряжение разряда при циклическом режиме эксплуатации, поскольку каждый проведённый цикл «заряд-разряд» вызывает микроскопические изменения в структуре материалов анода и катода, снижая их способность удерживать ионы лития. Для определения влияния зарядного напряжения и конечного напряжения разряда на деградацию аккумуляторных модулей электромобиля Nissan Leaf при циклическом режиме эксплуатации необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Основываясь на данных, полученных при изучении зависимости энергоёмкости плеча модуля от величины зарядного напряжения, для исследования влияния зарядного напряжения на деградацию плеча аккумуляторного модуля были выбраны значения 4,15; 4,10 и 4,05 Вольт. Так как при дальнейшем снижении напряжения заряда энергоёмкость модуля стремительно снижается, в последующих экспериментах зарядные напряжения ниже 4,05 Вольт исследоваться не будут.

Влияние напряжений заряда, превышающих регламентированное производителем максимально допустимое напряжение плеча модуля 4,15 Вольт на деградацию модулей, исследоваться не будут, в виду низкого повышения энергоёмкости относительно заряда до разрешённого напряжения 4,15 Вольт, при сопутствующем снижении безопасности эксплуатации.

Поскольку в данной работе рассматривается возможность вторичного применения аккумуляторных модулей в стационарных системах накопления энергии, при выборе величин конечных напряжений разряда следует опираться на диапазон входного рабочего напряжения существующих установок, преобразующих постоянное напряжение от аккумуляторных батарей в переменное напряжение бытовой сети: автономных, комбинированных и гибридных инверторов, а также источников бесперебойного питания (ИБП).

Большинство таких установок изначально рассчитано на работу со свинцово-кислотными аккумуляторными батареями, а наиболее широкое распространение получили устройства с номинальным напряжением 12, 24 и 48 Вольт.

Согласно ГОСТ Р 53165-2020 конечное напряжение разряда свинцово-кислотной батареи с номинальным напряжением 12 Вольт составляет 10,5 Вольт [22]. У большинства инверторов и многих источников бесперебойного питания напряжение отключения по низкому входному напряжению установлено кратно этой величине: 10,5 Вольт для преобразователей с номинальным напряжением 12 Вольт, 21 Вольт для преобразователей с номинальным напряжением 24 Вольт и 42 Вольт для преобразователей с номинальным напряжением 48 Вольт.

В виду конструктивных особенностей аккумуляторных модулей, имеющих конфигурацию 2S2P, их применение в системах с номинальным напряжением 12 Вольт, на первый взгляд, представляется не оправданным, поскольку для таких систем требуется последовательное соединение трёх литий-ионных аккумуляторов (3S). В случае изготовления батареи с номинальным напряжением 12 Вольт из аккумуляторных модулей, потребуется применение двух последовательно соединённых модулей, причём из четырёх плеч двух модулей будет задействовано лишь три, а четвёртое плечо, содержащее четверть энергоёмкости батареи, останется не задействованным.

В то же время, в инверторах и ИБП с номинальным напряжением 24 Вольт возможно применение трёх последовательно соединённых модулей, с конфигурацией подключения плеч 6S. В такой схеме соединения преобразователи

будут отключаться при напряжении на плечах модулей по 3,5 Вольт. Также, возможно применение батареи, состоящей из четырёх последовательно соединённых модулей, где из восьми последовательно соединённых плеч будет задействовано семь (7S). Таким образом, в батарее останется не задействованным 12,5% от общей энергоёмкости. При этом преобразователи будут отключаться при напряжении на плечах модулей по 3 Вольт.

В инверторах и ИБП с номинальным напряжением 48 Вольт целесообразно применение батарей, состоящих из шести или семи последовательно соединённых модулей, причём батарея будет иметь конфигурацию 12S или 14S, а преобразователи будут отключаться при напряжении на плечах модулей по 3,5 Вольт или 3,00 Вольт соответственно. Также, возможно применение батареи из 7 последовательно соединённых модулей, в которых из 14 плеч будет задействовано 13. В таком случае, не задействованным останется одно плечо, содержащее около 7% от общей энергоёмкости батареи, а прекращение разряда будет наступать при напряжении на плечах модулей примерно по 3,25 Вольт.

Таким образом, для изучения влияния величины конечного напряжения разряда плеча модуля на его деградацию, были выбраны значения 3,50; 3,25 и 3,00 Вольт. Путём комбинирования выбранных для проведения эксперимента зарядных напряжений и конечных напряжений разряда было составлено 9 диапазонов рабочих напряжений плеч аккумуляторных модулей, представленных в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – 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%

Методика проведения исследования влияния диапазонов рабочих напряжений плеч аккумуляторных модулей электромобиля Nissan Leaf на их деградацию была основана на данных, полученных при проведении ранее описанных исследований. Для проведения исследования было отобрано 9 аккумуляторных модулей с наиболее близкими друг к другу параметрами энергоёмкости и внутреннего сопротивления плеч, из числа не исследовавшихся в разделе работы 2.3.2. Каждому модулю присваивался один из девяти описанных 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 Ампер до напряжения заряда присвоенного ему диапазона и снижения тока заряда до 0,1 Ампер. Затем, плечо модуля разряжалось током 10 Ампер 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 уменьшению 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.

По завершении циклических испытаний плечо модуля заряжалось начальным током 5 Ампер до напряжения 4,00 Вольт и снижения тока заряда до 0,1 Ампер для дальнейшего хранения.

Выводы по второй главе

1. Основными причинами деградации литий-ионных аккумуляторов являются рост слоя твёрдого электролита и осаждение лития на поверхности анода, растворение катодного материала и механическое разрушение активной массы электродов, а высокие токи заряда и разряда, работа при температурах менее 0°C и более 25°C, высокое напряжение заряда и глубокий разряд аккумуляторов ускоряют эти процессы.

2. Проведённая оценка технического состояния вторично используемых аккумуляторных модулей показала, что среднее внутреннее сопротивление плеча модуля составляет 1,17 мОм, что на 0,17 мОм выше номинального значения. Средняя энергоёмкость плеча модуля составляет 141,9 Вт*ч, что соответствует 56,76% от номинальной энергоёмкости.

3. Оценка влияния зарядного напряжения и конечного напряжения разряда на энергоёмкость аккумуляторных модулей показала, что плечо аккумуляторного модуля отдаёт 90% энергоёмкости при разряде в диапазоне от 4,15 до 3,50 Вольт. Установлено, что при снижении зарядного напряжения до 4,10 Вольт энергоёмкость уменьшается на 6,6%, а при снижении до 4,05 Вольт – на 22,4%.

4. Разработана методика проведения исследования по определению влияния диапазона рабочих напряжений аккумуляторных модулей на изменение их энергоёмкости при циклическом режиме эксплуатации. Для исследования влияния зарядного напряжения на изменение энергоёмкости плеча аккумуляторного модуля выбраны значения 4,15; 4,10 и 4,05 Вольт. Для исследования влияния конечного напряжения разряда выбраны значения 3,50; 3,25 и 3,00 Вольт.

Глава 3. Прогнозирование деградации энергоёмкости литий-ионных аккумуляторов при циклическом режиме эксплуатации

3.1. Исключение аномальных значений, проверка однородности дисперсий и объединение результатов параллельных опытов

При проведении двухфакторного эксперимента с тремя уровнями варьирования каждого фактора было исследовано девять комбинаций уровней факторов, что соответствует девяти различным диапазонам рабочих напряжений плеч аккумуляторных модулей, представленных в таблице 2.3.

Для повышения точности исследования в каждой из девяти комбинаций уровней факторов применялась двухкратная повторность. Таким образом, суммарно было проведено 18 независимых опытов, каждый из которых включал в себя 25 циклов «заряд-разряд» при заданных диапазонах рабочих напряжений. Энергоёмкость, отданная плечом модуля в каждом цикле, была выражена в процентах относительно энергоёмкости в первом цикле «заряд-разряд» для удобства представления полученных данных. Результаты 18 проведённых опытов (а именно отданная каждым плечом энергоёмкость в 25 циклах «заряд-разряд») представлены в приложениях 1-3.

Для обеспечения корректной интерпретации полученных при проведении эксперимента результатов был выполнен поиск и исключение аномальных значений энергоёмкостей при помощи Z-теста [92]. Проведём Z-тест энергоёмкостей первого плеча аккумуляторного модуля, эксплуатировавшегося при диапазоне напряжений 4,05-3,00 Вольт, полученных в 25 циклах «заряд-разряд» (приложение 1).

Расчёт Z-теста выполняется по формуле:

$$z_i = \frac{y_i - (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i))^2}}, \quad (3.1)$$

где y_i – отдельное значение в массиве данных; $\bar{y}$ – среднее арифметическое значение массива данных; s – стандартное отклонение массива данных; n – число значений в массиве данных.

Найдём среднее арифметическое значение указанного массива данных:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i. \quad (3.2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{25} \times (100,00 + 97,89 + 97,50 + 97,14 + 96,96 + 96,68 + 96,60 + 96,51 + 96,59 + 96,63 + 96,61 + 96,47 + 96,52 + 96,33 + 96,38 + 96,27 + 96,24 + 96,03 + 96,13 + 96,02 + 96,02 + 95,94 + 95,86 + 95,86 + 95,87) = \frac{1}{25} \times 2415,07 = 96,60.$$

Далее найдём стандартное отклонение указанного массива данных:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (3.3)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{25-1} \times (100,00 - 96,60)^2 + (97,89 - 96,60)^2 + (97,50 - 96,60)^2 + (97,14 - 96,60)^2 + (96,96 - 96,60)^2 + (96,68 - 96,60)^2 + (96,60 - 96,60)^2 + (96,51 - 96,60)^2 + (96,59 - 96,60)^2 + (96,63 - 96,60)^2 + (96,61 - 96,60)^2 + (96,47 - 96,60)^2 + (96,52 - 96,60)^2 + (96,33 - 96,60)^2 + (96,38 - 96,60)^2 + (96,27 - 96,60)^2 + (96,24 - 96,60)^2 + (96,03 - 96,60)^2 + (96,13 - 96,60)^2 + (96,02 - 96,60)^2 + (96,02 - 96,60)^2 + (95,94 - 96,60)^2 + (95,86 - 96,60)^2 + (95,86 - 96,60)^2 + (95,87 - 96,60)^2} = \sqrt{\frac{1}{24} \times 18,13} \approx 0,8691.$$

Затем, проведём Z-оценку каждого значения массива данных:

$$z_i = \frac{y_i - \bar{y}}{s}. \quad (3.4)$$

Следует отметить, что Z-оценка представляет собой безразмерную величину, которая показывает, насколько наблюдаемое значение отличается от среднего арифметического значения массива данных. Величина Z-оценки количественно выражает отклонение наблюдаемой величины от среднего арифметического значения массива данных в единицах стандартного отклонения, при этом положительные значения указывают на положение выше среднего, а отрицательные – ниже среднего арифметического значения массива данных [158].

Метод Z-оценки имеет непосредственную связь с нормальным распределением: при нормально распределённых данных около 68,27% наблюдений имеют Z-оценку в пределах ± 1 , около 95% наблюдений должны иметь

Z-оценки в диапазоне ± 2 , а примерно 99,7% – в диапазоне ± 3 . Наблюдаемые значения, превышающие установленный порог (как правило, ± 2 или ± 3) считаются потенциальными выбросами, маловероятными при нормальном распределении и исключаются [71].

Для поиска и исключения аномальных значений энергоёмкостей в виду сравнительно малого объёма исследуемого массива экспериментальных данных был выбран порог Z-оценки равный $|2|$.

Результаты Z-оценки отданной при разряде энергоёмкости в каждом цикле «заряд-разряд» для первого плеча аккумуляторного модуля, эксплуатировавшегося при рабочем диапазоне напряжений 4,05-3,00 Вольт представлены в таблице 3.1. Результаты Z-оценки значений прочих массивов данных представлены в приложении 4.

Таблица 3.1 – Z-оценки отданной при разряде энергоёмкости в первом опыте

№ разряда	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z-оценка	3,91	1,48	1,03	0,62	0,41	0,09	0,00	-0,10	-0,01	0,04
№ разряда	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Z-оценка	0,01	-0,15	-0,09	-0,31	-0,26	-0,38	-0,42	-0,66	-0,55	-0,68
№ разряда	21	22	23	24	25					
Z-оценка	-0,68	-0,76	-0,85	-0,85	-0,84					

Как видно из представленных в таблице данных, отданная плечом модуля энергоёмкость при первом разряде имеет Z-оценку, превышающую установленный порог $|2|$, что даёт основание считать данное значение аномальным и исключить его с целью повышения качества дальнейшего анализа экспериментальных данных.

После исключения аномальных значений энергоёмкости из всех 18 массивов данных, для дальнейшей статистической обработки необходимо выполнить проверку возможности объединения массивов данных, полученных при проведении параллельных опытов в идентичных условиях испытаний.

Проведём проверку однородности дисперсий параллельных опытов. Для двух массивов данных, очищенных от аномальных значений, вычислим по формуле 3.2 выборочные средние энергоёмкости для первого плеча ($\bar{y}_1$) и для второго плеча ($\bar{y}_2$) аккумуляторного модуля, эксплуатировавшихся при рабочем диапазоне напряжений 4,05-3,00 Вольт.

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{24} \times (97,89 + 97,50 + 97,14 + 96,96 + 96,68 + 96,60 + 96,51 + 96,59 + 96,63 + 96,61 + 96,47 + 96,52 + 96,33 + 96,38 + 96,27 + 96,24 + 96,03 + 96,13 + 96,02 + 96,02 + 95,94 + 95,86 + 95,86 + 95,87) = \frac{1}{24} \times 2315,07 \approx 96,46.$$

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{24} \times (99,06 + 98,60 + 98,29 + 98,11 + 97,94 + 97,72 + 97,58 + 97,50 + 97,46 + 97,46 + 97,31 + 97,25 + 97,23 + 97,14 + 97,12 + 97,04 + 97,04 + 97,00 + 96,98 + 97,01 + 97,00 + 96,93 + 96,94 + 96,89) = \frac{1}{24} \times 2338,56 \approx 97,44.$$

Найдём стандартные отклонения энергоёмкости s_1 для первого плеча аккумуляторного модуля и s_2 для второго плеча аккумуляторного модуля по формуле 3.3.

$$s_1 = \sqrt{\frac{1}{24-1} \times (97,89 - 96,46)^2 + (97,50 - 96,46)^2 + (97,14 - 96,46)^2 + (96,96 - 96,46)^2 + (96,68 - 96,46)^2 + (96,60 - 96,46)^2 + (96,51 - 96,46)^2 + (96,59 - 96,46)^2 + (96,63 - 96,46)^2 + (96,61 - 96,46)^2 + (96,47 - 96,46)^2 + (96,52 - 96,46)^2 + (96,33 - 96,46)^2 + (96,38 - 96,46)^2 + (96,27 - 96,46)^2 + (96,24 - 96,46)^2 + (96,03 - 96,46)^2 + (96,13 - 96,46)^2 + (96,02 - 96,46)^2 + (96,02 - 96,46)^2 + (95,94 - 96,46)^2 + (95,86 - 96,46)^2 + (95,86 - 96,46)^2 + (95,87 - 96,46)^2} = \sqrt{\frac{1}{23} \times 6,11} \approx 0,5153.$$

$$s_2 = \sqrt{\frac{1}{24-1} \times (99,06 - 97,44)^2 + (98,60 - 97,44)^2 + (98,29 - 97,44)^2 + (98,11 - 97,44)^2 + (97,94 - 97,44)^2 + (97,72 - 97,44)^2 + (97,58 - 97,44)^2 + (97,50 - 97,44)^2 + (97,46 - 97,44)^2 + (97,46 - 97,44)^2 + (97,31 - 97,44)^2 + (97,25 - 97,44)^2 + (97,23 - 97,44)^2 + (97,14 - 97,44)^2 + (97,12 - 97,44)^2 + (97,04 - 97,44)^2 + (97,04 - 97,44)^2 + (97,00 - 97,44)^2 + (96,98 - 97,44)^2 + (97,01 - 97,44)^2 + (97,00 - 97,44)^2 + (96,93 - 97,44)^2 + (96,94 - 97,44)^2 + (96,89 - 97,44)^2} = \sqrt{\frac{1}{23} \times 7,72} \approx 0,5794.$$

Для проверки гипотезы о равенстве дисперсий двух массивов данных, полученных при проведении параллельных опытов, выполним проверку однородности дисперсий посредством критерия Фишера (F-тест) [71].

$$F = \frac{s_2^2}{s_1^2}, \text{ где } s_2^2 > s_1^2. \quad (3.5)$$

$$F = \frac{0,5794^2}{0,5153^2} = \frac{0,3357}{0,2655} \approx 1,2644.$$

Сравним полученное значение F-теста с критическим значением $F_{\text{крит}}$ из таблицы распределения Фишера. Для степеней свободы $f_1=f_2=23$, (где $f_1=n_1-1$; $f_2=n_2-1$) при уровне значимости $\alpha=0,05$ согласно табличным данным $F_{\text{крит}}=2,01$ [71]. Поскольку вычисленный критерий Фишера меньше критического значения, разница между дисперсиями массивов данных параллельных опытов статистически не значима, а выборки принимаются как однородные и могут быть объединены. Результаты проверок гипотез о равенстве дисперсий прочих параллельных опытов посредством F-тестов представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Проверка равенства дисперсий параллельных опытов

№ диапазона	Диапазон рабочих напряжений, В	Дисперсия плеча модуля	F	F _{крит}
1	4,05÷3,00	0,266	1,264	2,01
		0,336		
2	4,05÷3,25	0,759	1,127	
		0,673		
3	4,05÷3,50	0,314	1,574	
		0,495		
4	4,10÷3,00	0,120	1,119	
		0,135		
5	4,10÷3,25	0,136	1,224	1,98
		0,166		
6	4,10÷3,50	0,137	1,028	2,01
		0,133		
7	4,15÷3,00	0,156	1,995	
		0,310		
8	4,15÷3,25	0,980	1,984	
		0,494		
9	4,15÷3,50	0,180	1,028	
		0,175		

Для наиболее корректного объединения массивов данных, полученных при проведении параллельных опытов рассчитаем средневзвешенные значения. Объединённое среднее взвешенное значение энергоёмкости каждого цикла разряда двух массивов данных $y_{\text{объедин}}$ вычисляется по формуле:

$$y_{\text{объедин}i} = \frac{w_1 \times y_{1i} + w_2 \times y_{2i}}{w_1 + w_2}, \quad (3.6)$$

где y_{1i} и y_{2i} – отдельные значения в массивах данных 1 и 2 соответственно;
 w_1 и w_2 – веса массивов 1 и 2 соответственно.

При этом, веса двух массивов данных находятся следующим образом:

$$w_1 = \frac{1}{s_1^2},$$

$$w_2 = \frac{1}{s_2^2},$$

$$w_1 = \frac{1}{0,5153^2} = \frac{1}{0,2655} \approx 3,7665.$$

$$w_2 = \frac{1}{0,5794^2} = \frac{1}{0,3357} \approx 2,9789.$$
(3.7)

Объединённые средние значения энергоёмкости двух массивов данных для каждого цикла «заряд-разряд» аккумуляторного модуля, эксплуатировавшегося при рабочем диапазоне напряжений плеча 4,05-3,00 Вольт представлены в таблице 3.3. Объединённые средние значения энергоёмкости массивов данных, полученных при прочих диапазонах рабочих напряжений представлены в приложении 5.

Таблица 3.3 – Взвешенные средние значения энергоёмкости

№ цикла	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>Уобъедин</i>	98,41	97,98	97,65	97,47	97,24	97,10	96,99	96,99	97,00	96,99	96,84	96,84
№ цикла	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
<i>Уобъедин</i>	96,73	96,72	96,65	96,59	96,47	96,51	96,44	96,45	96,41	96,33	96,34	96,32

3.2. Определение вида, параметров уравнений регрессии и оценка достоверности полученных результатов

После объединения массивов данных необходимо произвести выбор типа функции, наилучшим образом описывающей имеющиеся обработанные экспериментальные данные. Поскольку интервалы между уровнями ряда одинаковы, для подбора вида уравнения регрессии применён метод конечных разностей [6].

При этом, разности последовательных уровней ряда будут являться конечными разностями первого порядка:

$$\Delta_t^1 = Y_t - Y_{t-1},$$
(3.8)

где Δ_t^1 – конечная разность 1-го порядка, Y_t – уровень ряда.

Разности последовательных конечных разностей первого порядка будут являться конечными разностями второго порядка:

$$\Delta_t^2 = \Delta_t^1 - \Delta_{t-1}^1, \quad (3.9)$$

где Δ_t^2 – конечная разность 2-го порядка.

Разности последовательных конечных разностей второго порядка будут являться конечными разностями третьего порядка:

$$\Delta_t^3 = \Delta_t^2 - \Delta_{t-1}^2, \quad (3.10)$$

где Δ_t^3 – конечная разность 3-го порядка.

При постоянных конечных разностях 1-го порядка и равных нулю конечных разностях 2-го порядка, функция будет выражаться линейным уравнением вида $y=a+b \times t$. При постоянных конечных разностях 2-го порядка и равных нулю конечных разностях 3-го порядка, функция будет представлена параболой с уравнением вида $y=a+b \times t+c \times t^2$. В случае приблизительно постоянных темпов роста, график будет представлен экспоненциальной функцией с уравнением вида $y=a \times e^{b \times t}$.

Для выбора вида функции деградации энергоёмкости аккумуляторного модуля, эксплуатировавшегося при рабочем диапазоне напряжений 4,05-3,00 Вольт рассмотрим таблицу 3.4. Аналогичные таблицы при прочих диапазонах рабочих напряжений представлены в приложениях 6-8.

Таблица 3.4 – Определение вида функции методом конечных разностей

<i>У объедин i</i>	Конечная разность 1-го порядка Δ_t^1	Конечная разность 2-го порядка Δ_t^2	Конечная разность 3-го порядка Δ_t^3	Темп роста
98,41	-	-	-	-
97,98	0,42	-	-	0,996
97,65	0,34	0,09	-	0,997
97,47	0,18	0,16	-0,07	0,998
97,24	0,23	-0,05	0,21	0,998
97,10	0,14	0,09	-0,14	0,999
96,99	0,11	0,03	0,06	0,999
96,99	-0,01	0,12	-0,09	1,000
97,00	-0,01	0,00	0,12	1,000
96,99	0,01	-0,02	0,02	1,000
96,84	0,14	-0,13	0,12	0,999
96,84	0,00	0,15	-0,28	1,000
96,73	0,12	-0,12	0,27	0,999
96,72	0,01	0,11	-0,22	1,000
96,65	0,07	-0,06	0,17	0,999
96,59	0,06	0,02	-0,08	0,999
96,47	0,12	-0,06	0,08	0,999
96,51	-0,04	0,16	-0,22	1,000
96,44	0,07	-0,11	0,27	0,999
96,45	-0,01	0,08	-0,19	1,000
96,41	0,04	-0,06	0,14	1,000
96,33	0,08	-0,03	-0,03	0,999
96,34	0,00	0,08	-0,11	1,000
96,32	0,02	-0,02	0,10	1,000

Поскольку в таблице 3.4 темпы роста представляют собой практически неизменные значения, график будет представлен экспоненциальной функцией.

При помощи метода наименьших квадратов найдём параметры экспоненциального уравнения, описывающего деградацию энергоёмкости плеча аккумуляторного модуля при диапазоне рабочих напряжений 4,05-3,00 Вольт. Для этого составим таблицу 3.5. Таблицы, соответствующие прочим диапазонам рабочих напряжений представлены в приложениях 9-11.

Таблица 3.5 – Данные для составления системы уравнений методом
наименьших квадратов

t	Уобъедин.	ln(y)	t ²	ln(y) ²	t×ln(y)
2	98,41	4,59	4	21,06	9,18
3	97,98	4,58	9	21,02	13,75
4	97,65	4,58	16	20,99	18,33
5	97,47	4,58	25	20,97	22,90
6	97,24	4,58	36	20,95	27,46
7	97,10	4,58	49	20,94	32,03
8	96,99	4,57	64	20,93	36,60
9	96,99	4,57	81	20,93	41,17
10	97,00	4,57	100	20,93	45,75
11	96,99	4,57	121	20,93	50,32
12	96,84	4,57	144	20,91	54,88
13	96,84	4,57	169	20,91	59,45
14	96,73	4,57	196	20,90	64,01
15	96,72	4,57	225	20,90	68,58
16	96,65	4,57	256	20,89	73,14
17	96,59	4,57	289	20,89	77,70
18	96,47	4,57	324	20,88	82,25
19	96,51	4,57	361	20,88	86,82
20	96,44	4,57	400	20,88	91,38
21	96,45	4,57	441	20,88	95,95
22	96,41	4,57	484	20,87	100,51
23	96,33	4,57	529	20,86	105,06
24	96,34	4,57	576	20,87	109,63
25	96,32	4,57	625	20,86	114,19
Сумма	324	2325,44	109,77	5524	502,03
Среднее	13,5	96,89	4,57	230,17	61,71

При этом система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} \ln(a) \times n + b \times \sum t = \sum \ln(y) \\ \ln(a) \times \sum t + b \times \sum t^2 = \sum \ln(y) \times t. \end{cases} \quad (3.11)$$

Основываясь на данных, полученных из таблицы 3.5 и формуле 3.11 подставим полученные значение в систему уравнений:

$$\begin{cases} \ln(a) \times 24 + b \times 324 = 109,77 \\ \ln(a) \times 324 + b \times 5524 = 1481,02. \end{cases}$$

Из первого уравнения выразим ln(a):

$$\ln(a) \times 24 + b \times 324 = 109,77;$$

$$\ln(a) \times 24 = 109,77 - 324 \times b;$$

$$\ln(a) = \frac{109,77 - 324 \times b}{24}.$$

Подставим полученное значение во второе уравнение:

$$\begin{aligned} \left(\frac{109,77 - 324 \times b}{24} \right) \times 324 + b \times 5524 &= 1481,02; \\ \frac{109,77 \times 324 - 324 \times b \times 324}{24} + 5524 \times b &= 1481,02; \\ \frac{35563,08 - 104976 \times b}{24} + 5524 \times b &= 1481,02. \end{aligned}$$

Выполним устранение знаменателя:

$$\begin{aligned} 35563,08 - 104976 \times b + 5524 \times 24 \times b &= 1481,02 \times 24; \\ 35563,08 - 104976 \times b + 132576 \times b &= 35544,48; \\ 35563,08 + 27600 \times b &= 35544,48. \end{aligned}$$

Выразим b:

$$\begin{aligned} 27600 \times b &= 35544,48 - 35563,08; \\ 27600 \times b &= -18,6; \\ b &= \frac{-18,6}{27600} \approx -0,0007. \end{aligned}$$

Подставим значение b в уравнение:

$$\begin{aligned} \ln(a) &= \frac{109,77 - 324 \times (-0,0007)}{24}; \\ \ln(a) &= \frac{109,77 + 0,2268}{24}; \\ \ln(a) &= \frac{109,9968}{24} \approx 4,583. \end{aligned}$$

Найдём значение a:

$$a = e^{4,583} \approx 97,81.$$

Таким образом, $a \approx 97,81$; $b \approx -0,0007$. При этом, уравнение регрессии будет выглядеть следующим образом:

$$y = 97,81 \times e^{-0,0007 \times t}.$$

Уравнения регрессии для прочих диапазонов рабочих напряжений представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – 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	$y=99,65 \times e^{-0,0005 \times t}$

Выполним проверку качества полученного уравнения регрессии. Для этого определим среднюю относительную ошибку аппроксимации $\bar{A}$, демонстрирующую усреднённое процентное отклонение предсказанных значений энергоёмкости, полученных из разработанных уравнений регрессии от объединённых экспериментальных значений.

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{\text{объедин } i} - \hat{y}_i}{y_{\text{объедин } i}} \right| \times 100\%, \quad (3.12)$$

где $y_{\text{объедин } i}$ – объединённые экспериментально полученные значения, $\hat{y}_i$ – предсказанные значения, n – число наблюдений.

Результаты расчёта относительной ошибки аппроксимации полученного уравнения регрессии, описывающего деградацию энергоёмкости плеча аккумуляторного модуля при диапазоне рабочих напряжений 4,05-3,00 Вольт представлены в таблице 3.7. Расчёты относительной ошибки аппроксимации уравнений регрессии, описывающих деградацию энергоёмкости плеча аккумуляторного модуля при прочих диапазонах рабочих напряжений представлены в приложениях 12-14.

Таблица 3.7 – Расчёт относительной ошибки аппроксимации уравнения регрессии $y=97,81 \times e^{-0,0007 \times t}$

t	У объедин i	$\hat{y}_i$	$\bar{A}$
2	98,41	97,67	0,0075
3	97,98	97,60	0,0039
4	97,65	97,54	0,0011
5	97,47	97,47	0,0000
6	97,24	97,40	0,0017
7	97,10	97,33	0,0024
8	96,99	97,26	0,0029
9	96,99	97,20	0,0021
10	97,00	97,13	0,0013
11	96,99	97,06	0,0008
12	96,84	96,99	0,0016
13	96,84	96,92	0,0008
14	96,73	96,86	0,0013
15	96,72	96,79	0,0007
16	96,65	96,72	0,0008
17	96,59	96,65	0,0006
18	96,47	96,59	0,0012
19	96,51	96,52	0,0001
20	96,44	96,45	0,0001
21	96,45	96,38	0,0007
22	96,41	96,32	0,0010
23	96,33	96,25	0,0009
24	96,34	96,18	0,0016
25	96,32	96,11	0,0022
Сумма:			0,0373
A			0,16%

Считается, что уравнение, имеющее ошибку аппроксимации менее 5-7% достоверно описывает экспериментальные данные. Поскольку в данном случае ошибка аппроксимации уравнения регрессии составляет лишь 0,16% данное уравнение описывает деградацию энергоёмкости плеча аккумуляторного модуля с высокой точностью.

Для оценки прогноза уравнения регрессии $y=97,81 \times e^{-0,0007 \times t}$ рассчитаем коэффициент несоответствия Тейла, позволяющий оценить качество воспроизведения моделью исходного массива данных [68]. Расчёт для указанного уравнения представлен в таблице 3.8. Расчёты для прочих уравнений регрессии представлены в приложениях 15-17.

$$K_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{\text{объедин } i} - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n y_{\text{объедин } i}^2}}. \quad (3.13)$$

Таблица 3.8 – Расчёт коэффициента несоответствия Тейла для уравнения регрессии $y=97,81 \times e^{-0,0007 \times t}$

t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	$(y_{\text{объедин } i} - \hat{y}_i)^2$	$y_{\text{объедин } i}^2$
2	98,41	97,67	0,5395	9684,07
3	97,98	97,60	0,1436	9600,82
4	97,65	97,54	0,0123	9535,00
5	97,47	97,47	0,0000	9499,94
6	97,24	97,40	0,0266	9455,04
7	97,10	97,33	0,0553	9427,76
8	96,99	97,26	0,0776	9406,13
9	96,99	97,20	0,0417	9407,37
10	97,00	97,13	0,0171	9408,41
11	96,99	97,06	0,0055	9406,22
12	96,84	96,99	0,0226	9378,29
13	96,84	96,92	0,0064	9378,75
14	96,73	96,86	0,0165	9356,26
15	96,72	96,79	0,0051	9354,21
16	96,65	96,72	0,0055	9340,50
17	96,59	96,65	0,0039	9329,70
18	96,47	96,59	0,0130	9306,75
19	96,51	96,52	0,0000	9314,34
20	96,44	96,45	0,0001	9300,65
21	96,45	96,38	0,0049	9303,15
22	96,41	96,32	0,0088	9294,68
23	96,33	96,25	0,0073	9280,12
24	96,34	96,18	0,0247	9280,95
25	96,32	96,11	0,0435	9277,88
Сумма			1,0814	225326,97
Коэффициент Тейла:			0,0022	

Поскольку коэффициент Тейла близок к нулю, разработанная модель описывает массив экспериментальных данных с высокой точностью.

Выполним расчёт коэффициента детерминации (R^2), демонстрирующего долю дисперсии зависимой переменной, объяснённую уравнением регрессии.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{\text{объедин } i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (3.14)$$

Расчёт коэффициента детерминации для уравнения регрессии $y=97,81 \times e^{-0,0007 \times t}$ представлен в таблице 3.9. Расчёты коэффициентов детерминации для прочих уравнений регрессии представлены в приложениях 18-20.

Таблица 3.9 – Расчёт коэффициента детерминации

t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	$(y_i - y_{\text{объедин } i})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
2	98,41	97,67	0,5395	2,2928
3	97,98	97,60	0,1436	1,1887
4	97,65	97,54	0,0123	0,5683
5	97,47	97,47	0,0000	0,3297
6	97,24	97,40	0,0266	0,1180
7	97,10	97,33	0,0553	0,0413
8	96,99	97,26	0,0776	0,0084
9	96,99	97,20	0,0417	0,0096
10	97,00	97,13	0,0171	0,0107
11	96,99	97,06	0,0055	0,0085
12	96,84	96,99	0,0226	0,0027
13	96,84	96,92	0,0064	0,0025
14	96,73	96,86	0,0165	0,0275
15	96,72	96,79	0,0051	0,0311
16	96,65	96,72	0,0055	0,0611
17	96,59	96,65	0,0039	0,0919
18	96,47	96,59	0,0130	0,1781
19	96,51	96,52	0,0000	0,1464
20	96,44	96,45	0,0001	0,2057
21	96,45	96,38	0,0049	0,1941
22	96,41	96,32	0,0088	0,2348
23	96,33	96,25	0,0073	0,3137
24	96,34	96,18	0,0247	0,3089
25	96,32	96,11	0,0435	0,3269
Сумма	2325,44	2325,39	1,0814	6,7014
Среднее	96,89			

$$R^2 = 1 - \frac{1,0814}{6,7014} \approx 0,8386.$$

Величина рассчитанного коэффициента детерминации свидетельствует о высокой точности подбора уравнения регрессии.

Для проверки гипотезы о статистической значимости уравнения регрессии, при помощи коэффициента детерминации рассчитаем критерий Фишера:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \times \frac{n - m - 1}{m}, \quad (3.15)$$

где m – число факторов в уравнении регрессии.

$$F = \frac{0,8386}{1 - 0,8386} \times \frac{24 - 1 - 1}{1} = \frac{0,8386}{0,1614} \times 22 \approx 114,3.$$

Из справочной таблицы найдём $F_{\text{крит}}$ для степени свободы числителя $df_1=22$ и степени свободы знаменателя $df_2=1$ при уровне значимости 0,05. Согласно табличным данным, $F_{\text{крит}}(1;22;0,05)=4,30$ [71]. Поскольку $F > F_{\text{крит}}$, коэффициенты детерминации уравнения регрессии являются статистически значимыми. Результаты расчётов критериев Фишера для прочих уравнений регрессии представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Результаты расчёта критериев Фишера для полученных уравнений регрессии

Уравнение регрессии	R^2	F	$F_{\text{крит}}$
$y=97,81 \times e^{-0,0007 \times t}$	0,8386	114,3	4,30
$y=98,65 \times e^{-0,0011 \times t}$	0,8988	195,5	
$y=98,73 \times e^{-0,0008 \times t}$	0,8986	195,0	
$y=99,60 \times e^{-0,0005 \times t}$	0,9761	899,0	
$y=100,12 \times e^{-0,0005 \times t}$	0,9147	246,5	4,26
$y=99,70 \times e^{-0,0005 \times t}$	0,9448	376,4	4,30
$y=99,04 \times e^{-0,0006 \times t}$	0,9353	318,0	
$y=99,02 \times e^{-0,0010 \times t}$	0,8737	152,1	
$y=99,65 \times e^{-0,0005 \times t}$	0,8952	187,9	

Поскольку рассчитанные критерии Фишера превышают соответствующие им критические значения, полученные уравнения регрессии являются статистически значимыми. На основании полученных уравнений регрессии были построены графики прогноза снижения энергоёмкости плеч аккумуляторных модулей при различных диапазонах рабочих напряжений (приложения 21-23).

3.3. Анализ коэффициентов полезного действия циклов «заряд-разряд» плеч аккумуляторных модулей при различных диапазонах напряжений

Проведём анализ КПД циклов «заряд-разряд» плеч аккумуляторных модулей при различных диапазонах рабочих напряжений. В данном случае, под КПД цикла «заряд-разряд» следует понимать отношение энергии, отданной при разряде плеча модуля к энергии, затраченной на заряд плеча модуля в ватт-часах. Расчёты КПД циклов «заряд-разряд», их средних арифметических значений, рассчитанных по формуле 3.2 и стандартных отклонений, рассчитанных по формуле 3.3 при различных диапазонах рабочих напряжений приведены в приложениях 24-26.

Затем, при помощи Z-оценки проведём поиск аномальных значений КПД по формуле 3.4, причём порог Z-оценки примем равным $|3|$. Результаты Z-оценки коэффициентов полезного действия в каждом цикле «заряд-разряд» плеч аккумуляторных модулей представлены в приложении 27. Следует отметить, что при выбранном пороге Z-оценки в полученных массивах данных выпадающих значений не обнаружено.

Для оценки возможности объединения массивов данных, полученных при проведении параллельных опытов, проведём проверку статистического равенства массивов данных посредством двухвыборочного теста Стьюдента [71].

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2 \times f_1 + s_2^2 \times f_2}{f_1 + f_2}}} \times \sqrt{\frac{n_1 \times n_2}{n_1 + n_2}}, \quad (3.16)$$

где $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение массива данных; s^2 – дисперсия массива данных; $f = n - l$ – степень свободы; n – число значений в массиве данных.

Проведём двухвыборочный тест Стьюдента для установления различий между средними величинами КПД в параллельных опытах при диапазоне рабочих напряжений 4,05-3,00.

$$t = \frac{|95,37 - 95,42|}{\sqrt{\frac{0,0817^2 \times 23 + 0,0762^2 \times 23}{23 + 23}}} \times \sqrt{\frac{24 \times 24}{24 + 24}};$$

$$t = \frac{|0,05|}{\sqrt{\frac{0,0067 \times 23 + 0,0058 \times 23}{46}}} \times \sqrt{\frac{576}{48}};$$

$$t = \frac{0,05}{\sqrt{\frac{0,1541 + 0,1334}{46}}} \times \sqrt{12};$$

$$t = \frac{0,05}{\sqrt{0,00625}} \times \sqrt{12};$$

$$t \approx \frac{0,05}{0,079} \times 3,464 \approx 2,19.$$

Сравним полученное значение критерия Стьюдента с критическим значением $t_{\text{крит}}$ из таблицы распределения. Для степеней свободы $f_1=f_2=23$, (где $f_1=n_1-1$; $f_2=n_2-1$) при уровне значимости $\alpha=0,01$ согласно табличным справочным данным $t_{\text{крит}}=2,687$.

Так как 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. Результаты проверок гипотез о равенстве средних значений параллельных опытов при прочих диапазонах рабочих напряжений представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Проверка равенства средних значений параллельных опытов

№ диапазона	Диапазон рабочих напряжений, В	t	t _{крит.}
1	4,05÷3,00	2,19	2,687
2	4,05÷3,25	2,36	
3	4,05÷3,50	1,26	
4	4,10÷3,00	1,93	
5	4,10÷3,25	1,58	
6	4,10÷3,50	0,22	
7	4,15÷3,00	2,45	
8	4,15÷3,25	1,04	
9	4,15÷3,50	0,52	

В целях объединения массивов данных применим формулу 3.7 для определения весов массивов данных, а также формулу 3.6 для определения взвешенного среднего значения КПД в каждом цикле «заряд-разряд». Результаты проведённых вычислений взвешенных средних значений КПД циклов «заряд-разряд» представлены в приложении 28. Результаты расчётов средних арифметических взвешенных коэффициентов полезного действия для каждого диапазона рабочих напряжений представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Средние арифметические взвешенные 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%

Выводы по третьей главе

1. 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 «заряд-разряд».

2. Установлено, что деградацию энергоёмкости плеч аккумуляторных модулей при циклических режимах эксплуатации наилучшим образом описывают экспоненциальные функции, а коэффициенты детерминации разработанных математических моделей превышают 83%. Наименьшая деградация энергоёмкости плеч аккумуляторных модулей наблюдается при диапазоне рабочих напряжений 4,10-3,50 Вольт, при этом снижение энергоёмкости на 20% происходит через 450 циклов «заряд-разряд», на 40% – через 1000, а на 60% – через 1800 циклов.

3. Проведённые исследования показали, что при всех исследуемых диапазонах рабочих напряжений плеч аккумуляторных модулей энергетический КПД цикла «заряд-разряд» превышает 95%.

4. Математическая обработка экспериментально полученных КПД циклов «заряд-разряд» плеч аккумуляторных модулей показала, что повышение конечного напряжения разряда аккумуляторов приводит к увеличению коэффициента полезного действия. Наибольший КПД цикла «заряд-разряд», составляющий 96,42% наблюдается при диапазоне рабочих напряжений 4,10-3,50 Вольт.

Глава 4. Разработка технических решений по оптимизации изготовления и применения аккумуляторных батарей для стационарного хранения энергии

4.1. Конструкции и применение аккумуляторных батарей, изготовленных из аккумуляторных модулей в установках электроснабжения с ВИЭ

В серийно выпускаемых аккумуляторных батареях, а также в инструкциях по совместной эксплуатации плат BMS и активных балансиров используются схемы подключения, в которых BMS и плата активного балансира должны быть предназначены для подключения строго одинакового числа последовательно соединённых аккумуляторов. В качестве примера, приведём разработанную схему подключения платы BMS 6S и активного конденсаторного балансира 6S к батарее из трёх последовательно соединённых аккумуляторных модулей (рисунок 4.1). Внешний вид батареи из аккумуляторных модулей, изготовленной по схеме 6S при выполнении работы представлен в приложениях 29-30. Подбор модулей для изготовления аккумуляторной батареи производился в соответствии с разработанной методикой, представленной в разделе 2.2 данной работы.

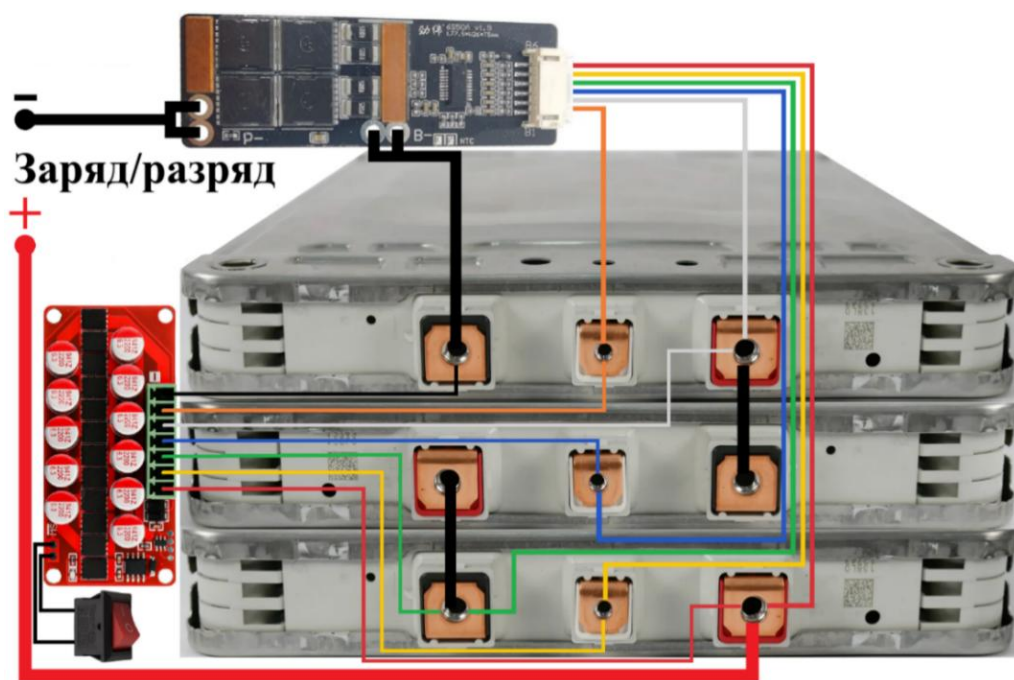


Рисунок 4.1 – Схема подключения BMS 6S и активного конденсаторного балансира 6S к батарее из трёх последовательно соединённых аккумуляторных модулей

Однако, как было отмечено ранее, в связи с ограничениями, обусловленными допустимым диапазоном напряжений питания и заряда комбинированных и гибридных инверторов, при изготовлении аккумуляторной батареи может быть необходимо задействовать нечётное число последовательно соединённых плеч аккумуляторных модулей, а одно из плеч останется не задействованным в работе батареи. При этом, внесение изменений в схему соединения аккумуляторов в самом модуле хоть и возможно, однако весьма трудоёмко и сопряжено с риском повреждения аккумуляторов в процессе выполнения работ, что делает проведение данной процедуры нецелесообразным.

Для обеспечения возможности изготовления батарей с нечётным числом используемых последовательно соединённых плеч аккумуляторных модулей без потери энергоёмкости, вызванной наличием в батарее неиспользуемого плеча, нами был разработан метод активной балансировки аккумуляторной батареи с балластным аккумулятором [40]. На рисунке 4.2 представлена разработанная схема батареи из четырёх соединённых последовательно аккумуляторных модулей, в которой BMS 7S подключена ко всем плечам модулей кроме последнего, а активный конденсаторный балансир подключен ко всем плечам модулей. Внешний вид батарей из аккумуляторных модулей, изготовленных нами по схеме 7S представлен в приложениях 31-34. Аккумуляторные модули, применённые при сборке батарей, были подобраны в соответствии с разработанной методикой, описанной в разделе 2.2 данной работы.

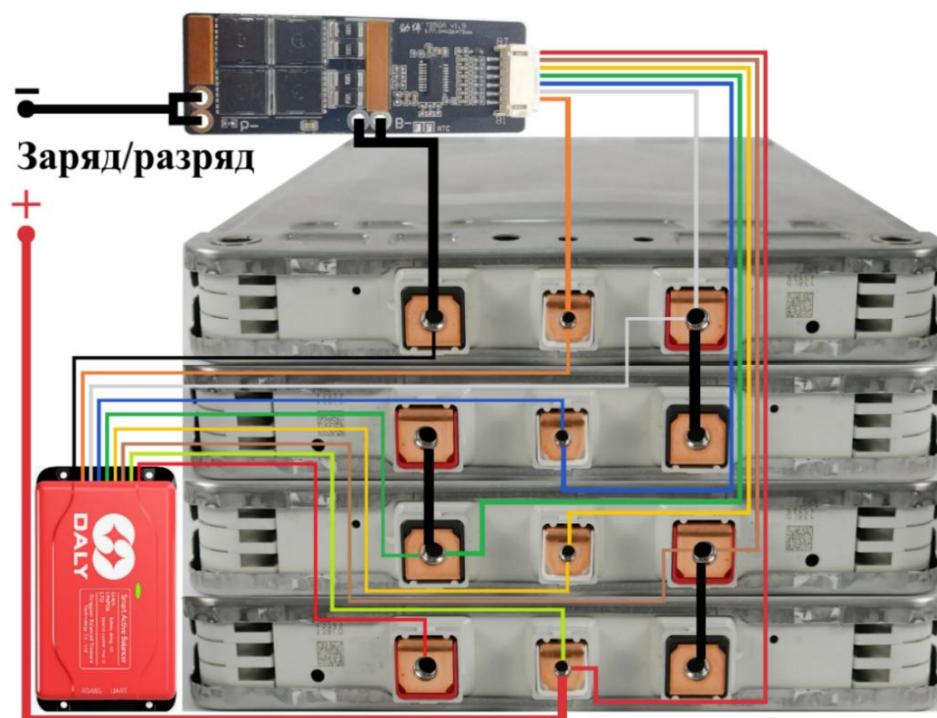


Рисунок 4.2 – Схема подключения BMS 7S и активного конденсаторного балансира 8S к батарее из четырёх последовательно соединённых аккумуляторных модулей

В предложенной нами схеме, BMS предназначена для обеспечения защиты семи первых последовательно соединённых плеч аккумуляторных модулей при их заряде и разряде, а осуществление заряда и разряда балластного плеча обеспечивается функционированием конденсаторного балансира, перераспределяющего заряд от плеч с большим, к плечам с меньшим напряжением.

При зарядке аккумуляторной батареи через силовые контакты BMS, напряжение балластного плеча будет повышаться существенно медленнее напряжений рабочих плеч, поскольку ток заряда батареи, как правило, превышает величину балансировочного тока. Благодаря наличию значительной разницы напряжений между плечами модулей, подключенными к BMS, и балластным плечом, ток и эффективность балансировки плеч, подключенных к BMS, возрастает. В то же время, так как активный балансир уравнивает потенциалы подключенных к нему последовательно соединённых плеч батареи, перезаряд балластного плеча фактически исключён.

Во время проведения разряда батареи с балластным плечом, снижение напряжения балластного плеча будет происходить медленнее, по сравнению со снижением напряжений плеч, подключенных к BMS, так как в большинстве случаев ток разряда батареи превышает величину балансирующего тока. За счёт возникновения разницы напряжений будет происходить заряд подключенных к BMS плеч от балластного плеча через активный балансир, а после завершения разряда батареи напряжения её плеч, подключенных к BMS, возрастёт благодаря переносу заряда от балластного плеча. В то же время, балластное плечо не будет подвергаться глубокому разряду, так как его напряжение в данном режиме работы не опустится ниже напряжений плеч, подключенных к BMS.

С целью оценки целесообразности применения предложенного способа балансировки был создан стенд для измерения параметров балансировки батареи из двух соединённых последовательно аккумуляторных модулей с одним балластным плечом, схема которого представлена на рисунке 4.3.

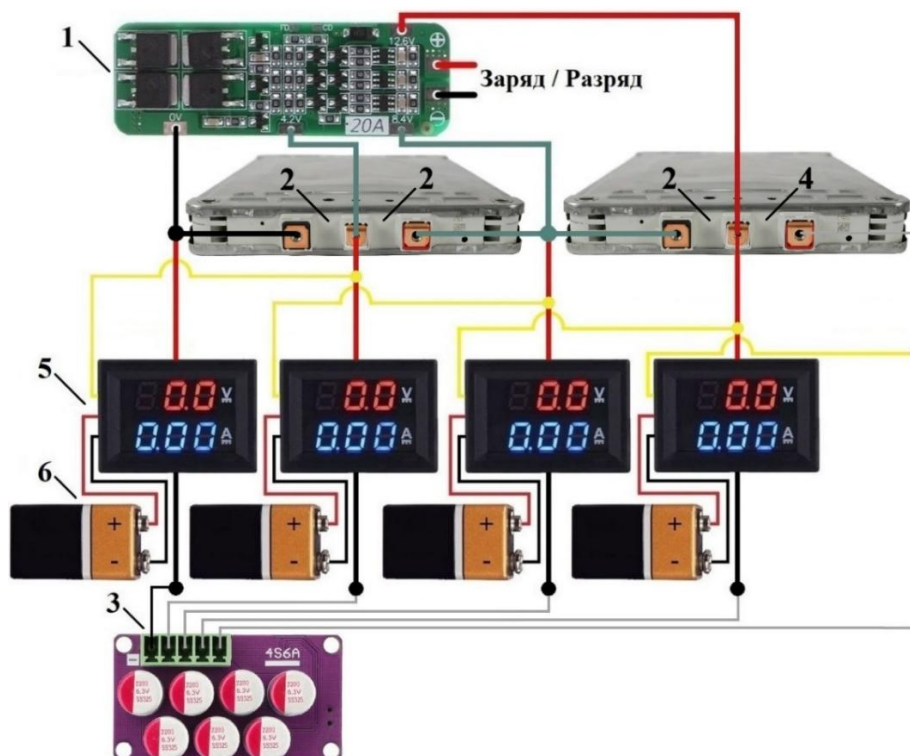


Рисунок 4.3 – Измерительная схема параметров балансировки, где: 1 – BMS, 2 – рабочие плечи аккумуляторных модулей, 3 – активный балансир, 4 – балластное плечо аккумуляторного модуля, 5 – вольтамперметры, 6 – источники питания вольтамперметров

Для проведения заряда и разряда рабочих плеч аккумуляторной батареи использовалась BMS, предназначенная для подключения аккумуляторов по схеме 3S. Для обеспечения балансировки батареи был использован активный балансир, предназначенный для подключения аккумуляторов по схеме 4S.

При проведении первого опыта аккумуляторная батарея была заряжена через BMS плату с помощью лабораторного блока питания до достижения напряжения 12,45 Вольт, а балластное плечо батареи было разряжено до 2,50 Вольт с помощью электронной нагрузки. Далее, активный балансир был включён, а изменения напряжений плеч батареи и тока заряда балластного плеча фиксировались для последующего построения графика балансировки, представленного на рисунке 4.4.

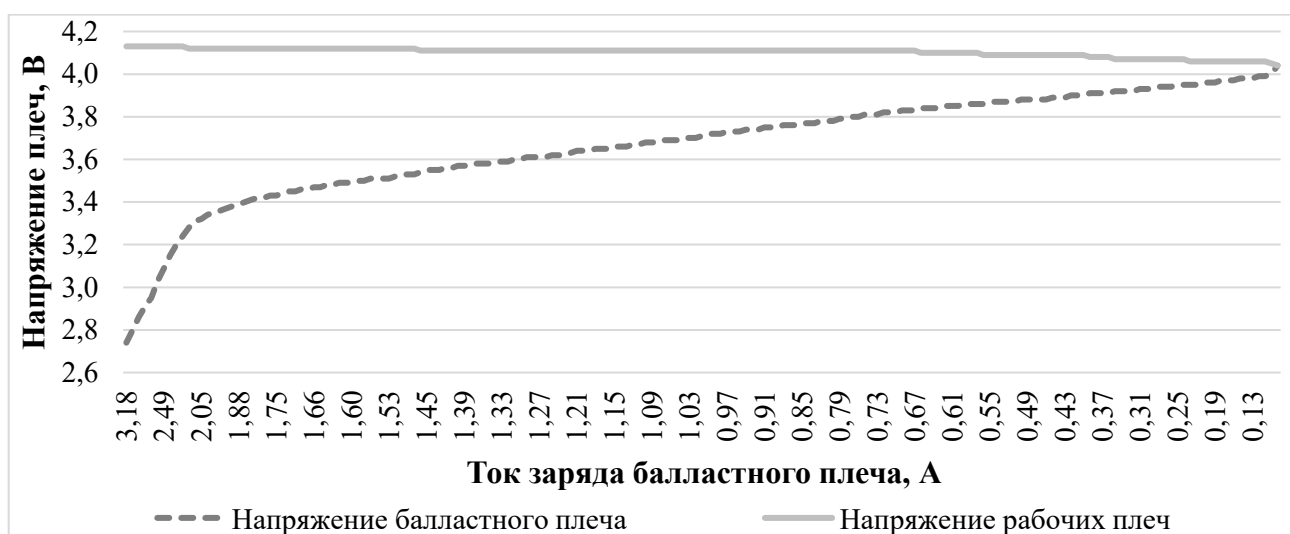


Рисунок 4.4 – График балансировки заряженной аккумуляторной батареи с разряженным балластным плечом

При проведении второго опыта аккумуляторная батарея была разряжена через BMS плату с помощью электронной нагрузки до достижения напряжения 7,5 Вольт, а балластное плечо батареи было заряжено с помощью лабораторного блока питания до достижения напряжения 4,15 Вольт. Затем, активный балансир был включён, а изменения напряжений плеч батареи и тока разряда балластного плеча фиксировались для дальнейшего построения графика балансировки (рисунок 4.5).

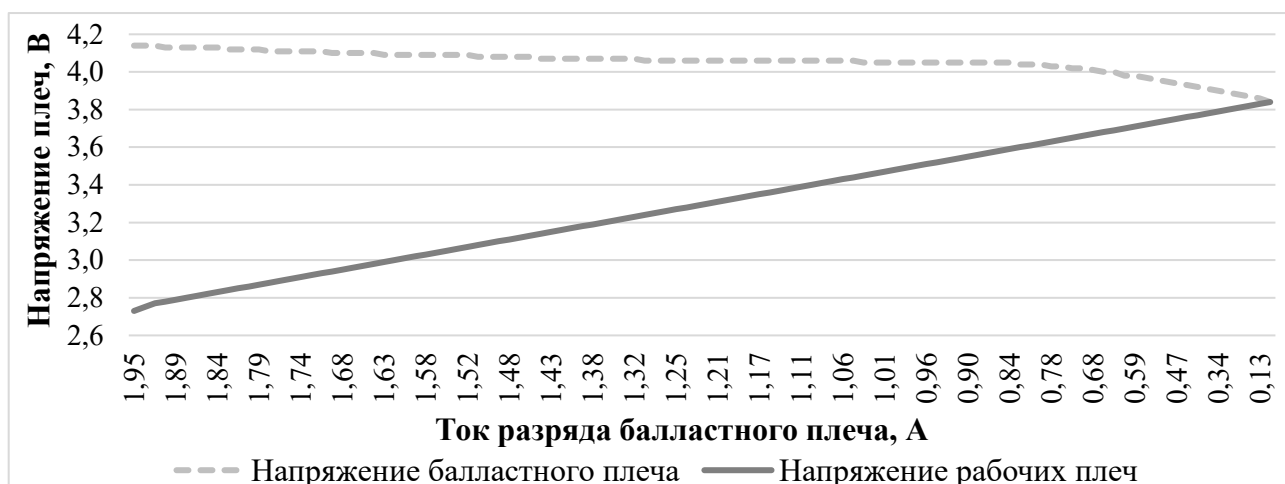


Рисунок 4.5 – График балансировки разряженной аккумуляторной батареи с заряженным балластным плечом

Результаты проведённых опытов демонстрируют, что разработанный нами способ 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 на рабочие плечи батареи.

Преимуществом указанного способа балансировки также является возможность использования в батарее балластного плеча, имеющего существенные отличия по внутреннему сопротивлению или энергоёмкости от прочих плеч и неприменимого при прочих схмотехнических решениях. Таким образом, применение метода активной балансировки батареи с балластным плечом позволяет повысить полезную энергоёмкость аккумуляторных батарей с нечётным числом последовательно соединённых плеч, подключённых к BMS, что способствует повышению целесообразности и эффективности применения батарей из аккумуляторных модулей совместно с автономными, комбинированными и гибридными инверторами в системах электроснабжения сельских потребителей с применением ВИЭ.

4.2 Модернизация источников бесперебойного питания для применения в установках электроснабжения с ВИЭ совместно с батареями из аккумуляторных модулей

В системах электроснабжения сельских потребителей с применением ВИЭ и аккумуляторных батарей могут использоваться не только инверторы, но и источники бесперебойного питания. Данное решение может быть оправдано при резервировании и электроснабжении маломощных нагрузок, поскольку по сравнению с комбинированными инверторами ИБП, как правило, обладают более низким током холостого хода при работе от аккумуляторных батарей и отличаются меньшей стоимостью, что повышает энергоэффективность электроснабжения нагрузки и снижает стоимость приобретения оборудования.

Источник бесперебойного питания содержит следующие основные элементы: автотрансформатор (АТ), зарядное устройство (ЗУ), аккумуляторную батарею, инвертор, реле напряжения (КУ), систему управления и индикации (СУИ), предохранитель (FU) и варистор (RU) (рисунок 4.6).

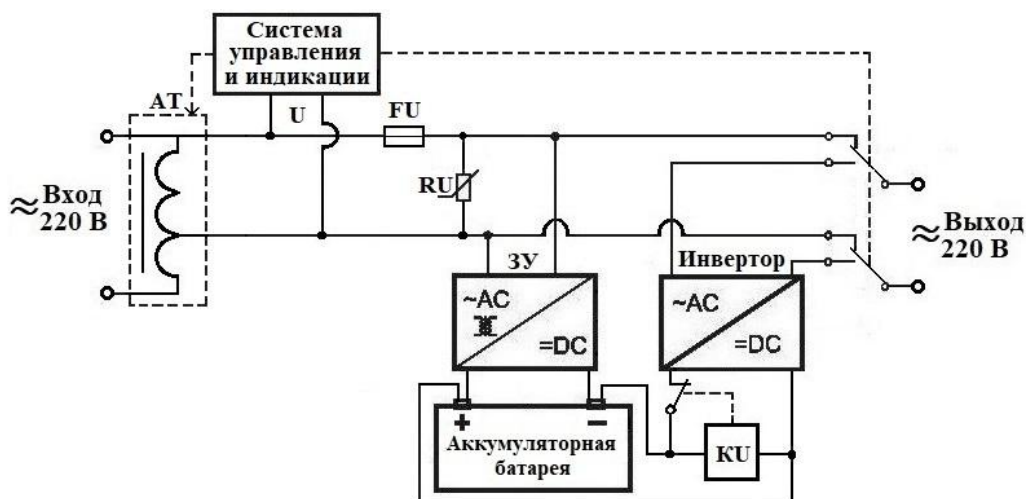


Рисунок 4.6 – Схема источника бесперебойного питания

СУИ отслеживает величину сетевого напряжения и при необходимости корректирует выходное напряжение при помощи АТ, а кроме того, информирует пользователя о текущем режиме работы ИБП (питание от сети или от батареи) посредством звукового сигнала и световой индикации. Предохранитель обеспечивает защиту от перегрузки и короткого замыкания, варистор отвечает за защиту от превышения питающего напряжения, а КУ обеспечивает защиту от глубокого разряда батареи. Алгоритм работы ИБП, представлен на рисунке 4.7.

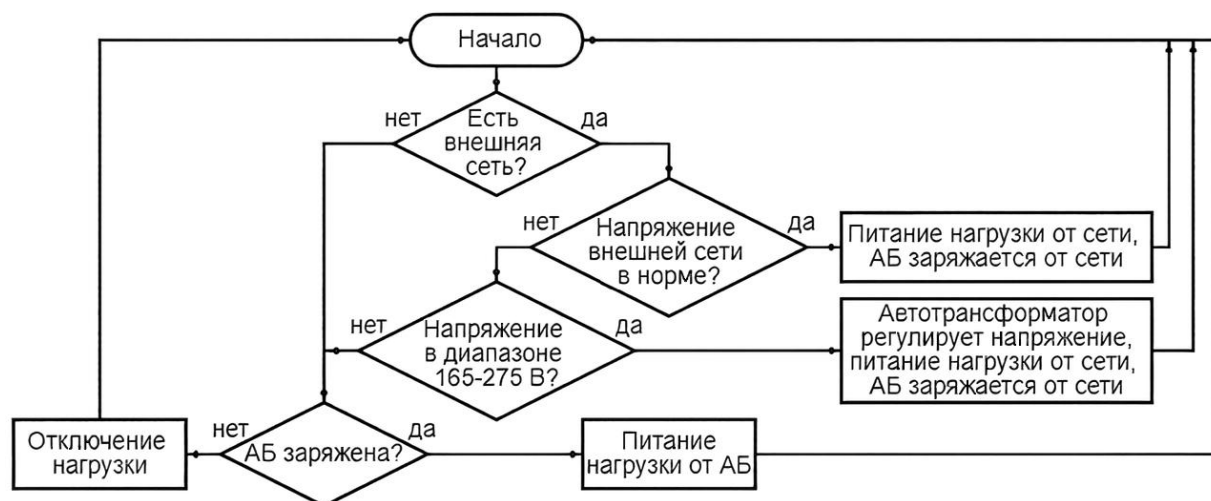


Рисунок 4.7 – Алгоритм работы ИБП

Данный алгоритм функционирования источника бесперебойного питания обеспечивает резервирование нагрузки при отключении централизованного электроснабжения, однако, существующие ИБП обладают рядом существенных недостатков. Так, в существующих ИБП не предусмотрена регулировка конечного напряжения разряда батареи, что снижает её эксплуатационный ресурс. Также, в большинстве ИБП не предусмотрена возможность изменения зарядного напряжения батареи, что может приводить к её недозаряду или перезаряду. Кроме того, в существующих ИБП приоритетным источником питания нагрузки выступает централизованная сеть, а возможность изменить приоритет на питание от батареи отсутствует. Помимо прочего, энергоёмкость встроенных аккумуляторных батарей в ИБП является крайне низкой, а в связи с непродолжительным временем работы в режиме питания от батарей, в ИБП зачастую отсутствует система принудительного охлаждения.

Однако, указанные недостатки могут быть устранены путём проведения предлагаемой нами технической модернизации источника бесперебойного питания, что позволит применять ИБП в качестве комбинированного инвертора в системах электроснабжения с ВИЭ, в том числе совместно с батареями, изготовленными из аккумуляторных модулей. Схема ИБП после модернизации и внешний вид разработанного устройства представлены на рисунках 4.8 и 4.9 соответственно [43].

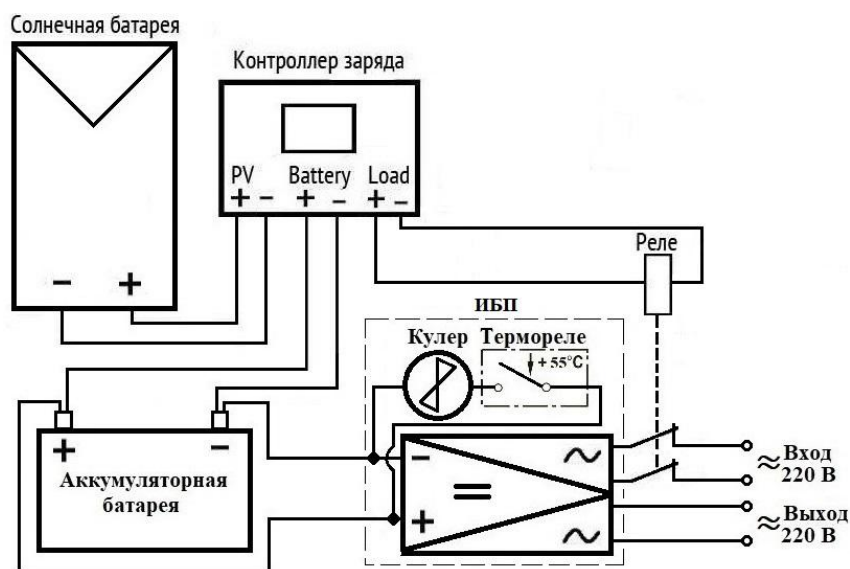


Рисунок 4.8 – Схема ИБП после модернизации



Рисунок 4.9 – Модернизированный ИБП с батареями из аккумуляторных модулей электромобиля Nissan Leaf без солнечной батареи

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

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

Применённый солнечный контроллер заряда имеет функцию управления нагрузкой, подключенной к контактам «Load». Таким образом, в целях изменения логического алгоритма работы ИБП, указанную функцию можно применять для управления работой электромагнитного реле, установив на контроллере ряд параметров, а именно: напряжение заряда батареи, конечное напряжение разряда батареи, а также напряжение, при котором питание нагрузки от батареи возобновляется. Алгоритм работы ИБП после проведённой нами модернизации представлен на рисунке 4.10.

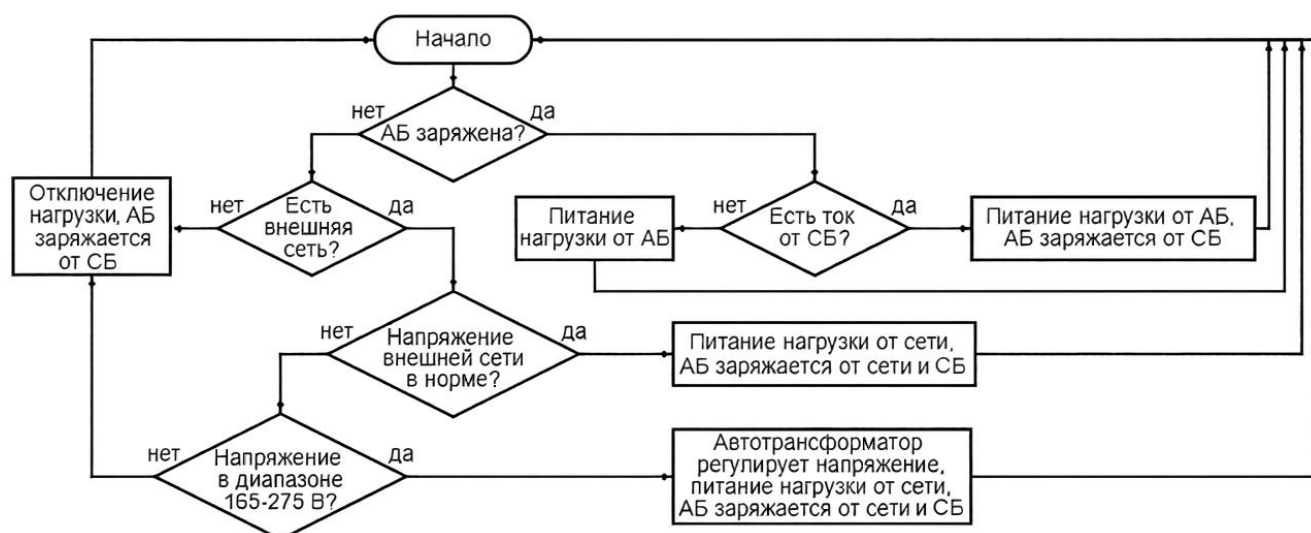


Рисунок 4.10 – Алгоритм работы ИБП после модернизации

Таким образом, при разряде аккумуляторной батареи до заданного на контроллере напряжения отключения нагрузки произойдёт отключение питания катушки электромагнитного реле, что приведёт к замыканию нормально замкнутых контактов реле, а ИБП перейдёт на питание от сети.

Затем, при заряде аккумуляторной батареи до заданного на контроллере напряжения возобновления питания нагрузки, контроллер подаст питание на катушку электромагнитного реле, что вызовет размыкание его контактов и переключение ИБП на питание от аккумуляторной батареи.

При этом, ИБП сохраняет возможность работы по предшествующему модернизации алгоритму, поскольку для возвращения к первоначальному режиму необходимо лишь отключить питание нагрузки на солнечном контроллере.

Таким образом, разработанный нами способ модернизации источника бесперебойного питания позволяет регулировать диапазон рабочих напряжений аккумуляторной батареи в широких пределах, в том числе задавать оптимальные напряжение заряда и конечное напряжение разряда аккумуляторов батареи в соответствии с оптимальным диапазоном рабочих напряжений, выявленном в третьей главе данной работы.

4.3. Технико-экономическое сравнение различных типов химических аккумуляторов с аккумуляторными модулями для использования в системах электроснабжения с ВИЭ

В настоящее время наиболее распространёнными накопителями энергии в системах электроснабжения с применением ВИЭ и источниках бесперебойного питания являются свинцово-кислотные аккумуляторные батареи, выполненные по технологии AGM. Однако, в связи с постепенным снижением стоимости литий-ионных аккумуляторов, всё большее распространение получают литий-железо-фосфатные батареи.

Проведём сравнение батарей типа AGM, LiFePO_4 , и батарей из вторично используемых аккумуляторных модулей электромобиля Nissan Leaf для применения в системе электроснабжения с ВИЭ, с номинальным напряжением питания 24 Вольт и ёмкостью батарей 100 А*ч.

В качестве AGM батареи рассмотрим модель «Delta HRL 12-100 X» с номинальным напряжением 12 Вольт, ёмкостью 100 А*ч и энергоёмкостью 1200 Вт*ч, средняя стоимость которой составляет 30000 рублей. Согласно данным производителей, ёмкость AGM батарей снижается на 20% после прохождения 250-350 циклов «заряд-разряд» при глубине разряда 100%, после 450-650 циклов с глубиной разряда 50% и после 1200-1400 циклов при глубине разряда 30% [80]. При этом, КПД цикла «заряд-разряд» AGM батареи составляет около 80% [76].

В соответствии с данными производителя, примем глубину разряда аккумуляторной батарей равной 100%, а число циклов «заряд-разряд» до снижения ёмкости на 20% примем равным 350 [118]. Для обеспечения напряжения 24 Вольт требуется последовательное соединение двух батарей, суммарная энергоёмкость которых составит 2400 Вт*ч.

Поскольку энергоёмкость батарей на протяжении срока их службы снижается со 100% до 80%, примем среднюю энергоёмкость батарей за период их эксплуатации равной 90%, т.е. 2160 Вт*ч. При этом, за всё время работы батареи способны накопить 756 кВт*ч электроэнергии. Таким образом, при суммарной стоимости батарей 60000 рублей себестоимость накопления энергии составит около 79,4 руб/кВт*ч.

В качестве LiFePO₄ батареи рассмотрим модель «Delta LFP Plastic 24V 50Ah» с номинальным напряжением 25,6 Вольт, ёмкостью 50 А*ч и энергоёмкостью 1280 Вт*ч, средняя стоимость которой составляет 45000 рублей. В соответствии с научной литературой и информацией, предоставленной производителем, примем глубину разряда батареи равной 80%, а число циклов «заряд-разряд» до снижения ёмкости на 20% примем равным 3000 [146, 52].

Для обеспечения ёмкости 100 А*ч требуется параллельное соединение двух батарей, суммарная энергоёмкость которых составит 2560 Вт*ч. Так как батареи должны эксплуатироваться при глубине разряда 80%, их суммарная используемая энергоёмкость составит 2048 Вт*ч. С учётом снижения энергоёмкости на протяжении срока службы, примем среднюю используемую энергоёмкость батарей за период их эксплуатации равной 90%, т.е. 1843,2 Вт*ч. При этом, за всё время работы батареи способны накопить 5529,6 кВт*ч электроэнергии. Таким образом, при суммарной стоимости батарей 90000 рублей себестоимость накопления энергии составит около 16,3 руб/кВт*ч.

Для изготовления батареи из аккумуляторных модулей электромобиля Nissan Leaf с номинальным напряжением 22,5 Вольт и ёмкостью 113,52 А*ч потребуется 9 модулей, суммарная энергоёмкость которых составляет 2554,2 Вт*ч. Стоимость модулей составляет 12600 рублей, однако, для изготовления батареи необходимо затратить около 2400 рублей для приобретения платы BMS, балансира и прочих комплектующих. Таким образом, общая стоимость батареи составит 15000 рублей.

На основании проведённых исследований установлено, что наиболее энергоэффективным диапазоном напряжений плеча модуля является диапазон 4,10-3,50 Вольт, при котором используется 85% от общей энергоёмкости (таблица 2.3), в связи с чем примем используемую энергоёмкость батареи равной 85%, т.е. 2171,1 Вт*ч. С учётом снижения энергоёмкости на протяжении срока службы, примем среднюю используемую энергоёмкость батареи за период эксплуатации равной 90%, т.е. 1954 Вт*ч. В соответствии с приложением 22 примем число циклов «заряд-разряд» до снижения ёмкости на 20% равным 450. При этом, за всё время эксплуатации батарея способна накопить 879,3 кВт*ч электроэнергии. Таким образом, при стоимости батареи 15000 рублей себестоимость накопления энергии составит около 17,1 руб/кВт*ч.

Как видно из представленных выше значений, стоимость приобретения батарей типа AGM и LiFePO₄ превышает стоимость батарей, изготовленных из аккумуляторных модулей электромобиля Nissan Leaf в 4 и 6 раз соответственно. При этом, себестоимость накопления энергии у батарей из аккумуляторных модулей в 4,6 раз ниже по сравнению с AGM батареями, но на 5% выше по сравнению с батареями типа LiFePO₄.

Однако, снижение энергоёмкости батарей всех перечисленных типов на 20% вовсе не означает их выход из строя, а эксплуатация батарей может быть продолжена. Решение о завершении эксплуатации работоспособной аккумуляторной батареи в связи со снижением её энергоёмкости должно приниматься пользователем или эксплуатирующей организацией с индивидуальным подходом для каждого конкретного случая, основываясь на целесообразной плотности хранения энергии.

Одним из возможных подходов к принятию решения о списании батарей из аккумуляторных модулей может служить достижение ими плотности хранения энергии свинцово-кислотной батареи при утрате ею 20% от номинальной ёмкости. Так, AGM батарея Delta HRL 12-100 X при весе в 33 кг и энергоёмкости 1200 Вт*ч имеет плотность хранения энергии около 36 Вт*ч/кг, а при снижении ёмкости на 20% данная величина снизится до 29 Вт*ч/кг, что обычно является рекомендуемым порогом списания АКБ.

В данной работе объектом исследования выступали аккумуляторные модули, на момент приобретения, имевшие плотность хранения энергии около 75 Вт*ч/кг. Снижение плотности хранения энергии аккумуляторных модулей до 29 Вт*ч/кг наступит при снижении их ёмкости до 40% от ёмкости на момент их приобретения.

В соответствии с приложением 22, при диапазоне рабочих напряжений плеча модуля 4,10-3,50 Вольт, снижение энергоёмкости на 60% происходит после 1800 циклов «заряд-разряд». Тогда, с учётом снижения энергоёмкости на протяжении срока службы, примем среднюю используемую энергоёмкость батареи за период эксплуатации равной 70%, т.е. 1519,8 Вт*ч. При этом, за всё время эксплуатации батарея будет способна накопить 2735,6 кВт*ч электроэнергии. Таким образом, при стоимости батареи 15000 рублей себестоимость накопления энергии составит около 5,5 руб/кВт*ч. Следует отметить, что на вторичном рынке встречаются модули с ёмкостью 20 А*ч и менее, что соответствует 30% от их номинальной ёмкости и свидетельствует о возможности эксплуатации при таком уровне износа.

4.4. Электроснабжение сельского дома с применением возобновляемых источников энергии

Результаты проведённых исследований были применены при разработке системы электроснабжения сельского дома, расположенного в Московской области (56,255603° северной широты, 37,508429° восточной долготы). В 2023 году на данном объекте электроснабжения была установлена сетевая солнечная электростанция, состоящая из пяти солнечных панелей Sunways FSM-320M мощностью по 320 Вт (рисунок 4.11) и сетевого инвертора SOFAR 1600TL-G3 Wi-Fi мощностью 1600 Вт (рисунок 4.12). При этом, выдача выработанной электроэнергии в сеть не осуществлялась, а направлялась исключительно на питание нагрузок сельского дома.



Рисунок 4.11 – Внешний вид установленных солнечных панелей



Рисунок 4.12 – Внешний вид установленного сетевого инвертора

На протяжении 2024 года с помощью программного обеспечения сетевого инвертора фиксировалась ежедневная выработка и потребление электроэнергии (рисунок 4.13).

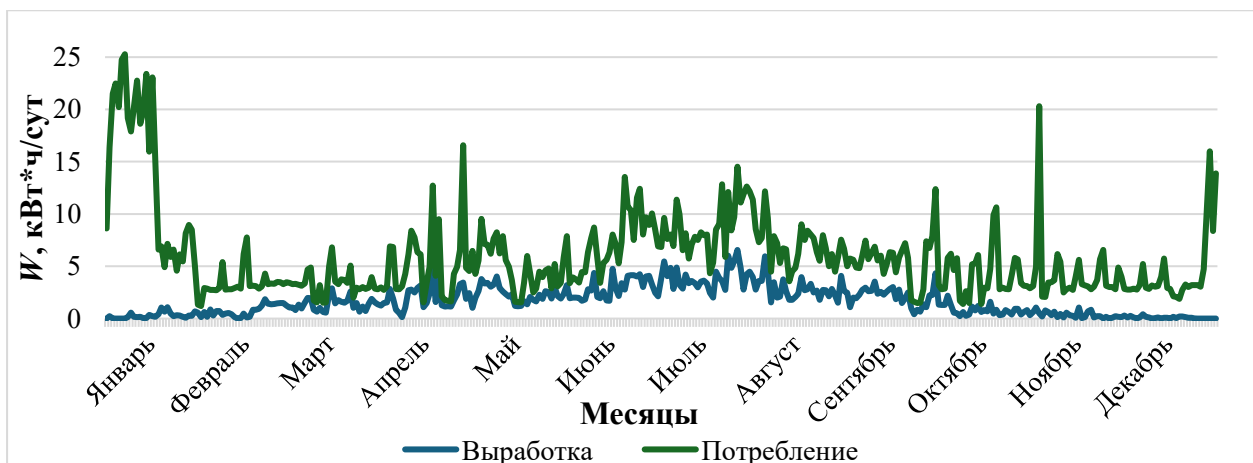


Рисунок 4.13 – Потребление электроэнергии в сельском доме и выработка солнечной батареи мощностью 1,6 кВт с ориентацией на юг и углом наклона 40° в Московской области при использовании сетевого инвертора

Анализ полученных данных показал, что среднесуточное потребление электроэнергии составляет 5,98 кВт*ч, а среднесуточная выработка солнечной батареи с сетевым инвертором составляет 1,66 кВт*ч. При этом, пиковая потребляемая мощность не превышает 3 кВт. Среднесуточная выработка и потребление электроэнергии с дифференциацией по месяцам представлены на рисунке 4.14.

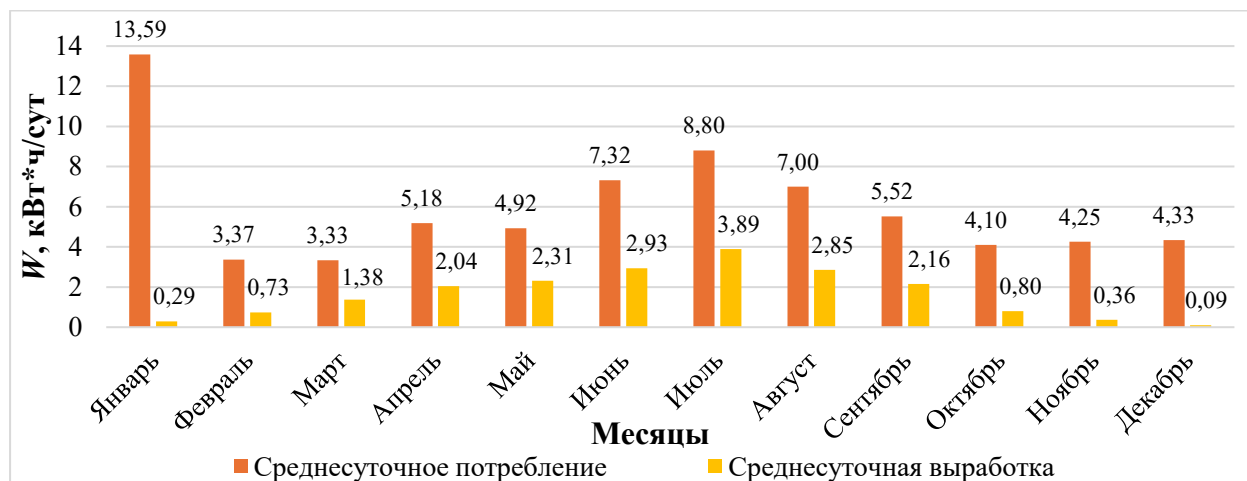


Рисунок 4.14 – Среднесуточное потребление сельского дома и выработка солнечной батареи мощностью 1,6 кВт с ориентацией на юг и углом наклона 40° в Московской области при использовании сетевого инвертора

Согласно данным приложения «Global Solar Atlas», средняя расчётная выработка солнечной батареи мощностью 1 кВт в данной локации составляет 1062,7 кВт*ч/год, или 2,91 кВт*ч/сутки [115]. Соответственно, расчётная среднегодовая выработка солнечной батареи с установленной мощностью 1,6 кВт составляет 1700,3 кВт*ч, а расчётная среднесуточная выработка – 4,66 кВт*ч.

В данном случае, выработка солнечной батареи ограничена сетевым инвертором, снижающим мощность генерации из-за низкой потребляемой мощности в сельском доме и отсутствия выдачи выработанной электроэнергии в сеть. С целью увеличения выработки солнечной батареи, для обеспечения накопления вырабатываемой энергии в периоды, когда вырабатываемая мощность превышает потребляемую мощность, было принято решение о замене сетевого инвертора на модернизированный ИБП с батареями из аккумуляторных модулей.

В качестве источника бесперебойного питания был выбран APC Smart UPS 3000 VA с номинальной активной мощностью 2700 Вт. Модернизация ИБП проводилась в соответствии с разделом 4.2 данной работы. Требуемая энергоёмкость аккумуляторных батарей рассчитывалась как разность среднесуточного потребления электроэнергии и среднесуточной выработки солнечной батареи с сетевым инвертором, поскольку модернизированный ИБП способен питать нагрузку одновременно от аккумуляторных и солнечных батарей.

Таким образом, требуемая энергоёмкость аккумуляторных батарей составляет 4,32 кВт*ч. Исходя из требуемой энергоёмкости, из аккумуляторных модулей были собраны две аккумуляторные батареи с номинальным напряжением 22,5 Вольт и ёмкостью 113,5 А*ч. Каждая батарея оснащена платой BMS с допустимым током заряда и разряда 100 Ампер, активным конденсаторным балансиром с максимальным током балансировки 5 Ампер, состоит из 9 аккумуляторных модулей с суммарной энергоёмкостью 2554,2 Вт*ч. Внешний вид изготовленных батарей представлен в приложениях 35-36.

В соответствии с разделом 4.3 данной работы примем диапазон рабочих напряжений плеч аккумуляторных модулей 4,10-3,50 Вольт, а используемую энергоёмкость батареи равной 85%, т.е. 2171,1 Вт*ч. Таким образом, суммарная используемая энергоёмкость двух аккумуляторных батарей составляет 4,342 кВт*ч, что превышает требуемую энергоёмкость. Внешний вид подключенного модернизированного ИБП и аккумуляторных батарей представлен на рисунке 4.15.



Рисунок 4.15 – Установленный модернизированный источник бесперебойного питания и батареи из аккумуляторных модулей

После осуществления замены сетевого инвертора на модернизированный ИБП с батареями из аккумуляторных модулей, на протяжении 2025 года производился сбор данных о среднесуточной выработке электроэнергии с дифференциацией по месяцам. Затем, было проведено сравнение данных о выработке солнечной батареи с сетевым инвертором, полученных в 2024 году с данными о выработке солнечной батареи с модернизированным ИБП и аккумуляторными батареями, полученными в 2025 году (рисунок 4.16).

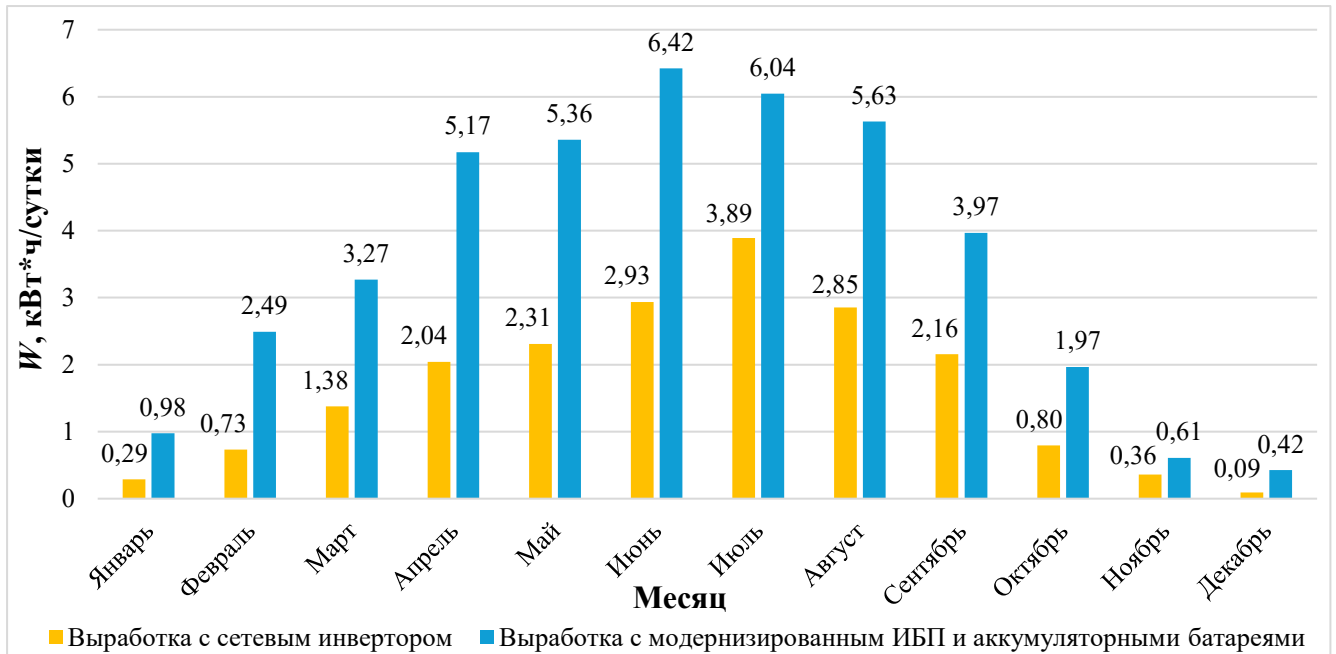


Рисунок 4.16 – Среднесуточная выработка солнечной батареи мощностью 1,6 кВт с ориентацией на юг и углом наклона 40° в Московской области при использовании сетевого инвертора и модернизированного источника бесперебойного питания с батареями из аккумуляторных модулей

Результаты обработки полученных данных 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. При этом, среднесуточная выработка солнечной батареи с модернизированным ИБП и аккумуляторными батареями составляет около 76% от прогнозируемой из-за потерь при преобразовании и аккумулировании энергии, а также затрат на собственное потребление модернизированного ИБП, составляющих около 25 Вт*ч.

Выводы по четвёртой главе

1. Разработан метод активной балансировки аккумуляторной батареи с балластным плечом, позволяющий повысить используемую энергоёмкость батареи на 12% и обеспечить её защиту от глубокого разряда. Разработаны схемы сборки батарей 6S и 7S из аккумуляторных модулей для накопления энергии, получаемой от ВИЭ при электроснабжении сельских потребителей.

2. Разработан способ модернизации источника бесперебойного питания для использования в системах электроснабжения с ВИЭ совместно с батареями из аккумуляторных модулей, позволяющий выполнять заряд аккумуляторной батареи от солнечной батареи, задать напряжение заряда, конечное напряжение разряда батареи и напряжение, при котором питание нагрузки от батареи возобновляется.

3. Техничко-экономическое сравнение различных типов аккумуляторов с аккумуляторными модулями для применения в системах электроснабжения с ВИЭ показало, что стоимость приобретения новых 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 вторично используемых аккумуляторных модулей до снижения энергоёмкости на 60% себестоимость накопления энергии составляет 5,5 руб/кВт*ч.

4. Проведённая в сельском доме замена сетевого инвертора на модернизированный источник бесперебойного питания с батареями из аккумуляторных модулей обеспечила рост среднесуточной выработки электроэнергии, получаемой от 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 литературы

1. Аккумуляторная батарея Nissan Leaf: устройство, характеристики, срок службы, эксплуатация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://akbinfo.ru/litievye/batareya-nissan-leaf.html?ysclid=mgwamen24i492267942> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 18.10.2025).
2. Александров П.Е., Анурова А.И., Смирнов В.Г., Хомутов Р.В. Научно-технические аспекты совершенствования характеристик анодов и катодов литий-ионных аккумуляторов // Электрохимическая энергетика. 2007. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchno-tehnicheskie-aspekty-sovershenstvovaniya-harakteristik-anodov-i-katodov-litii-ionnyh-akkumulyatorov> (дата обращения: 15.10.2025).
3. Альвиев, Х.Х. О зависимости ёмкости литий-ионного аккумулятора от тока разряда / Х.Х. Альвиев // Электрохимическая энергетика. – 2013. – № 4(13). – С. 225-227.
4. Анализ конструктивных схем аккумуляторных батарей / Н. А. Кузьмин, П. В. Чусов, И. В. Сытник [и др.]. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 8 (298). — С. 34-39.
5. Анурова А.И., Данилюк Е.А., Кедринский И.А., Ткачук С.А., Чудинов Е.А. Гелевый электролит для литий-ионного аккумулятора // Известия СПбГТИ (ТУ). 2011. №11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gelevyy-elektrolit-dlya-litii-ionnogo-akkumulyatora> (дата обращения: 15.10.2025).
6. Ануфриев Игорь Евгеньевич. Математические методы моделирования физических процессов [Текст] : учебное пособие / И. Е. Ануфриев, П. А. Осипов ; М-во образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. Метод конечных разностей. — Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2013. — 59, [1] с. : ил..
7. Ахмадова Г.Ф., Гасанова Ф.Г., Алиев З.М., Шапиев Б.И. Утилизация свинца из металлизированной фракции лома отработанных аккумуляторов // Известия ДГПУ. Естественные и точные науки. 2008. №2. URL:

- <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-svintsa-iz-metallizirovannoy-fraktsii-loma-otrabotannyh-akkumulyatorov> (дата обращения: 06.10.2025).
8. Бажинова Т.А., Кучерявая М.А. Выбор электрохимической системы для тягового привода электромобиля // Автомобильный транспорт. 2013. №33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-elektrohimicheskoy-sistemy-dlya-tyagovogo-privoda-elektromobilya> (дата обращения: 12.10.2025).
 9. Беднарский В.В., Лайко Д.В., Ревяко С.И. Повышение надёжности свинцовых аккумуляторов сельскохозяйственных машин // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2018. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-nadyozhnosti-svintsovyh-akkumulyatorov-selskohozyaystvennyh-mashin> (дата обращения: 05.10.2025).
 10. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И.Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.: ил.
 11. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Н.М. Зуль. – М.: Агропромиздат, 1990. – 446 с.
 12. Варыпаев В.Н. Химические источники тока / В.Н. Варыпаев, М. А. Дасоян, В. А. Никольский. М.: Высшая школа, 1990. С. 207-211.
 13. Ветроэнергетика в мире: затраты на строительство и эффективность ВЭУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ecotek.pro/news/energolikbez/wind-power-in-the-world/?ysclid=me01nmn9md193275986> Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 06.08.2025).
 14. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Большев В.Е. Направления повышения эффективности систем электроснабжения сельских потребителей // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 2(27). С. 44–53.
 15. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ конфигурации электрических сетей 0,4 кВ Орловской области // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, № 4(53). С. 22-29. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29. EDN LHIRSK.
 16. Виноградов А. В., Виноградова А. В., Лансберг А. А. Концепция сельских электрических сетей 0,4 кВ с управляемой конфигурацией // Развитие

электроснабжения и применения электроэнергии в АПК. Коллективная монография. Москва: РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2022. С. 52–62.

17. Виноградова А.В. Лансберг А.А., Виноградов А.В. Энергосистема Орловской области: обзор статистической информации: монография: Орёл: ООО Полиграфическая фирма «Картуш», 2023. 360 с. EDN FPQAEF.

18. Виноградова А.В., Виноградов А.В. Систематизация причин отключений в сельских электрических сетях // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, № 1(84). С. 103–111. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_1_103–111.

19. Возобновляемая энергетика в России и мире [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosenergo.gov.ru/upload/iblock/e04/3xtn87iv99x76b23c6wjul3as5pzz8zj.pdf> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 22.07.2025).

20. Волинский В.В. Способы переработки электродов никель-кадмиевых аккумуляторов // Вестник СГТУ. 2006. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-pererabotki-elektrodov-nikel-kadmievyyh-akkumulyatorov> (дата обращения: 12.10.2025).

21. ГОСТ Р 52083-2003. Аккумуляторы никель-железные открытые призматические. Общие технические условия.

22. ГОСТ Р 53165-2020 (МЭК 60095-1:2018). Национальный стандарт Российской Федерации. Батареи стартерные свинцово-кислотные. Часть 1. Общие требования и методы испытаний (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 12.11.2020 N 1063-ст)

23. ГОСТ Р 58593-2019. Источники тока химические. Термины и определения.

24. ГОСТ Р МЭК 60285-2002 Аккумуляторы и батареи щелочные. Аккумуляторы никель-кадмиевые герметичные цилиндрические.

25. ГОСТ Р МЭК 62620-2016. Национальный стандарт Российской Федерации. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной или другие неокислотные электролиты. Аккумуляторы и батареи литиевые для промышленных применений. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 октября 2016 г. N 1381-ст

26. ГОСТ Р МЭК 62675-2017 Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие неокислотные электролиты. Герметичные призматические никель-металлгидридные аккумуляторы.
27. ГОСТ Р 53165–2008 (МЭК 60095-1:2006). Национальный стандарт Российской Федерации. Батареи аккумуляторные свинцовые стартерные для автотракторной техники.
28. Д. С. Королёв Обзор состояния и перспективных направлений развития сельских электрических сетей 0,4 кВ // Агротехника и энергообеспечение. 2025. №1 (46).
29. Данилова В.О., Бурашникова М.М., Гриценко С.Д., Самсонов М.А., Казаринов И.А. Влияние добавок углерода с различной структурой в активную массу отрицательного электрода свинцово-кислотного аккумулятора на его разрядные характеристики // Электрохимическая энергетика. 2016. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-dobavok-ugleroda-s-razlichnoy-strukturoy-v-aktivnuyu-massu-otritsatelnogo-elektroda-svintsovo-kislotnogo-akkumulyatora-na-ego> (дата обращения: 06.10.2025).
30. Даус, Ю.В. Электроснабжение сельскохозяйственных объектов с применением фотоэлектрических установок с задаваемым графиком генерации : специальность 05.20.02 "Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Даус Юлия Владимировна, 2018. – 225 с. – EDN HSFRUJ.
31. Дюкин И.Р., Братухин А.В., Сидоров А.И. Особенности сельских электрических сетей // Вестник Вятского ГАТУ. – 2023. – №4. – С. 123–130.
32. Е.Ю. Ван, В.Г. Михайлов, А.В. Шевелюхина Натрий-ионные батареи в качестве альтернативной технологии литий-ионным аккумуляторам в химических источниках тока // Вестник КузГТУ. 2025. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/natriy-ionnye-batarei-v-kachestve-alternativnoy-tehnologii-litiy-ionnym-akkumulyatoram-v-himicheskikh-istochnikah-toka> (дата обращения: 08.10.2025).

33. Ерошенко С.А., Карпенко А.А., Кокин С.Е., Паздерин А.В. Научные проблемы распределенной генерации // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. №11-12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchnye-problemy-raspredelelnoy-generatsii> (дата обращения: 22.07.2025).
34. Жилин, Е. В. Использование Li-Ion накопителей электроэнергии в интеллектуальных сетях / Е. В. Жилин, А. Д. Малышева, Д. С. Забельский // Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения) : Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 23 ноября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 889-893. – EDN WSGHIR.
35. Зезюлинская А.В. Типы аккумуляторных батарей для электромобилей // Форум молодых ученых. 2019. №6 (34). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tipy-akkumulyatornyh-batarey-dlya-elektromobiley> (дата обращения: 04.10.2025).
36. Иноземцева, Е.В. Влияние некоторых компонентов свинцово-сурьмянистых и свинцово-кальциевых сплавов на их механические и коррозионные свойства / Е.В. Иноземцева, М.М. Бурашникова, И.А. Казаринов // Электрохимическая энергетика. – 2007. – № 4(7). – С.196-199.
37. Какая батарея установлена на Lixiang Li-7 комплектации AIR? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=dekflHPKvfo> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 19.10.2025).
38. Какие электромобили и гибриды самые распространенные в России? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autostat.ru/infographics/60895/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 18.10.2025).
39. Кальциевый аккумулятор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://batteryzone.ru/accumulator/kalcievyj-akkumuljator> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 05.10.2025).
40. Карлаков Д. С., Лештаев О. В., Белов С. И. Метод активной балансировки аккумуляторной батареи с балластным аккумулятором // Международный технический журнал. 2026. № 1 (101). С. 93–103. EDN: BKHSAE.

41. 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.
42. 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.
43. 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 CYAQUI.
44. Клименко Г.К., Сорокин М.И. Исследование энергетических характеристик аккумуляторов специального назначения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. №2 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-energeticheskikh-harakteristik-akkumulyatorov-spetsialnogo-naznacheniya> (дата обращения: 24.07.2025).
45. Козлов С.В., Киндряшов А.Н., Соломин Е.В. Анализ эффективности систем накопления энергии // АЭЭ. 2015. №2 (166). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-effektivnosti-sistem-nakopleniya-energii> (дата обращения: 24.07.2025).
46. Корнилов Д.Ю., Губин С.П. Анодные материалы на основе графена для литий-ионных аккумуляторов // РЭНСИТ. 2016. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/anodnye-materialy-na-osnove-grafena-dlya-litiy-ionnyh-akkumulyatorov> (дата обращения: 15.10.2025).
47. Кочуров А.А., Картуков А.Г. Об исследованиях процесса разрушения положительных электродов свинцовых кислотных аккумуляторов // Известия МГТУ. 2011. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-issledovaniyah-protsessa-razrusheniya>

razrusheniya-polozhitelnyh-elektrodov-svintsovyh-kislotnyh-akkumulyatorov (дата обращения: 05.10.2025).

48. Кулова Т. Л., Николаев И. И., Фатеев В. Н., Алиев А. Ш. Современные электрохимические системы аккумулярования энергии // *Kimya Problemleri*. 2018. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-elektrohimicheskie-sistemy-akkumulirovaniya-energii> (дата обращения: 24.07.2025).

49. Кулова Т.Л., Скундин А.М. От литий-ионных к натрий-ионным аккумуляторам // *Электрохимическая энергетика*. 2016. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ot-litii-ionnyh-k-natriy-ionnym-akkumulyatoram> (дата обращения: 14.10.2025).

50. Лебедев, О.А. Химические источники тока / О.А. Лебедев СПб.: ЛЭТИ, 2002. – 55с.

51. Лештаев, О.В. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей с сетевой солнечной фотоэлектрической установкой : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лештаев Олег Валерьевич. – Москва, 2023. – 120 с. – EDN CPEDTE.

52. Литий-ионная батарея Delta LFP Plastic 24V 50 Ah [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://delta-batt.com/upload/iblock/04b/kx4r7sc1zelw5b6uhvisnvnj5ahbfg6u/ti_delta_lfp_plastic_24v_50ah_ru.pdf – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 15.03.2026).

53. Лыткин Н.А. Влияния отрицательного электрода на снижение ёмкости никель-кадмиевого аккумулятора // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 2011. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyaniya-otritsatelnogo-elektroda-na-snizhenie-yomkosti-nikel-kadmievogo-akkumulyatora> (дата обращения: 12.10.2025).

54. Медведев И.И. Анализ характеристик аккумуляторов для мобильной радиоаппаратуры, применяемой в ОВД // *Вестник ВИ МВД России*. 2016. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-harakteristik-akkumulyatorov-dlya-mobilnoy-radioapparatury-primenyaemoj-v-ovd> (дата обращения: 12.10.2025).

55. Мельникова А.С., Кострюкова Н.В. Способ утилизации литий-ионных аккумуляторов с извлечением ценных компонентов // Безопасность техногенных и природных систем. 2024. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-utilizatsii-litii-ionnyh-akkumulyatorov-s-izvlecheniem-tsennykh-komponentov> (дата обращения: 14.10.2025).
56. Молчанов М.Д. Зеленые тарифы // Вопросы российской юстиции. 2022. №22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zelenye-tarifny> (дата обращения: 07.08.2025).
57. Морачевский А.Г. Отработанные свинцовые аккумуляторы — важнейший источник вторичного свинца // Глобальная энергия. 2014. №4 (207). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otrabotannye-svintsovyie-akkumulyatory-vazhneyshiy-istochnik-vtorichnogo-svintsa> (дата обращения: 06.10.2025).
58. Морачевский А.Г., Попович А.А., Демидов А.И. Перспективные анодные материалы для натрий-ионных аккумуляторов // Глобальная энергия. 2018. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-anodnye-materialy-dlya-natrii-ionnyh-akkumulyatorov> (дата обращения: 14.10.2025).
59. Морачевский А.Г., Попович А.А., Демидов А.И. Применение лития, его сплавов и соединений в химических источниках тока (к 25-летию начала производства литий-ионных аккумуляторов) // Глобальная энергия. 2016. №1 (238). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-litiya-ego-splavov-i-soedineniy-v-himicheskikh-istochnikah-toka-k-25-letiyu-nachala-proizvodstva-litii-ionnyh-akkumulyatorov> (дата обращения: 14.10.2025).
60. Мышкина Л.С. Малая генерация - средство повышения живучести энергосистемы // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. №1-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/malaya-generatsiya-sredstvo-povysheniya-zhivuchesti-energosisemy> (дата обращения: 22.07.2025).
61. Неграфитизируемый углерод - анодный материал для металл-ионных аккумуляторов / Е. Н. Абрамова, З. В. Бобылева, О. А. Дрожжин [и др.] // Успехи химии. – 2024. – Т. 93, № 2. – С. RCR5100. – DOI 10.59761/RCR5100. – EDN MZCFLC.

62. Объём рынка гибридных солнечных инверторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchnester.com/ru/reports/solar-hybrid-inverter-market/7125> Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 7.09.2025).
63. Орлов С.Б. Развитие рынка источников тока новых электрохимических систем // Компоненты и Технологии. 2007. №69. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-rynka-istochnikov-toka-novyh-elektrohimicheskikh-sistem> (дата обращения: 14.10.2025).
64. Осипов С.А. Аккумуляторные батареи на электровозах и электропоездах // Вестник науки. 2024. №12 (81). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/akkumulyatornye-batarei-na-elektrovozah-i-elektropoezdah> (дата обращения: 12.10.2025).
65. Особенности деградации кремниевых электродов при циклировании / В. А. Галперин, Е. П. Кицюк, Т. Л. Кулова [и др.] // Электрохимическая энергетика. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 59-63. – EDN RDNDCL.
66. Паспорт научной специальности 4.3.2. «Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vak.minobrnauki.gov.ru/uploader/loader?type=17&name=92259542002&f=15231> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 21.07.2025).
67. Пионкевич В.А. Аспекты практического применения солнечных установок для электроснабжения промышленных и сельскохозяйственных потребителей // Вестник ИрГТУ. 2016. №5 (112). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aspekty-prakticheskogo-primeneniya-solnechnyh-ustanovok-dlya-elektrosnabzheniya-promyshlennyh-i-selskohozyaystvennyh-potrebiteley> (дата обращения: 03.10.2025).
68. Пискунов Е. Ю. Модификация коэффициента Тэйла / Е. Ю. Пискунов // Известия Иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права). – 2012. – № 5. – С. 26. – EDN PXPRDL.

69. 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.
70. Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 N 1715-р «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-13112009-n-1715-r/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 21.07.2025).
71. Реброва, И. А. Планирование эксперимента : учебное пособие / И. А. Реброва ; И. А. Реброва ; Федеральное агентство по образованию, ГОУ ВПО "Сибирская гос. автомобильно-дорожная акад. (СибАДИ)". – Омск : СибАДИ, 2010. – 105 с. – EDN QJWVSX.
72. Рестайлинг Zeekr 001 вышел на рынок. Почему в Китае его называют полностью новым? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://китайские-автомобили.рф/2024/02/29/zeekr-001-novym/> Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 18.10.2025).
73. Рощин О.А. Обзор систем электроснабжения сельских потребителей // Инновации в сельском хозяйстве. 2012. № 2(2). С. 2-9. EDN QBWGXV.
74. Русин А.И. Свинцовые аккумуляторы / А.И. Русин, Л.Д. Хегай // СПб.: Град Петров, – 2009. — 214 с.
75. Рябко К. А. Способ продления срока службы аккумуляторных батарей тепловозов путем снижения пусковых токов // Сборник научных трудов ДОНИЖТ. 2011. №25. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-prodleniya-sroka-sluzhby-akkumulyatornyh-batarey-teplovozov-putem-snizheniya-puskovyh-tokov> (дата обращения: 12.10.2025).
76. Савин Р.В., Позднов М.В., Шлыков С.В. Аккумуляторные батареи для солнечных станций и особенности их выбора // Universum: технические науки. 2018. №4 (49). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/akkumulyatornye-batarei-dlya-solnechnyh-stantsiy-i-osobennosti-ih-vybora> (дата обращения: 15.03.2026).
77. 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.

78. 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.

79. 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».

80. Сиротский М.С., Пугачев А.А. Математическое моделирование срока службы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей для источников бесперебойного питания // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-sroka-sluzhby-svintsovo-kislotnyh-akkumulyatornyh-batarey-dlya-istochnikov-bespereboynogo-pitaniya> (дата обращения: 15.03.2026).

81. Сметанкин, Г.П. Исследование восстановления ёмкости никель-кадмиевых аккумуляторных батарей 42НК-125 / Г.П. Сметанкин, А.С. Бурдюгов, Т.В. Плохова // Электрохимическая энергетика. – 2011. – №3(11). – С. 164–167.

82. Сравнительный анализ аккумуляторных батарей GEL и AGM / С.В. Шеппель, О.М. Шеппель, О.В. Мяло, А.С. Союнов // Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК : Сборник Всероссийской (национальной) научно -

практической конференции, Омск, 18 февраля 2021 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2021. – С. 501-506. – EDN COBXWM.

83. Степаненко В.П. Выбор накопителей в изолированных энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии // ГИАБ. 2017. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-nakopiteley-v-izolirovannyh-energосистемах-s-vozobnovlyaemyi-istochnikami-energii> (дата обращения: 24.07.2025).

84. Степаненко В.П. Применение в горной промышленности КЭСУ с возобновляемыми источниками и накопителями энергии // ГИАБ. 2016. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-v-gornoy-promyshlennosti-kesu-s-vozobnovlyaemyi-istochnikmi-i-nakopitelyami-energii> (дата обращения: 07.10.2025).

85. Стихин А.С., Тесля В.И., Цедилкин А.П., Швецов А.С. Перспективы разработки никель-металлогидридной батареи для электромобиля с энергоустановкой на топливных элементах // Электрохимическая энергетика. 2008. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razrabotki-nikel-metallogidridnoy-batarei-dlya-elektromobilya-s-energoustanovkoy-na-toplivnyh-elementah> (дата обращения: 12.10.2025).

86. Столичные власти планируют использовать батареи из электробусов в метро [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/7380880> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 22.07.2025).

87. Таблица литиевых батарей 2025: типы, циклы, напряжения, сравнение LiFePO4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://inner.su/articles/tablitسا-litievkh-batarey-2025-tipy-tsikly-napryazheniya-sravnenie-lifepo4/?ysclid=mgس8pok7x0665574468> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 15.10.2025).

88. Таганова, А.А. Герметичные химические источники тока: элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации [Текст]: Справочник / А.А. Таганова, Ю.И. Бубнов, С.Б. Орлов СПб.: Химиздат, 2005., 52 с.

89. Тарифы на электроэнергию в Москве и Московской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tarif-zkh.ru/moskva/tarif-elektroenergiya-v-moskve> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 02.07.2025).
90. Тарнопольский В.А. Некоторые тенденции усовершенствования катодных материалов для литий-ионных аккумуляторов // Электрохимическая энергетика. 2008. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-tendentsii-usovershenstvovaniya-katodnyh-materialov-dlya-litii-ionnyh-akkumulyatorov> (дата обращения: 15.10.2025).
91. Терентьев, Е. Е. Методика выбора типа аккумулятора для эксплуатации электромобилей в регионах с холодным климатом / Е. Е. Терентьев, И. М. Блянкинштейн // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 1. – С. 112-124. – DOI 10.25198/2077-7175-2023-1-112. – EDN FNKXAN.
92. Теслова, С.А. Основы статистики : учебно-методическое пособие / С.А. Теслова. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. – 95 с. – EDN NDCTWV.
93. Тесля В.И., Цедилкин А.П., Швецов А.С. Исследование разрядных характеристик никель-металлогидридных аккумуляторов типоразмера АА при отрицательных температурах // Электрохимическая энергетика. 2008. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-razryadnyh-harakteristik-nikel-metallogidridnyh-akkumulyatorov-tiporazmera-aa-pri-otritsatelnyh-temperaturah> (дата обращения: 12.10.2025).
94. Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 г. № 529 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50755> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 21.07.2025).
95. Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899 "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/55171684/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 21.07.2025).

96. Умерла батарея на Voyah Free?! Мы знаем что делать! [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rutube.ru/video/deb4540501a98118c055f45c5c3557d5/?ysclid=mgzugu4r1661205279> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 21.10.2025).
97. Устройство аккумуляторных батарей / С.В. Шеппель, О.М. Шеппель, А.С. Союнов, С.П. Прокопов // Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК : Сборник Всероссийской (национальной) научно - практической конференции, Омск, 18 февраля 2021 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2021. – С. 506-512. – EDN EQORUD.
98. Фатыхов, Р.Р. Перспективы применения литий-ионных аккумуляторов в качестве резервных источников питания на электрических станциях / Р.Р. Фатыхов, С.М. Хантимеров, Н.М. Сулейманов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2017. – № 4 (36), – С. 45-53.
99. Фёдоров А.Ю., Левшов А.В. Моделирование силового инвертора для фотоэлектрических систем // Евразийский Союз Ученых. 2016. №1-2 (22). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-silovogo-invertora-dlya-fotoelektricheskikh-sistem> (дата обращения: 03.10.2025).
100. Цивадзе, А. Ю. Фундаментальные проблемы литий-ионных аккумуляторов / А. Ю. Цивадзе, Т. Л. Кулова, А. М. Скундин // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 149. – DOI 10.7868/S0044185613020083. – EDN PUXVDH.
101. Что внутри? Разбираем батарею Zeekr 001 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rutube.ru/video/e0216191652279c40cd2fb956bb2fc4a/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 18.10.2025).
102. Чудинов Е.А., Грошкова Ю.А., Ермаков Д.С., Огарев А.С. Исследование влияния электролита на свойства литий-железо-фосфатных аккумуляторов с модифицированными углеродом электродами // Электрохимическая энергетика. 2025. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-elektrolita-na-svoystva-litiiy-zhelezo-fosfatnyh-akkumulyatorov-s-modifitsirovannymi-uglerodom-elektrodami> (дата обращения: 16.10.2025).

103. Энергоэффективные и энергосберегающие автономные системы электроснабжения на ветро-солнечных электростанциях для малых фермерских хозяйств / О. В. Григораш, Е. А. Денисенко, А. В. Квитко [и др.]. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2023. – 180 с. – ISBN 978-5-6047400-1-9. – EDN WYZNGO.
104. 2014 Nissan Leaf EV Battery System (Section EVB) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ownersmanuals2.com/nissan/leaf-2014-repair-manual-ev-battery-system-section-evb-42955> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 24.10.2025).
105. Albright, G. A comparison of lead-acid to lithium-ion in stationary storage applications / G. Albright, J. Edie, S. Al-Hallaj // All Cell Technologies LLC. 2012.
106. Aris A. M., Shabani B. (2017) An Experimental Study of a Lithium Ion Cell Operation at Low Temperature Conditions, Energy Procedia Vol. 110, pp. 128–135, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.117> Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217301479/> (accessed: 04.10.2025).
107. B. Gohla-Neudecker, M. Bowler, and S. Mohr, “Battery 2nd life: Leveraging the sustainability potential of EVs and renewable energy grid integration,” in Proc. Int. Conf. Clean Electr. Power (ICCEP), Jun. 2015, pp. 311–318.
108. Barker, J.; Heap, R.J.; Roche, N.; Tan, C.; Sayers, R.; Lui, Y. Low Cost Na-ion Battery Technology. — 2014.
109. Batteries from electric vehicles provide 25MWh of storage to California grid [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/batteries-from-electric-vehicles-provide-25mwh-of-storage-to-california-grid/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 17.10.2025).
110. Boman Su, Xinyou Ke, Chris Yuan, Electrochemical Modeling of Calendar Capacity Loss of Nickel-ManganeseCobalt (NMC)-Graphite Lithium Ion Batteries, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio 44106

111. BP: Statistical Review of World Energy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 07.08.2025).
112. Edge J. S., O’Kane S., Prosser R., Kirkaldy N. D., Patel A. N., Hales A. et al. Lithium ion battery degradation: what you need to know // Physical Chemistry Chemical Physics. 2021. Vol. 23, No. 14. P. 8200–8221. DOI: 10.1039/D1CP00359C.]
113. F. P. McGrogan, S. N. Raja, Y.-M. Chiang and K. J. Van Vliet, Electrochemomechanical Fatigue: Decoupling Mechanisms of Fracture-Induced Performance Degradation in LiXMn₂O₄, J. Electrochem. Soc., 2018, 165, A2458–A2466
114. G. J. May, A. Davidson, and B. Monahov, “Lead batteries for utility energy storage: A review” Journal of Energy Storage, vol. 15, pp. 145-157, 2018/02/01/ 2018, DOI:10.1016/j.est.2017.11.008.
115. Global Solar Atlas [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://globalsolaratlas.info/map?c=56.255289,37.507818,18&m=site&s=56.255603,37.508429> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 17.05.2026).
116. Guo, J.; Li, Y.; Pedersen, K.; Stroe, D.-I. Lithium-Ion Battery Operation, Degradation, and Aging Mechanism in Electric Vehicles: An Overview. Energies 2021, 14, 5220. <https://doi.org/10.3390/en14175220>
117. Hariyadi, A. The origin of cycle life degradation of a lead-acid battery under constant voltage charging / A. Hariyadi, A. Nugroho, Suwarno. // International Journal of Power Electronics and Drive Systems, June 2021.
118. HRL 12-100 X [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://delta-batt.com/upload/iblock/3eb/kgx57rk9vlubz2moh3zfmgezsnmkp245/TI_HRL_12_100_X_RU.pdf – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 15.03.2026).
119. I. D. Campbell, M. Marzook, M. Marinescu and G. J. Offer, How Observable Is Lithium Plating? Differential Voltage Analysis to Identify and Quantify Lithium Plating Following Fast Charging of Cold Lithium-Ion Batteries, J. Electrochem. Soc., 2019, 166, A725–A739

120. I. Mathews, B. Xu, W. He, V. Barreto, T. Buonassisi, and I. M. Peters, “Technoeconomic model of second-life batteries for utility-scale solar considering calendar and cycle aging,” *Appl. Energy*, vol. 269, Jul. 2020, Art. no. 115127.
121. IRENA: Renewable Capacity Statistics 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-CapacityStatistics-2022> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 21.07.2025).
122. Jang-Yeon Hwang, Seung-Taek Myung, Yang-Kook Sun Sodium-ion batteries: present and future. *Chemical Society Reviews*. 46 (12): 3529–3614. Issue 12, 2017 doi:10.1039/C6CS00776G. ISSN 1460-4744
123. Joseph Lacap, Jae Wan Park, Lucas Beslow, Development and Demonstration of Microgrid System Utilizing Second-Life Electric Vehicle Batteries, *Journal of Energy Storage*, Volume 41, 2021, 102837, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102837>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21005594>)
124. K. Brik and F. ben Ammar, “Causal tree analysis of depth degradation of the lead acid battery” *Journal of Power Sources*, vol. 228, pp. 39-46, 2013, DOI:10.1016/j.jpowsour.2012.10.088.
125. 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.
126. 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.
127. Kubota K. [et al.] Electrochemistry and solidstate chemistry of NaMeO₂ (Me= 3d transition metals) // *Advanced Energy Materials*. 2018. V. 8. № 17. P. 1703415. DOI: 10.1002/aenm.201703415.
128. L. Ahmadi, S. B. Young, M. Fowler, R. A. Fraser, and M. A. Achachlouei, “A cascaded life cycle: Reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems,” *Int. J. Life Cycle Assessment*, vol. 22, no. 1, pp. 111–124, Jan. 2017.
129. L. Duchêne, R.-S. Kühnel, E. Stilp, E. Cuervo Reyes, A. Remhof. A stable 3 V all-solid-state sodium–ion battery based on a closo-borate electrolyte // *Energy &*

Environmental Science. — 2017. — Vol. 10, iss. 12. — P. 2609—2615. — ISSN 1754-5706 1754-5692, 1754-5706. — doi:10.1039/C7EE02420G

130. Languang Lu. LiFePO₄ battery performances testing and analyzing for BMS. Department of Automotive Engineering, Tsinghua University ECG (Engine Control Group) Aug. 2011.

131. Li C. [et al.] Nonaqueous Liquid Electrolytes for Sodium-Ion Batteries: Fundamentals, Progress and Perspectives // Advanced Energy Materials. 2023. V. 13. № 40. P. 2301758. DOI: 10.1002/AENM.202301758.

132. Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 22.07.2025).

133. M.H.S.M. Haram, M.T. Sarker, G. Ramasamy and E.E. Ngu, "Second Life EV Batteries: Technical Evaluation, Design Framework, and Case Analysis," in IEEE Access, vol. 11, pp. 138799-138812, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3340044.

134. N. Jiao, S. Evans Business Models for Sustainability: The Case of Second-life Electric Vehicle Batteries Procedia CIRP, 40 (2016), pp. 250-255

135. Nissan Leaf 2015 User Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://manualmachine.com/nissan/leaf2015/2513276-user-manual/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 18.10.2025).

136. Nissan Leaf Batteries [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://evbatterycenter.com/НАС4/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=631 – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 25.10.2025).

137. Omer, Z.M. Comparison of Discharge Performance of 12V/150Ah Gel and AGM Sealed Leadacid Batteries in Stand-alone PV-based Systems in UAE / Z.M. Omer, A.M. Alameri, A.A. Fardoun, A.A. Hussein. // International Conference on Renewable Energies and Power Quality Cordoba (Spain), 8th to 10th April, 2014

138. P. P. Lopes and V. R. Stamenkovic, “Past, present, and future of lead–acid batteries” Science, vol. 369, no. 6506, pp. 923-924, 2020, DOI:10.1126/science.abd3352.

139. P. Ruetschi, “Aging mechanisms and service life of lead–acid batteries” *Journal of Power Sources*, vol. 127, no. 1, pp. 33-44, 2004/03/10/ 2004, DOI:10.1016/j.jpowsour.2003.09.052.
140. Rao X. [et al.] A superior Na₃V₂ (PO₄)₃-based cathode enhanced by Nb-doping for highperformance sodium-ion battery // *APL Materials*. 2022. V. 10. № 1. DOI: 10.1063/5.0074325.
141. Renewable Power Generation Costs in 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022> Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 06.08.2025).
142. S. Stock, J. Hagemeister, S. Grabmann, J. Kriegler, J. Keilhofer, M. Ank, J.L.S. Dickmanns, M. Schreiber, F. Konwitschny, N. Wassiliadis, M. Lienkamp, R. Daub Cell teardown and characterization of an automotive prismatic LFP battery, *Electrochimica Acta*, Volume 471, 2023, 143341, ISSN 0013-4686, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143341>.
143. S.J. Tong, A. Same, M.A. Kootstra, J.W. Park Off-grid photovoltaic vehicle charge using second life lithium batteries: an experimental and numerical investigation *Appl Energy*, 104 (2013), pp. 740-750
144. Solar photovoltaic module price [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 22.07.2025).
145. Strong Performance [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.d5623043-68e592b2-6c84e793-74722d776562/https/faradion.co.uk/technology-benefits/strong-performance/ (дата обращения: 08.10.2025).
146. Sun S. et al., Accelerated Aging Analysis on Cycle Life of LiFePO₄/Graphite Batteries Based on Different Rates // *ChemElectroChem*. 2018. Т. 5. № 16. С. 2301-2309.
147. T. Phophongviwat, S. Polmai, C. Maneeinn, K. Hongesombut, and K. Sivalertporn, “Technical assessment of reusing retired electric vehicle lithium-ion batteries in Thailand,” *World Electr. Vehicle J.*, vol. 14, no. 6, p. 161, Jun. 2023.

148. Tesfamhret Y., Liu H., Chai Z., Berg E., Younesi R. On the manganese dissolution process from LiMn_2O_4 cathode materials. *ChemElectroChem*. 2021; 8 (8): 1516–1523. DOI: 10.1002/celec.202001496.
149. Tesla LFP Model 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.batterydesign.net/tesla-lfp-model-3/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 20.10.2025).
150. Tesla Model 3 & Chevy Bolt Battery Packs Examined [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cleantechnica.com/2018/07/08/tesla-model-3-chevy-bolt-battery-packs-examined/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 20.10.2025).
151. Vandermeer J., Mueller-Stoffels M., Whitney E. (2017) An Alaska case study: Energy storage technologies, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. Vol. 9 (6), 061708, <https://doi.org/10.1063/1.4986580> Available at: https://www.researchgate.net/publication/321982257_An_Alaska_case_study_Energy_storage_technologies/ (accessed: 04.10.2025)
152. Wei Gao, Zhi Cao, Naser Vosoughi Kurdkandi, Yuhong Fu, Chirs Mi Evaluation of the second-life potential of the first-generation Nissan Leaf battery packs in energy storage systems, *eTransportation*, Volume 20, 2024, 100313, ISSN 2590-1168, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2024.100313>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590116824000031>)
153. What Batteries Are Tesla Using In Its Electric Cars? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://insideevs.com/news/587455/batteries-tesla-using-electric-cars/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 20.10.2025).
154. Where 3 Million Electric Vehicle Batteries Will Go When They Retire [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bloomberg.com/news/features/2018-06-27/where-3-million-electric-vehicle-batteries-will-go-when-they-retire> Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 19.07.2025).
155. X. G. Yang, S. Ge, T. Liu, Y. Leng and C. Y. Wang, A look into the voltage plateau signal for detection and quantification of lithium plating in lithium-ion cells, *J. Power Sources*, 2018, 395, 251–261

156. X. G. Yang, Y. Leng, G. Zhang, S. Ge and C. Y. Wang, Modeling of lithium plating induced aging of lithium-ion batteries: Transition from linear to nonlinear aging, *J. Power Sources*, 2017, 360, 28–40
157. Yu T. [et al.] The research and industrialization progress and prospects of sodium ion battery // *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. V. 958. P. 170486. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.170486.
158. Z Test: Uses, Formula & Examples [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://statisticsbyjim.com/hypothesis-testing/z-test/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 14.12.2025).
159. Zeekr 140kWh CATL Qilin [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.batterydesign.net/zeekr-140kwh-catl-qilin/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 18.10.2025).
160. Zhang J. [et al.] Comprehensive review of P2-type $\text{Na}_{2/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}\text{O}_2$, a potential cathode for practical application of Na-ion batteries // *ACS applied materials & interfaces*. 2019. V. 11. № 25. Pp. 22051-22066. DOI: 10.1021/acsami.9b03937.

Приложения

Приложение 1

Отданная плечами аккумуляторных модулей энергоёмкость в 25 циклах «заряд-разряд»

№ разряда	Диапазон напряжений 4,05÷3,00				Диапазон напряжений 4,05÷3,25				Диапазон напряжений 4,05÷3,50			
	Плечо №1		Плечо №2		Плечо №1		Плечо №2		Плечо №1		Плечо №2	
	Вт*ч	%	Вт*ч	%	Вт*ч	%	Вт*ч	%	Вт*ч	%	Вт*ч	%
1	98,63	100,00	102,20	100,00	97,11	100,00	97,87	100,00	98,84	100,00	93,56	100,00
2	96,55	97,89	101,24	99,06	96,18	99,04	96,98	99,09	98,05	99,20	92,92	99,32
3	96,16	97,50	100,77	98,60	96,15	99,01	96,83	98,94	97,67	98,82	92,56	98,93
4	95,81	97,14	100,45	98,29	95,67	98,52	96,49	98,59	97,39	98,53	92,31	98,66
5	95,63	96,96	100,27	98,11	95,24	98,07	96,19	98,28	97,24	98,38	92,13	98,47
6	95,36	96,68	100,09	97,94	95,05	97,88	96,15	98,24	97,05	98,19	91,98	98,31
7	95,28	96,60	99,87	97,72	94,93	97,76	95,84	97,93	96,98	98,12	91,78	98,10
8	95,19	96,51	99,73	97,58	94,82	97,64	95,77	97,85	96,82	97,96	91,62	97,93
9	95,27	96,59	99,64	97,50	94,55	97,36	95,53	97,61	96,74	97,88	91,5	97,80
10	95,31	96,63	99,60	97,46	94,44	97,25	95,50	97,58	96,71	97,85	91,42	97,71
11	95,29	96,61	99,60	97,46	94,36	97,17	95,18	97,25	96,63	97,76	91,35	97,64
12	95,15	96,47	99,45	97,31	94,28	97,09	95,04	97,11	96,64	97,77	91,15	97,42
13	95,20	96,52	99,39	97,25	93,83	96,62	94,95	97,02	96,53	97,66	91,02	97,29
14	95,01	96,33	99,37	97,23	93,99	96,79	94,90	96,97	96,46	97,59	91,15	97,42
15	95,06	96,38	99,28	97,14	93,91	96,70	94,96	97,03	96,38	97,51	91,15	97,42
16	94,95	96,27	99,26	97,12	93,84	96,63	94,85	96,91	96,34	97,47	91,01	97,27
17	94,92	96,24	99,17	97,04	93,72	96,51	94,86	96,92	96,38	97,51	90,93	97,19
18	94,71	96,03	99,17	97,04	94,03	96,83	94,90	96,97	96,23	97,36	90,97	97,23
19	94,81	96,13	99,13	97,00	93,72	96,51	94,80	96,86	96,27	97,40	90,93	97,19
20	94,70	96,02	99,11	96,98	93,57	96,35	94,52	96,58	96,15	97,28	90,74	96,99
21	94,70	96,02	99,14	97,01	93,53	96,31	94,53	96,59	96,13	97,26	90,79	97,04
22	94,63	95,94	99,13	97,00	93,53	96,31	94,37	96,42	96,07	97,20	90,67	96,91
23	94,55	95,86	99,06	96,93	93,49	96,27	94,54	96,60	96,03	97,16	90,64	96,88
24	94,55	95,86	99,07	96,94	93,34	96,12	94,34	96,39	95,99	97,12	90,6	96,84
25	94,56	95,87	99,02	96,89	93,46	96,24	94,15	96,20	95,88	97,01	90,47	96,70

Отданная плечами аккумуляторных модулей энергоёмкость в 25 циклах «заряд-разряд»

№ разряда	Диапазон напряжений 4,10÷3,00				Диапазон напряжений 4,10÷3,25				Диапазон напряжений 4,10÷3,50			
	Плечо №1		Плечо №2		Плечо №1		Плечо №2		Плечо №1		Плечо №2	
	Вт*ч	%	Вт*ч	%	Вт*ч	%	Вт*ч	%	Вт*ч	%	Вт*ч	%
1	116,80	100,00	116,06	100,00	115,84	100,00	118,68	100,00	111,92	100,00	111,79	100,00
2	116,35	99,61	115,61	99,61	115,54	99,74	118,50	99,85	111,63	99,74	111,63	99,86
3	116,26	99,54	115,58	99,59	115,48	99,69	118,58	99,92	111,56	99,68	111,52	99,76
4	116,18	99,47	115,43	99,46	115,46	99,67	118,72	100,03	111,45	99,58	111,39	99,64
5	115,99	99,31	115,26	99,31	115,56	99,76	118,68	100,00	111,27	99,42	111,02	99,31
6	115,89	99,22	115,21	99,27	115,57	99,77	118,69	100,01	111,27	99,42	111,13	99,41
7	115,86	99,20	115,18	99,24	115,54	99,74	118,66	99,98	111,16	99,32	111,07	99,36
8	115,85	99,19	115,02	99,10	115,54	99,74	118,63	99,96	111,03	99,20	110,96	99,26
9	115,77	99,12	114,98	99,07	115,47	99,68	118,59	99,92	111,00	99,18	110,88	99,19
10	115,71	99,07	114,89	98,99	115,50	99,71	118,56	99,90	110,89	99,08	110,66	98,99
11	115,72	99,08	114,85	98,96	115,40	99,62	118,50	99,85	110,86	99,05	110,81	99,12
12	115,70	99,06	114,76	98,88	115,31	99,54	118,49	99,84	110,78	98,98	110,74	99,06
13	115,59	98,96	114,72	98,85	115,04	99,31	118,36	99,73	110,75	98,95	110,79	99,11
14	115,62	98,99	114,75	98,87	115,14	99,40	118,32	99,70	110,76	98,96	110,68	99,01
15	115,42	98,82	114,63	98,77	114,89	99,18	118,10	99,51	110,66	98,87	110,65	98,98
16	115,42	98,82	114,59	98,73	114,89	99,18	118,00	99,43	110,62	98,84	110,57	98,91
17	115,21	98,64	114,61	98,75	114,66	98,98	117,79	99,25	110,63	98,85	110,49	98,84
18	115,37	98,78	114,52	98,67	114,77	99,08	117,50	99,01	110,53	98,76	110,4	98,76
19	115,28	98,70	114,49	98,65	114,86	99,15	117,70	99,17	110,52	98,75	110,45	98,80
20	115,37	98,78	114,37	98,54	114,82	99,12	117,62	99,11	110,39	98,63	110,41	98,77
21	115,17	98,60	114,39	98,56	114,78	99,08	117,55	99,05	110,40	98,64	110,37	98,73
22	115,14	98,58	114,24	98,43	114,70	99,02	117,64	99,12	110,29	98,54	110,16	98,54
23	115,06	98,51	114,33	98,51	114,49	98,83	117,56	99,06	110,37	98,62	110,28	98,65
24	115,02	98,48	114,22	98,41	114,37	98,73	117,51	99,01	110,29	98,54	110,25	98,62
25	114,84	98,32	114,18	98,38	114,47	98,82	117,42	98,94	110,25	98,51	110,25	98,62

Отданная плечами аккумуляторных модулей энергоёмкость в 25 циклах «заряд-разряд»

№ разряда	Диапазон напряжений 4,15÷3,00				Диапазон напряжений 4,15÷3,25				Диапазон напряжений 4,15÷3,50			
	Плечо №1		Плечо №2		Плечо №1		Плечо №2		Плечо №1		Плечо №2	
	Вт*ч	%	Вт*ч	%	Вт*ч	%	Вт*ч	%	Вт*ч	%	Вт*ч	%
1	125,91	100,00	121,89	100,00	122,50	100,00	120,90	100,00	113,65	100,00	115,70	100,00
2	124,99	99,27	120,84	99,14	121,72	99,36	120,42	99,60	113,36	99,74	115,48	99,81
3	124,55	98,92	120,61	98,95	121,29	99,01	119,80	99,09	113,22	99,62	115,43	99,77
4	124,37	98,78	120,53	98,88	121,10	98,86	119,84	99,12	113,08	99,50	115,30	99,65
5	124,19	98,63	120,24	98,65	120,50	98,37	119,47	98,82	113,01	99,44	115,18	99,55
6	124,17	98,62	120,17	98,59	120,11	98,05	119,48	98,83	112,98	99,41	115,10	99,48
7	124,02	98,50	119,86	98,33	119,64	97,67	119,29	98,67	112,81	99,26	115,02	99,41
8	124,14	98,59	119,79	98,28	119,60	97,63	119,06	98,48	112,71	99,17	114,90	99,31
9	123,99	98,48	119,73	98,23	119,25	97,35	118,83	98,29	112,77	99,23	114,87	99,28
10	123,99	98,48	119,69	98,20	119,30	97,39	118,69	98,17	112,57	99,05	114,79	99,21
11	124,03	98,51	119,53	98,06	118,85	97,02	118,43	97,96	112,06	98,60	114,59	99,04
12	124,08	98,55	119,50	98,04	118,81	96,99	118,49	98,01	111,67	98,26	114,65	99,09
13	123,96	98,45	119,39	97,95	118,50	96,73	118,29	97,84	112,11	98,64	114,59	99,04
14	123,97	98,46	119,34	97,91	118,53	96,76	117,98	97,58	112,25	98,77	114,60	99,05
15	123,84	98,36	119,11	97,72	118,20	96,49	117,79	97,43	112,30	98,81	114,59	99,04
16	123,84	98,36	119,09	97,70	118,28	96,56	117,97	97,58	112,19	98,72	114,54	99,00
17	123,83	98,35	119,04	97,66	117,95	96,29	117,69	97,34	112,20	98,72	114,47	98,94
18	123,77	98,30	118,99	97,62	118,06	96,38	117,96	97,57	112,17	98,70	114,47	98,94
19	123,76	98,29	119,01	97,64	117,99	96,32	117,69	97,34	112,14	98,67	114,18	98,69
20	123,66	98,21	118,97	97,60	118,09	96,40	117,87	97,49	112,13	98,66	114,29	98,78
21	123,43	98,03	118,82	97,48	117,93	96,27	117,58	97,25	112,10	98,64	114,03	98,56
22	123,20	97,85	118,75	97,42	117,93	96,27	117,80	97,44	112,10	98,64	114,16	98,67
23	123,05	97,73	118,55	97,26	117,76	96,13	117,57	97,25	111,76	98,34	114,02	98,55
24	122,98	97,67	118,49	97,21	117,83	96,19	117,82	97,45	111,91	98,47	113,98	98,51
25	122,81	97,54	118,50	97,22	117,70	96,08	117,67	97,33	111,87	98,43	113,70	98,27

Z-оценки отданной при разряде энергоёмкости в каждом цикле «заряд-разряд» плеч аккумуляторных модулей

№ разряда	4,05÷3,00		4,05÷3,25		4,05÷3,50		4,10÷3,00		4,10÷3,25		4,10÷3,50		4,15÷3,00		4,15÷3,25		4,15÷3,50	
	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2
1	3,91	3,22	2,68	2,66	3,04	2,74	2,52	2,51	1,68	1,05	2,31	2,25	3,10	2,85	2,46	2,42	2,25	2,01
2	1,48	1,99	1,75	1,71	1,92	1,92	1,56	1,59	0,98	0,67	1,69	1,90	1,65	1,58	1,90	1,92	1,71	1,58
3	1,03	1,39	1,72	1,56	1,38	1,46	1,36	1,52	0,84	0,84	1,53	1,65	0,96	1,30	1,59	1,27	1,45	1,48
4	0,62	0,98	1,24	1,20	0,98	1,14	1,19	1,22	0,79	1,13	1,30	1,36	0,67	1,20	1,45	1,31	1,19	1,23
5	0,41	0,74	0,81	0,88	0,76	0,91	0,79	0,87	1,03	1,05	0,91	0,54	0,39	0,85	1,01	0,93	1,06	1,00
6	0,09	0,51	0,62	0,84	0,49	0,72	0,57	0,77	1,05	1,07	0,91	0,79	0,36	0,77	0,73	0,94	1,00	0,84
7	0,00	0,23	0,50	0,51	0,39	0,47	0,51	0,71	0,98	1,01	0,67	0,66	0,12	0,39	0,39	0,74	0,68	0,69
8	-0,10	0,05	0,39	0,43	0,17	0,26	0,49	0,38	0,98	0,94	0,39	0,41	0,31	0,31	0,36	0,50	0,50	0,46
9	-0,01	-0,06	0,12	0,18	0,05	0,11	0,31	0,30	0,81	0,86	0,32	0,23	0,08	0,23	0,11	0,26	0,61	0,40
10	0,04	-0,11	0,01	0,15	0,01	0,01	0,19	0,11	0,88	0,80	0,08	-0,25	0,08	0,19	0,15	0,12	0,23	0,24
11	0,01	-0,11	-0,07	-0,19	-0,11	-0,08	0,21	0,03	0,65	0,67	0,02	0,08	0,14	-0,01	-0,18	-0,15	-0,72	-0,15
12	-0,15	-0,31	-0,15	-0,34	-0,09	-0,34	0,16	-0,15	0,44	0,65	-0,15	-0,08	0,22	-0,05	-0,21	-0,09	-1,45	-0,03
13	-0,09	-0,38	-0,60	-0,44	-0,25	-0,50	-0,07	-0,23	-0,20	0,38	-0,22	0,04	0,03	-0,18	-0,43	-0,30	-0,63	-0,15
14	-0,31	-0,41	-0,44	-0,49	-0,35	-0,34	-0,01	-0,17	0,04	0,30	-0,20	-0,21	0,05	-0,24	-0,41	-0,62	-0,36	-0,13
15	-0,26	-0,52	-0,52	-0,43	-0,46	-0,34	-0,44	-0,42	-0,55	-0,15	-0,41	-0,27	-0,16	-0,52	-0,65	-0,82	-0,27	-0,15
16	-0,38	-0,55	-0,59	-0,54	-0,52	-0,52	-0,44	-0,50	-0,55	-0,36	-0,50	-0,45	-0,16	-0,54	-0,59	-0,63	-0,48	-0,24
17	-0,42	-0,66	-0,71	-0,53	-0,46	-0,62	-0,89	-0,46	-1,09	-0,79	-0,48	-0,63	-0,17	-0,60	-0,83	-0,92	-0,46	-0,38
18	-0,66	-0,66	-0,40	-0,49	-0,68	-0,57	-0,54	-0,64	-0,83	-1,39	-0,69	-0,83	-0,27	-0,66	-0,75	-0,64	-0,51	-0,38
19	-0,55	-0,72	-0,71	-0,59	-0,62	-0,62	-0,74	-0,71	-0,62	-0,98	-0,72	-0,72	-0,28	-0,64	-0,80	-0,92	-0,57	-0,94
20	-0,68	-0,74	-0,86	-0,89	-0,79	-0,86	-0,54	-0,95	-0,71	-1,15	-1,00	-0,81	-0,44	-0,69	-0,73	-0,73	-0,59	-0,73
21	-0,68	-0,70	-0,90	-0,88	-0,82	-0,80	-0,97	-0,91	-0,81	-1,29	-0,98	-0,89	-0,80	-0,87	-0,84	-1,03	-0,64	-1,23
22	-0,76	-0,72	-0,90	-1,05	-0,90	-0,95	-1,04	-1,22	-1,00	-1,10	-1,21	-1,36	-1,17	-0,95	-0,84	-0,81	-0,64	-0,98
23	-0,85	-0,80	-0,94	-0,87	-0,96	-0,99	-1,21	-1,03	-1,49	-1,27	-1,04	-1,09	-1,40	-1,20	-0,97	-1,04	-1,28	-1,25
24	-0,85	-0,79	-1,09	-1,08	-1,02	-1,04	-1,29	-1,26	-1,77	-1,37	-1,21	-1,16	-1,51	-1,27	-0,92	-0,78	-1,00	-1,33
25	-0,84	-0,86	-0,97	-1,28	-1,17	-1,20	-1,68	-1,34	-1,54	-1,56	-1,30	-1,16	-1,78	-1,26	-1,01	-0,94	-1,08	-1,87

Взвешенные средние значения массивов данных, полученных при различных диапазонах рабочих напряжений

№ цикла	4,05÷3,00	4,05÷3,25	4,05÷3,50	4,10÷3,00	4,10÷3,25	4,10÷3,50	4,15÷3,00	4,15÷3,25	4,15÷3,50
1	—	—	—	—	100	—	—	—	—
2	98,41	99,07	99,25	99,61	99,79	99,80	99,23	99,52	99,78
3	97,98	98,97	98,86	99,56	99,79	99,72	98,93	99,06	99,70
4	97,65	98,56	98,58	99,46	99,83	99,61	98,81	99,03	99,58
5	97,47	98,19	98,42	99,31	99,87	99,36	98,64	98,67	99,49
6	97,24	98,07	98,24	99,24	99,88	99,41	98,61	98,57	99,45
7	97,10	97,85	98,11	99,22	99,85	99,34	98,44	98,33	99,34
8	96,99	97,75	97,94	99,15	99,84	99,23	98,49	98,19	99,24
9	96,99	97,49	97,85	99,10	99,79	99,18	98,39	97,97	99,25
10	97,00	97,42	97,79	99,03	99,79	99,03	98,38	97,91	99,13
11	96,99	97,21	97,72	99,02	99,72	99,09	98,36	97,64	98,82
12	96,84	97,10	97,64	98,97	99,68	99,02	98,38	97,67	98,68
13	96,84	96,83	97,52	98,91	99,50	99,03	98,28	97,47	98,85
14	96,73	96,88	97,53	98,93	99,53	98,99	98,28	97,31	98,91
15	96,72	96,88	97,48	98,79	99,33	98,93	98,14	97,11	98,93
16	96,65	96,78	97,39	98,78	99,29	98,87	98,14	97,23	98,86
17	96,59	96,73	97,39	98,69	99,10	98,84	98,12	96,99	98,83
18	96,47	96,90	97,31	98,73	99,04	98,76	98,07	97,17	98,82
19	96,51	96,70	97,32	98,67	99,16	98,78	98,07	97,00	98,68
20	96,44	96,47	97,16	98,67	99,11	98,70	98,01	97,13	98,72
21	96,45	96,46	97,17	98,58	99,07	98,69	97,85	96,92	98,60
22	96,41	96,37	97,09	98,51	99,06	98,54	97,71	97,04	98,65
23	96,33	96,44	97,05	98,51	98,93	98,63	97,57	96,87	98,44
24	96,34	96,26	97,01	98,45	98,86	98,58	97,52	97,03	98,49
25	96,32	96,22	96,89	98,35	98,87	98,57	97,43	96,91	98,35

Определение вида функции методом конечных разностей

Диапазон напряжений 4,05÷3,00					Диапазон напряжений 4,05÷3,25					Диапазон напряжений 4,05÷3,50				
Уобьедин	Δ_t^1	Δ_t^2	Δ_t^3	Темп роста	Уобьедин	Δ_t^1	Δ_t^2	Δ_t^3	Темп роста	Уобьедин	Δ_t^1	Δ_t^2	Δ_t^3	Темп роста
98,41	-	-	-	-	99,07	-	-	-	-	99,25	-	-	-	-
97,98	0,42	-	-	0,996	98,97	0,10	-	-	0,999	98,86	0,38	-	-	0,996
97,65	0,34	0,09	-	0,997	98,56	0,42	-0,32	-	0,996	98,58	0,28	0,11	-	0,997
97,47	0,18	0,16	-0,07	0,998	98,19	0,37	0,05	-0,37	0,996	98,42	0,17	0,11	0,00	0,998
97,24	0,23	-0,05	0,21	0,998	98,07	0,11	0,26	-0,21	0,999	98,24	0,18	-0,01	0,12	0,998
97,10	0,14	0,09	-0,14	0,999	97,85	0,23	-0,11	0,37	0,998	98,11	0,13	0,05	-0,07	0,999
96,99	0,11	0,03	0,06	0,999	97,75	0,09	0,13	-0,25	0,999	97,94	0,17	-0,04	0,09	0,998
96,99	-0,01	0,12	-0,09	1,000	97,49	0,26	-0,17	0,30	0,997	97,85	0,10	0,07	-0,11	0,999
97,00	-0,01	0,00	0,12	1,000	97,42	0,07	0,19	-0,36	0,999	97,79	0,05	0,05	0,02	0,999
96,99	0,01	-0,02	0,02	1,000	97,21	0,21	-0,14	0,33	0,998	97,72	0,08	-0,03	0,07	0,999
96,84	0,14	-0,13	0,12	0,999	97,10	0,11	0,10	-0,24	0,999	97,64	0,08	0,00	-0,03	0,999
96,84	0,00	0,15	-0,28	1,000	96,83	0,27	-0,15	0,25	0,997	97,52	0,12	-0,05	0,05	0,999
96,73	0,12	-0,12	0,27	0,999	96,88	-0,05	0,32	-0,47	1,001	97,53	-0,01	0,13	-0,18	1,000
96,72	0,01	0,11	-0,22	1,000	96,88	0,01	-0,06	0,37	1,000	97,48	0,05	-0,06	0,19	0,999
96,65	0,07	-0,06	0,17	0,999	96,78	0,09	-0,09	0,03	0,999	97,39	0,08	-0,03	-0,03	0,999
96,59	0,06	0,02	-0,08	0,999	96,73	0,05	0,04	-0,13	0,999	97,39	0,01	0,07	-0,11	1,000
96,47	0,12	-0,06	0,08	0,999	96,90	-0,17	0,22	-0,18	1,002	97,31	0,08	-0,07	0,14	0,999
96,51	-0,04	0,16	-0,22	1,000	96,70	0,20	-0,38	0,60	0,998	97,32	-0,01	0,08	-0,15	1,000
96,44	0,07	-0,11	0,27	0,999	96,47	0,22	-0,02	-0,36	0,998	97,16	0,15	-0,16	0,25	0,998
96,45	-0,01	0,08	-0,19	1,000	96,46	0,01	0,21	-0,23	1,000	97,17	-0,01	0,16	-0,32	1,000
96,41	0,04	-0,06	0,14	1,000	96,37	0,09	-0,07	0,28	0,999	97,09	0,09	-0,10	0,26	0,999
96,33	0,08	-0,03	-0,03	0,999	96,44	-0,07	0,16	-0,23	1,001	97,05	0,04	0,05	-0,15	1,000
96,34	0,00	0,08	-0,11	1,000	96,26	0,18	-0,25	0,41	0,998	97,01	0,04	0,00	0,05	1,000
96,32	0,02	-0,02	0,10	1,000	96,22	0,04	0,14	-0,39	1,000	96,89	0,12	-0,08	0,08	0,999

Определение вида функции методом конечных разностей

Диапазон напряжений 4,10÷3,00					Диапазон напряжений 4,10÷3,25					Диапазон напряжений 4,10÷3,50				
Уобьедин	Δ_t^1	Δ_t^2	Δ_t^3	Темп роста	Уобьедин	Δ_t^1	Δ_t^2	Δ_t^3	Темп роста	Уобьедин	Δ_t^1	Δ_t^2	Δ_t^3	Темп роста
99,61	-	-	-	-	100,00	-	-	-	-	99,80	-	-	-	-
99,56	0,05	-	-	0,999	99,79	0,21	-	-	0,998	99,72	0,08	-	-	0,999
99,46	0,10	-0,04	-	0,999	99,79	0,00	0,21	-	1,000	99,61	0,11	-0,03	-	0,999
99,31	0,16	-0,06	0,01	0,998	99,83	-0,04	0,04	0,17	1,000	99,36	0,25	-0,14	0,11	0,998
99,24	0,07	0,09	-0,15	0,999	99,87	-0,03	-0,01	0,05	1,000	99,41	-0,05	0,30	-0,44	1,001
99,22	0,03	0,04	0,05	1,000	99,88	-0,01	-0,02	0,01	1,000	99,34	0,08	-0,13	0,42	0,999
99,15	0,07	-0,04	0,08	0,999	99,85	0,03	-0,03	0,01	1,000	99,23	0,11	-0,03	-0,09	0,999
99,10	0,05	0,02	-0,06	0,999	99,84	0,01	0,01	-0,05	1,000	99,18	0,05	0,06	-0,09	1,000
99,03	0,06	-0,01	0,03	0,999	99,79	0,05	-0,04	0,05	1,000	99,03	0,15	-0,10	0,16	0,999
99,02	0,01	0,05	-0,06	1,000	99,79	0,00	0,05	-0,09	1,000	99,09	-0,05	0,20	-0,30	1,001
98,97	0,05	-0,03	0,09	1,000	99,72	0,07	-0,07	0,12	0,999	99,02	0,07	-0,12	0,32	0,999
98,91	0,07	-0,02	-0,01	0,999	99,68	0,05	0,02	-0,10	1,000	99,03	-0,01	0,08	-0,20	1,000
98,93	-0,03	0,09	-0,11	1,000	99,50	0,18	-0,13	0,15	0,998	98,99	0,05	-0,05	0,13	1,000
98,79	0,14	-0,16	0,26	0,999	99,53	-0,03	0,21	-0,34	1,000	98,93	0,06	-0,01	-0,04	0,999
98,78	0,02	0,12	-0,29	1,000	99,33	0,20	-0,23	0,44	0,998	98,87	0,05	0,00	-0,02	0,999
98,69	0,09	-0,07	0,19	0,999	99,29	0,04	0,16	-0,40	1,000	98,84	0,03	0,02	-0,02	1,000
98,73	-0,04	0,12	-0,19	1,000	99,10	0,19	-0,15	0,32	0,998	98,76	0,08	-0,05	0,08	0,999
98,67	0,05	-0,09	0,21	0,999	99,04	0,06	0,13	-0,28	0,999	98,78	-0,02	0,10	-0,16	1,000
98,67	0,01	0,04	-0,13	1,000	99,16	-0,12	0,18	-0,04	1,001	98,70	0,08	-0,09	0,20	0,999
98,58	0,08	-0,07	0,12	0,999	99,11	0,05	-0,17	0,34	1,000	98,69	0,01	0,06	-0,16	1,000
98,51	0,07	0,01	-0,08	0,999	99,07	0,05	0,00	-0,17	1,000	98,54	0,14	-0,13	0,19	0,999
98,51	0,00	0,08	-0,07	1,000	99,06	0,00	0,04	-0,04	1,000	98,63	-0,09	0,23	-0,36	1,001
98,45	0,06	-0,06	0,14	0,999	98,93	0,13	-0,13	0,17	0,999	98,58	0,05	-0,14	0,37	1,000
98,35	0,10	-0,03	-0,03	0,999	98,86	0,08	0,05	-0,18	0,999	98,57	0,02	0,03	-0,17	1,000
					98,87	-0,01	0,09	-0,04	1,000					

Определение вида функции методом конечных разностей

Диапазон напряжений 4,15÷3,00					Диапазон напряжений 4,15÷3,25					Диапазон напряжений 4,15÷3,50				
Уобьедин	Δ_t^1	Δ_t^2	Δ_t^3	Темп роста	Уобьедин	Δ_t^1	Δ_t^2	Δ_t^3	Темп роста	Уобьедин	Δ_t^1	Δ_t^2	Δ_t^3	Темп роста
99,23	-	-	-	-	99,52	-	-	-	-	99,78	-	-	-	-
98,93	0,30	-	-	0,997	99,06	0,46	-	-	0,995	99,70	0,08	-	-	0,999
98,81	0,12	0,18	-	0,999	99,03	0,03	0,43	-	1,000	99,58	0,12	-0,04	-	0,999
98,64	0,17	-0,06	0,24	0,998	98,67	0,37	-0,34	0,77	0,996	99,49	0,08	0,03	-0,07	0,999
98,61	0,03	0,14	-0,20	1,000	98,57	0,10	0,27	-0,60	0,999	99,45	0,05	0,03	0,00	1,000
98,44	0,16	-0,13	0,28	0,998	98,33	0,23	-0,13	0,40	0,998	99,34	0,11	-0,06	0,10	0,999
98,49	-0,04	0,21	-0,34	1,000	98,19	0,14	0,10	-0,23	0,999	99,24	0,10	0,01	-0,07	0,999
98,39	0,10	-0,14	0,35	0,999	97,97	0,22	-0,08	0,18	0,998	99,25	-0,01	0,11	-0,10	1,000
98,38	0,01	0,08	-0,22	1,000	97,91	0,06	0,16	-0,24	0,999	99,13	0,12	-0,13	0,24	0,999
98,36	0,02	-0,01	0,10	1,000	97,64	0,27	-0,20	0,36	0,997	98,82	0,31	-0,19	0,05	0,997
98,38	-0,02	0,04	-0,05	1,000	97,67	-0,02	0,29	-0,49	1,000	98,68	0,14	0,17	-0,35	0,999
98,28	0,09	-0,11	0,15	0,999	97,47	0,19	-0,22	0,50	0,998	98,85	-0,16	0,31	-0,14	1,002
98,28	0,01	0,09	-0,20	1,000	97,31	0,16	0,03	-0,25	0,998	98,91	-0,07	-0,10	0,41	1,001
98,14	0,13	-0,12	0,21	0,999	97,11	0,19	-0,03	0,07	0,998	98,93	-0,02	-0,05	-0,05	1,000
98,14	0,01	0,13	-0,25	1,000	97,23	-0,12	0,32	-0,35	1,001	98,86	0,07	-0,09	0,04	0,999
98,12	0,02	-0,01	0,14	1,000	96,99	0,24	-0,37	0,68	0,997	98,83	0,03	0,04	-0,13	1,000
98,07	0,05	-0,03	0,01	1,000	97,17	-0,18	0,42	-0,79	1,002	98,82	0,01	0,01	0,03	1,000
98,07	0,00	0,05	-0,07	1,000	97,00	0,17	-0,35	0,77	0,998	98,68	0,14	-0,13	0,14	0,999
98,01	0,06	-0,06	0,11	0,999	97,13	-0,13	0,29	-0,64	1,001	98,72	-0,04	0,18	-0,31	1,000
97,85	0,16	-0,10	0,03	0,998	96,92	0,20	-0,33	0,62	0,998	98,60	0,13	-0,17	0,35	0,999
97,71	0,14	0,02	-0,12	0,999	97,04	-0,12	0,32	-0,65	1,001	98,65	-0,06	0,18	-0,35	1,001
97,57	0,13	0,01	0,02	0,999	96,87	0,17	-0,29	0,62	0,998	98,44	0,21	-0,27	0,45	0,998
97,52	0,05	0,08	-0,07	0,999	97,03	-0,16	0,33	-0,62	1,002	98,49	-0,05	0,26	-0,52	1,000
97,43	0,09	-0,03	0,11	0,999	96,91	0,12	-0,27	0,60	0,999	98,35	0,14	-0,19	0,44	0,999

Определение параметров экспоненциальных уравнений методом наименьших квадратов

Диапазон напряжений 4,05÷3,00						Диапазон напряжений 4,05÷3,25						Диапазон напряжений 4,05÷3,50					
t	y _{объедин}	ln(y)	t ²	ln(y) ²	t*ln(y)	t	y _{объедин}	ln(y)	t ²	ln(y) ²	t*ln(y)	t	y _{объедин}	ln(y)	t ²	ln(y) ²	t*ln(y)
2	98,41	4,589	4	21,060	9,178	2	99,07	4,596	4	21,121	9,192	2	99,25	4,598	4	21,138	9,195
3	97,98	4,585	9	21,020	13,754	3	98,97	4,595	9	21,113	13,785	3	98,86	4,594	9	21,102	13,781
4	97,65	4,581	16	20,989	18,325	4	98,56	4,591	16	21,074	18,362	4	98,58	4,591	16	21,076	18,364
5	97,47	4,580	25	20,972	22,898	5	98,19	4,587	25	21,039	22,934	5	98,42	4,589	25	21,061	22,946
6	97,24	4,577	36	20,950	27,463	6	98,07	4,586	36	21,029	27,514	6	98,24	4,587	36	21,044	27,524
7	97,10	4,576	49	20,937	32,030	7	97,85	4,583	49	21,007	32,084	7	98,11	4,586	49	21,032	32,103
8	96,99	4,575	64	20,927	36,596	8	97,75	4,582	64	20,999	36,660	8	97,94	4,584	64	21,017	36,675
9	96,99	4,575	81	20,927	41,172	9	97,49	4,580	81	20,974	41,218	9	97,85	4,583	81	21,007	41,250
10	97,00	4,575	100	20,928	45,747	10	97,42	4,579	100	20,968	45,791	10	97,79	4,583	100	21,003	45,829
11	96,99	4,575	121	20,927	50,320	11	97,21	4,577	121	20,948	50,346	11	97,72	4,582	121	20,995	50,403
12	96,84	4,573	144	20,913	54,877	12	97,10	4,576	144	20,937	54,909	12	97,64	4,581	144	20,988	54,975
13	96,84	4,573	169	20,913	59,450	13	96,83	4,573	169	20,912	59,449	13	97,52	4,580	169	20,977	59,540
14	96,73	4,572	196	20,902	64,007	14	96,88	4,573	196	20,917	64,029	14	97,53	4,580	196	20,978	64,122
15	96,72	4,572	225	20,901	68,577	15	96,88	4,573	225	20,916	68,601	15	97,48	4,580	225	20,973	68,694
16	96,65	4,571	256	20,895	73,137	16	96,78	4,572	256	20,907	73,159	16	97,39	4,579	256	20,965	73,260
17	96,59	4,570	289	20,889	77,698	17	96,73	4,572	289	20,902	77,723	17	97,39	4,579	289	20,964	77,838
18	96,47	4,569	324	20,878	82,246	18	96,90	4,574	324	20,919	82,326	18	97,31	4,578	324	20,957	82,402
19	96,51	4,570	361	20,882	86,823	19	96,70	4,572	361	20,899	86,860	19	97,32	4,578	361	20,958	86,982
20	96,44	4,569	400	20,875	91,378	20	96,47	4,569	400	20,878	91,385	20	97,16	4,576	400	20,944	91,528
21	96,45	4,569	441	20,876	95,950	21	96,46	4,569	441	20,877	95,951	21	97,17	4,576	441	20,944	96,106
22	96,41	4,569	484	20,872	100,509	22	96,37	4,568	484	20,869	100,501	22	97,09	4,576	484	20,936	100,663
23	96,33	4,568	529	20,865	105,060	23	96,44	4,569	529	20,875	105,086	23	97,05	4,575	529	20,933	105,230
24	96,34	4,568	576	20,865	109,629	24	96,26	4,567	576	20,858	109,610	24	97,01	4,575	576	20,929	109,795
25	96,32	4,568	625	20,864	114,192	25	96,22	4,567	625	20,854	114,166	25	96,89	4,574	625	20,917	114,338
Сумма						Сумма						Сумма					
324	2325,443	109,766	5524	502,028	1481,018	324	2333,608	109,850	5524	502,794	1481,640	324	2344,685	109,964	5524	503,838	1483,544
Средние значения						Средние значения						Средние значения					
13,5	96,893	4,574	230,167	20,918	61,709	13,5	97,234	4,577	230,167	20,950	61,735	13,5	97,695	4,582	230,167	20,993	61,814

Определение параметров экспоненциальных уравнений методом наименьших квадратов

Диапазон напряжений 4,10÷3,00						Диапазон напряжений 4,10÷3,25						Диапазон напряжений 4,10÷3,50					
t	Уобъедин	ln(y)	t²	ln(y)²	t*ln(y)	t	Уобъедин	ln(y)	t²	ln(y)²	t*ln(y)	t	Уобъедин	ln(y)	t²	ln(y)²	t*ln(y)
2	99,61	4,601	4	21,172	9,203	1	100,00	4,605	1	21,208	4,605	2	99,80	4,603	4	21,189	9,206
3	99,56	4,601	9	21,167	13,802	2	99,79	4,603	4	21,188	9,206	3	99,72	4,602	9	21,182	13,807
4	99,46	4,600	16	21,158	18,399	3	99,79	4,603	9	21,188	13,809	4	99,61	4,601	16	21,172	18,405
5	99,31	4,598	25	21,144	22,991	4	99,83	4,604	16	21,192	18,414	5	99,36	4,599	25	21,149	22,994
6	99,24	4,598	36	21,138	27,585	5	99,87	4,604	25	21,195	23,019	6	99,41	4,599	36	21,154	27,596
7	99,22	4,597	49	21,135	32,181	6	99,88	4,604	36	21,196	27,624	7	99,34	4,599	49	21,147	32,190
8	99,15	4,597	64	21,129	36,773	7	99,85	4,604	49	21,194	32,226	8	99,23	4,597	64	21,137	36,780
9	99,10	4,596	81	21,124	41,365	8	99,84	4,604	64	21,193	36,828	9	99,18	4,597	81	21,132	41,373
10	99,03	4,595	100	21,118	45,954	9	99,79	4,603	81	21,188	41,428	10	99,03	4,595	100	21,118	45,955
11	99,02	4,595	121	21,117	50,549	10	99,79	4,603	100	21,189	46,031	11	99,09	4,596	121	21,123	50,556
12	98,97	4,595	144	21,113	55,138	11	99,72	4,602	121	21,182	50,626	12	99,02	4,595	144	21,117	55,144
13	98,91	4,594	169	21,107	59,724	12	99,68	4,602	144	21,178	55,223	13	99,03	4,595	169	21,118	59,741
14	98,93	4,594	196	21,109	64,322	13	99,50	4,600	169	21,161	59,802	14	98,99	4,595	196	21,114	64,330
15	98,79	4,593	225	21,096	68,896	14	99,53	4,600	196	21,164	64,407	15	98,93	4,594	225	21,108	68,916
16	98,78	4,593	256	21,095	73,486	15	99,33	4,598	225	21,146	68,977	16	98,87	4,594	256	21,103	73,502
17	98,69	4,592	289	21,086	78,064	16	99,29	4,598	256	21,142	73,569	17	98,84	4,594	289	21,100	78,090
18	98,73	4,592	324	21,090	82,663	17	99,10	4,596	289	21,125	78,135	18	98,76	4,593	324	21,093	82,668
19	98,67	4,592	361	21,085	87,245	18	99,04	4,596	324	21,119	82,720	19	98,78	4,593	361	21,094	87,264
20	98,67	4,592	400	21,084	91,835	19	99,16	4,597	361	21,130	87,339	20	98,70	4,592	400	21,087	91,842
21	98,58	4,591	441	21,076	96,409	20	99,11	4,596	400	21,126	91,925	21	98,69	4,592	441	21,086	96,431
22	98,51	4,590	484	21,069	100,983	21	99,07	4,596	441	21,121	96,512	22	98,54	4,590	484	21,073	100,991
23	98,51	4,590	529	21,070	105,574	22	99,06	4,596	484	21,121	101,107	23	98,63	4,591	529	21,081	105,602
24	98,45	4,590	576	21,064	110,148	23	98,93	4,594	529	21,109	105,672	24	98,58	4,591	576	21,076	110,182
25	98,35	4,589	625	21,055	114,713	24	98,86	4,594	576	21,102	110,248	25	98,57	4,591	625	21,075	114,768
Сумма						25	98,87	4,594	625	21,103	114,846	Сумма					
						Сумма											
324	2374,248	110,265	5524	506,599	1488,003	325	2486,698	114,996	5525	528,961	1494,298	324	2376,710	110,290	5524	506,828	1488,330
Средние значения						Средние значения						Средние значения					
13,5	98,927	4,594	230,167	21,108	62,000	13	99,468	4,600	221,000	21,158	59,772	13,5	99,030	4,595	230,167	21,118	62,014

Определение параметров экспоненциальных уравнений методом наименьших квадратов

Диапазон напряжений 4,15÷3,00						Диапазон напряжений 4,15÷3,25						Диапазон напряжений 4,15÷3,50					
t	y _{объедин}	ln(y)	t ²	ln(y) ²	t*ln(y)	t	y _{объедин}	ln(y)	t ²	ln(y) ²	t*ln(y)	t	y _{объедин}	ln(y)	t ²	ln(y) ²	t*ln(y)
2	99,23	4,597	4	21,136	9,195	2	99,52	4,600	4	21,164	9,201	2	99,78	4,603	4	21,187	9,206
3	98,93	4,594	9	21,109	13,783	3	99,06	4,596	9	21,121	13,787	3	99,70	4,602	9	21,179	13,806
4	98,81	4,593	16	21,098	18,373	4	99,03	4,595	16	21,118	18,382	4	99,58	4,601	16	21,169	18,404
5	98,64	4,591	25	21,081	22,957	5	98,67	4,592	25	21,084	22,959	5	99,49	4,600	25	21,161	23,001
6	98,61	4,591	36	21,079	27,547	6	98,57	4,591	36	21,075	27,544	6	99,45	4,600	36	21,156	27,598
7	98,44	4,589	49	21,063	32,126	7	98,33	4,588	49	21,053	32,118	7	99,34	4,599	49	21,146	32,190
8	98,49	4,590	64	21,068	36,720	8	98,19	4,587	64	21,040	36,696	8	99,24	4,598	64	21,138	36,780
9	98,39	4,589	81	21,059	41,301	9	97,97	4,585	81	21,019	41,262	9	99,25	4,598	81	21,139	41,379
10	98,38	4,589	100	21,058	45,889	10	97,91	4,584	100	21,013	45,840	10	99,13	4,596	100	21,127	45,965
11	98,36	4,589	121	21,055	50,475	11	97,64	4,581	121	20,988	50,395	11	98,82	4,593	121	21,099	50,527
12	98,38	4,589	144	21,057	55,066	12	97,67	4,582	144	20,991	54,979	12	98,68	4,592	144	21,085	55,103
13	98,28	4,588	169	21,048	59,642	13	97,47	4,580	169	20,972	59,534	13	98,85	4,594	169	21,101	59,716
14	98,28	4,588	196	21,048	64,229	14	97,31	4,578	196	20,957	64,090	14	98,91	4,594	196	21,107	64,319
15	98,14	4,586	225	21,035	68,796	15	97,11	4,576	225	20,939	68,638	15	98,93	4,594	225	21,108	68,916
16	98,14	4,586	256	21,035	73,382	16	97,23	4,577	256	20,950	73,234	16	98,86	4,594	256	21,102	73,499
17	98,12	4,586	289	21,033	77,965	17	96,99	4,575	289	20,927	77,768	17	98,83	4,593	289	21,100	78,088
18	98,07	4,586	324	21,029	82,543	18	97,17	4,576	324	20,944	82,376	18	98,82	4,593	324	21,098	82,679
19	98,07	4,586	361	21,029	87,129	19	97,00	4,575	361	20,928	86,920	19	98,68	4,592	361	21,085	87,246
20	98,01	4,585	400	21,023	91,701	20	97,13	4,576	400	20,940	91,520	20	98,72	4,592	400	21,089	91,846
21	97,85	4,583	441	21,008	96,252	21	96,92	4,574	441	20,921	96,052	21	98,60	4,591	441	21,078	96,412
22	97,71	4,582	484	20,994	100,803	22	97,04	4,575	484	20,932	100,654	22	98,65	4,592	484	21,083	101,015
23	97,57	4,581	529	20,982	105,354	23	96,87	4,573	529	20,916	105,188	23	98,44	4,589	529	21,063	105,558
24	97,52	4,580	576	20,977	109,921	24	97,03	4,575	576	20,931	109,800	24	98,49	4,590	576	21,068	110,159
25	97,43	4,579	625	20,969	114,479	25	96,91	4,574	625	20,920	114,345	25	98,35	4,589	625	21,055	114,714
Сумма						Сумма						Сумма					
324	2357,848	110,099	5524	505,071	1485,626	324	2344,762	109,964	5524	503,843	1483,283	324	2375,593	110,279	5524	506,724	1488,125
Средние значения						Средние значения						Средние значения					
13,5	98,244	4,587	230,167	21,045	61,901	13,5	97,698	4,582	230,167	20,993	61,803	13,5	98,983	4,595	230,167	21,113	62,005

Определение относительных ошибок аппроксимации уравнений регрессии

Диапазон напряжений 4,05÷3,00				Диапазон напряжений 4,05÷3,25				Диапазон напряжений 4,05÷3,50			
t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	Ошибка аппроксимации	t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	Ошибка аппроксимации	t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	Ошибка аппроксимации
2	98,41	97,67	0,0075	2	99,07	98,43	0,0064	2	99,25	98,57	0,0068
3	97,98	97,60	0,0039	3	98,97	98,32	0,0065	3	98,86	98,49	0,0037
4	97,65	97,54	0,0011	4	98,56	98,22	0,0034	4	98,58	98,41	0,0017
5	97,47	97,47	0,0000	5	98,19	98,11	0,0008	5	98,42	98,34	0,0008
6	97,24	97,40	0,0017	6	98,07	98,00	0,0007	6	98,24	98,26	0,0002
7	97,10	97,33	0,0024	7	97,85	97,89	0,0005	7	98,11	98,18	0,0007
8	96,99	97,26	0,0029	8	97,75	97,79	0,0003	8	97,94	98,10	0,0016
9	96,99	97,20	0,0021	9	97,49	97,68	0,0019	9	97,85	98,02	0,0018
10	97,00	97,13	0,0013	10	97,42	97,57	0,0015	10	97,79	97,94	0,0015
11	96,99	97,06	0,0008	11	97,21	97,46	0,0026	11	97,72	97,86	0,0015
12	96,84	96,99	0,0016	12	97,10	97,36	0,0027	12	97,64	97,79	0,0015
13	96,84	96,92	0,0008	13	96,83	97,25	0,0043	13	97,52	97,71	0,0020
14	96,73	96,86	0,0013	14	96,88	97,14	0,0027	14	97,53	97,63	0,0011
15	96,72	96,79	0,0007	15	96,88	97,04	0,0017	15	97,48	97,55	0,0008
16	96,65	96,72	0,0008	16	96,78	96,93	0,0015	16	97,39	97,47	0,0008
17	96,59	96,65	0,0006	17	96,73	96,82	0,0010	17	97,39	97,40	0,0001
18	96,47	96,59	0,0012	18	96,90	96,72	0,0019	18	97,31	97,32	0,0001
19	96,51	96,52	0,0001	19	96,70	96,61	0,0009	19	97,32	97,24	0,0008
20	96,44	96,45	0,0001	20	96,47	96,50	0,0003	20	97,16	97,16	0,0000
21	96,45	96,38	0,0007	21	96,46	96,40	0,0006	21	97,17	97,09	0,0009
22	96,41	96,32	0,0010	22	96,37	96,29	0,0008	22	97,09	97,01	0,0008
23	96,33	96,25	0,0009	23	96,44	96,19	0,0027	23	97,05	96,93	0,0012
24	96,34	96,18	0,0016	24	96,26	96,08	0,0019	24	97,01	96,85	0,0016
25	96,32	96,11	0,0022	25	96,22	95,97	0,0025	25	96,89	96,78	0,0011
			Сумма:				Сумма:				Сумма:
			$\bar{A}$				$\bar{A}$				$\bar{A}$
			0,0373				0,0502				0,0332
			0,0016				0,0021				0,0014

Определение относительных ошибок аппроксимации уравнений регрессии

Диапазон напряжений 4,10÷3,00				Диапазон напряжений 4,10÷3,25				Диапазон напряжений 4,10÷3,50			
t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	Ошибка аппроксимации	t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	Ошибка аппроксимации	t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	Ошибка аппроксимации
2	99,61	99,50	0,0011	1	100,00	100,07	0,0007	2	99,80	99,60	0,0020
3	99,56	99,45	0,0011	2	99,79	100,02	0,0023	3	99,72	99,55	0,0017
4	99,46	99,40	0,0006	3	99,79	99,97	0,0018	4	99,61	99,50	0,0011
5	99,31	99,35	0,0004	4	99,83	99,92	0,0009	5	99,36	99,45	0,0009
6	99,24	99,30	0,0006	5	99,87	99,87	0,0000	6	99,41	99,40	0,0001
7	99,22	99,25	0,0004	6	99,88	99,82	0,0006	7	99,34	99,35	0,0001
8	99,15	99,20	0,0006	7	99,85	99,77	0,0008	8	99,23	99,30	0,0007
9	99,10	99,15	0,0006	8	99,84	99,72	0,0012	9	99,18	99,25	0,0007
10	99,03	99,10	0,0007	9	99,79	99,67	0,0012	10	99,03	99,20	0,0017
11	99,02	99,05	0,0003	10	99,79	99,62	0,0017	11	99,09	99,15	0,0007
12	98,97	99,00	0,0003	11	99,72	99,57	0,0015	12	99,02	99,10	0,0008
13	98,91	98,95	0,0005	12	99,68	99,52	0,0016	13	99,03	99,05	0,0002
14	98,93	98,91	0,0003	13	99,50	99,47	0,0003	14	98,99	99,00	0,0002
15	98,79	98,86	0,0006	14	99,53	99,42	0,0011	15	98,93	98,96	0,0003
16	98,78	98,81	0,0003	15	99,33	99,37	0,0004	16	98,87	98,91	0,0003
17	98,69	98,76	0,0007	16	99,29	99,32	0,0003	17	98,84	98,86	0,0001
18	98,73	98,71	0,0002	17	99,10	99,27	0,0017	18	98,76	98,81	0,0005
19	98,67	98,66	0,0002	18	99,04	99,22	0,0018	19	98,78	98,76	0,0002
20	98,67	98,61	0,0006	19	99,16	99,17	0,0001	20	98,70	98,71	0,0001
21	98,58	98,56	0,0002	20	99,11	99,12	0,0001	21	98,69	98,66	0,0003
22	98,51	98,51	0,0000	21	99,07	99,07	0,0001	22	98,54	98,61	0,0007
23	98,51	98,46	0,0005	22	99,06	99,02	0,0004	23	98,63	98,56	0,0007
24	98,45	98,41	0,0004	23	98,93	98,98	0,0004	24	98,58	98,51	0,0007
25	98,35	98,36	0,0001	24	98,86	98,93	0,0007	25	98,57	98,46	0,0011
			Сумма:	25	98,87	98,88	0,0000				Сумма:
			$\bar{A}$				Сумма:				$\bar{A}$
			0,0113				0,0217				0,0159
			0,0005				0,0009				0,0007

Определение относительных ошибок аппроксимации уравнений регрессии

Диапазон напряжений 4,15÷3,00				Диапазон напряжений 4,15÷3,25				Диапазон напряжений 4,15÷3,50			
t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	Ошибка аппроксимации	t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	Ошибка аппроксимации	t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	Ошибка аппроксимации
2	99,23	98,92	0,0031	2	99,52	98,82	0,0070	2	99,78	99,55	0,0023
3	98,93	98,86	0,0007	3	99,06	98,72	0,0034	3	99,70	99,50	0,0020
4	98,81	98,80	0,0001	4	99,03	98,62	0,0041	4	99,58	99,45	0,0013
5	98,64	98,74	0,0011	5	98,67	98,53	0,0014	5	99,49	99,40	0,0009
6	98,61	98,68	0,0008	6	98,57	98,43	0,0014	6	99,45	99,35	0,0010
7	98,44	98,62	0,0018	7	98,33	98,33	0,0000	7	99,34	99,30	0,0004
8	98,49	98,57	0,0008	8	98,19	98,23	0,0004	8	99,24	99,25	0,0001
9	98,39	98,51	0,0012	9	97,97	98,13	0,0016	9	99,25	99,20	0,0005
10	98,38	98,45	0,0007	10	97,91	98,03	0,0013	10	99,13	99,15	0,0002
11	98,36	98,39	0,0003	11	97,64	97,94	0,0030	11	98,82	99,10	0,0028
12	98,38	98,33	0,0005	12	97,67	97,84	0,0018	12	98,68	99,05	0,0038
13	98,28	98,27	0,0001	13	97,47	97,74	0,0028	13	98,85	99,00	0,0016
14	98,28	98,21	0,0006	14	97,31	97,64	0,0034	14	98,91	98,95	0,0004
15	98,14	98,15	0,0001	15	97,11	97,55	0,0045	15	98,93	98,91	0,0002
16	98,14	98,09	0,0004	16	97,23	97,45	0,0022	16	98,86	98,86	0,0000
17	98,12	98,03	0,0009	17	96,99	97,35	0,0037	17	98,83	98,81	0,0003
18	98,07	97,98	0,0010	18	97,17	97,25	0,0009	18	98,82	98,76	0,0006
19	98,07	97,92	0,0016	19	97,00	97,16	0,0016	19	98,68	98,71	0,0003
20	98,01	97,86	0,0015	20	97,13	97,06	0,0007	20	98,72	98,66	0,0007
21	97,85	97,80	0,0005	21	96,92	96,96	0,0004	21	98,60	98,61	0,0001
22	97,71	97,74	0,0004	22	97,04	96,87	0,0019	22	98,65	98,56	0,0009
23	97,57	97,68	0,0011	23	96,87	96,77	0,0011	23	98,44	98,51	0,0007
24	97,52	97,62	0,0011	24	97,03	96,67	0,0037	24	98,49	98,46	0,0003
25	97,43	97,57	0,0014	25	96,91	96,58	0,0035	25	98,35	98,41	0,0006
		Сумма:	0,0217			Сумма:	0,0558			Сумма:	0,0220
		$\bar{A}$	0,0009			$\bar{A}$	0,0023			$\bar{A}$	0,0009

Расчёт коэффициентов несоответствия Тейла для уравнений регрессии

Диапазон напряжений 4,05÷3,00					Диапазон напряжений 4,05÷3,25					Диапазон напряжений 4,05÷3,50				
t	Уобъедин i	$\hat{Y}_i$	$(Y_{\text{объедин } i} - \hat{Y}_i)^2$	$y^2_{\text{объедин } i}$	t	Уобъедин i	$\hat{Y}_i$	$(Y_{\text{объедин } i} - \hat{Y}_i)^2$	$y^2_{\text{объедин } i}$	t	Уобъедин i	$\hat{Y}_i$	$(Y_{\text{объедин } i} - \hat{Y}_i)^2$	$y^2_{\text{объедин } i}$
2	98,41	97,67	0,5395	9684,07	2	99,07	98,43	0,4029	9814,45	2	99,25	98,57	0,4534	9849,67
3	97,98	97,60	0,1436	9600,82	3	98,97	98,32	0,4189	9795,49	3	98,86	98,49	0,1351	9773,48
4	97,65	97,54	0,0123	9535,00	4	98,56	98,22	0,1148	9713,23	4	98,58	98,41	0,0287	9718,78
5	97,47	97,47	0,0000	9499,94	5	98,19	98,11	0,0058	9640,32	5	98,42	98,34	0,0065	9685,77
6	97,24	97,40	0,0266	9455,04	6	98,07	98,00	0,0050	9618,02	6	98,24	98,26	0,0004	9650,41
7	97,10	97,33	0,0553	9427,76	7	97,85	97,89	0,0023	9573,76	7	98,11	98,18	0,0047	9625,60
8	96,99	97,26	0,0776	9406,13	8	97,75	97,79	0,0010	9555,93	8	97,94	98,10	0,0242	9593,17
9	96,99	97,20	0,0417	9407,37	9	97,49	97,68	0,0340	9505,03	9	97,85	98,02	0,0311	9573,72
10	97,00	97,13	0,0171	9408,41	10	97,42	97,57	0,0215	9491,49	10	97,79	97,94	0,0224	9563,59
11	96,99	97,06	0,0055	9406,22	11	97,21	97,46	0,0631	9450,23	11	97,72	97,86	0,0225	9548,23
12	96,84	96,99	0,0226	9378,29	12	97,10	97,36	0,0669	9427,98	12	97,64	97,79	0,0221	9533,21
13	96,84	96,92	0,0064	9378,75	13	96,83	97,25	0,1749	9376,28	13	97,52	97,71	0,0370	9509,40
14	96,73	96,86	0,0165	9356,26	14	96,88	97,14	0,0680	9386,04	14	97,53	97,63	0,0107	9511,48
15	96,72	96,79	0,0051	9354,21	15	96,88	97,04	0,0257	9384,83	15	97,48	97,55	0,0056	9501,83
16	96,65	96,72	0,0055	9340,50	16	96,78	96,93	0,0216	9366,73	16	97,39	97,47	0,0064	9485,68
17	96,59	96,65	0,0039	9329,70	17	96,73	96,82	0,0087	9356,54	17	97,39	97,40	0,0001	9484,03
18	96,47	96,59	0,0130	9306,75	18	96,90	96,72	0,0342	9389,79	18	97,31	97,32	0,0001	9469,19
19	96,51	96,52	0,0000	9314,34	19	96,70	96,61	0,0076	9350,26	19	97,32	97,24	0,0060	9470,78
20	96,44	96,45	0,0001	9300,65	20	96,47	96,50	0,0010	9306,95	20	97,16	97,16	0,0000	9440,99
21	96,45	96,38	0,0049	9303,15	21	96,46	96,40	0,0038	9304,25	21	97,17	97,09	0,0077	9442,62
22	96,41	96,32	0,0088	9294,68	22	96,37	96,29	0,0065	9287,55	22	97,09	97,01	0,0062	9425,73
23	96,33	96,25	0,0073	9280,12	23	96,44	96,19	0,0672	9301,56	23	97,05	96,93	0,0142	9418,51
24	96,34	96,18	0,0247	9280,95	24	96,26	96,08	0,0339	9266,70	24	97,01	96,85	0,0241	9410,49
25	96,32	96,11	0,0435	9277,88	25	96,22	95,97	0,0600	9258,09	25	96,89	96,78	0,0122	9386,82
		Сумма	1,0814	225327			Сумма	1,6489	226921			Сумма	0,8813	229073
		K_T	0,0022				K_T	0,0027				K_T	0,0020	

Расчёт коэффициентов несоответствия Тейла для уравнений регрессии

Диапазон напряжений 4,10÷3,00					Диапазон напряжений 4,10÷3,25					Диапазон напряжений 4,10÷3,50				
t	у _{объедин i}	$\hat{y}_i$	$(y_{\text{объедин } i} - \hat{y}_i)^2$	y ² _{объедин i}	t	у _{объедин i}	$\hat{y}_i$	$(y_{\text{объедин } i} - \hat{y}_i)^2$	y ² _{объедин i}	t	у _{объедин i}	$\hat{y}_i$	$(y_{\text{объедин } i} - \hat{y}_i)^2$	y ² _{объедин i}
2	99,61	99,50	0,0128	9922,86	1	100,00	100,07	0,0049	10000,00	2	99,80	99,60	0,0397	9959,98
3	99,56	99,45	0,0121	9912,33	2	99,79	100,02	0,0532	9957,90	3	99,72	99,55	0,0284	9943,87
4	99,46	99,40	0,0039	9892,99	3	99,79	99,97	0,0320	9958,25	4	99,61	99,50	0,0123	9922,46
5	99,31	99,35	0,0018	9862,18	4	99,83	99,92	0,0073	9966,94	5	99,36	99,45	0,0075	9873,30
6	99,24	99,30	0,0034	9849,16	5	99,87	99,87	0,0000	9973,41	6	99,41	99,40	0,0002	9883,21
7	99,22	99,25	0,0012	9844,05	6	99,88	99,82	0,0031	9975,11	7	99,34	99,35	0,0002	9868,17
8	99,15	99,20	0,0030	9830,25	7	99,85	99,77	0,0063	9970,00	8	99,23	99,30	0,0050	9846,90
9	99,10	99,15	0,0033	9819,85	8	99,84	99,72	0,0140	9967,73	9	99,18	99,25	0,0049	9837,08
10	99,03	99,10	0,0052	9807,23	9	99,79	99,67	0,0143	9958,06	10	99,03	99,20	0,0285	9807,70
11	99,02	99,05	0,0012	9804,90	10	99,79	99,62	0,0297	9958,64	11	99,09	99,15	0,0042	9818,55
12	98,97	99,00	0,0009	9795,86	11	99,72	99,57	0,0231	9944,62	12	99,02	99,10	0,0067	9805,28
13	98,91	98,95	0,0022	9782,80	12	99,68	99,52	0,0241	9935,34	13	99,03	99,05	0,0005	9807,16
14	98,93	98,91	0,0008	9787,90	13	99,50	99,47	0,0007	9899,98	14	98,99	99,00	0,0004	9798,15
15	98,79	98,86	0,0037	9760,37	14	99,53	99,42	0,0120	9906,42	15	98,93	98,96	0,0007	9786,74
16	98,78	98,81	0,0008	9757,16	15	99,33	99,37	0,0019	9866,23	16	98,87	98,91	0,0010	9776,08
17	98,69	98,76	0,0043	9740,02	16	99,29	99,32	0,0010	9858,70	17	98,84	98,86	0,0002	9769,78
18	98,73	98,71	0,0004	9747,07	17	99,10	99,27	0,0290	9821,24	18	98,76	98,81	0,0024	9753,01
19	98,67	98,66	0,0003	9736,63	18	99,04	99,22	0,0318	9809,83	19	98,78	98,76	0,0003	9756,61
20	98,67	98,61	0,0033	9735,03	19	99,16	99,17	0,0001	9833,32	20	98,70	98,71	0,0001	9741,72
21	98,58	98,56	0,0006	9718,80	20	99,11	99,12	0,0001	9823,54	21	98,69	98,66	0,0008	9739,01
22	98,51	98,51	0,0000	9704,11	21	99,07	99,07	0,0000	9814,52	22	98,54	98,61	0,0044	9710,67
23	98,51	98,46	0,0024	9704,19	22	99,06	99,02	0,0016	9813,75	23	98,63	98,56	0,0052	9728,35
24	98,45	98,41	0,0012	9691,82	23	98,93	98,98	0,0017	9787,99	24	98,58	98,51	0,0053	9718,72
25	98,35	98,36	0,0002	9672,61	24	98,86	98,93	0,0045	9772,96	25	98,57	98,46	0,0109	9715,24
Сумма			0,0689	234880	25	98,87	98,88	0,0000	9775,62	Сумма			0,1698	235368
K _T			0,0005		Сумма			0,2964	247350	K _T			0,0008	
					K _T			0,0011						

Расчёт коэффициентов несоответствия Тейла для уравнений регрессии

Диапазон напряжений 4,15÷3,00					Диапазон напряжений 4,15÷3,25					Диапазон напряжений 4,15÷3,50				
t	У _{объедин i}	$\hat{Y}_i$	$(Y_{\text{объедин } i} - \hat{Y}_i)^2$	Y ² _{объедин i}	t	У _{объедин i}	$\hat{Y}_i$	$(Y_{\text{объедин } i} - \hat{Y}_i)^2$	Y ² _{объедин i}	t	У _{объедин i}	$\hat{Y}_i$	$(Y_{\text{объедин } i} - \hat{Y}_i)^2$	Y ² _{объедин i}
2	99,23	98,92	0,0927	9845,73	2	99,52	98,82	0,4907	9904,76	2	99,78	99,55	0,0517	9955,61
3	98,93	98,86	0,0046	9787,12	3	99,06	98,72	0,1161	9813,69	3	99,70	99,50	0,0378	9939,12
4	98,81	98,80	0,0001	9763,96	4	99,03	98,62	0,1676	9807,75	4	99,58	99,45	0,0160	9915,67
5	98,64	98,74	0,0111	9729,47	5	98,67	98,53	0,0197	9735,07	5	99,49	99,40	0,0087	9899,16
6	98,61	98,68	0,0057	9723,60	6	98,57	98,43	0,0189	9715,11	6	99,45	99,35	0,0090	9889,59
7	98,44	98,62	0,0327	9691,23	7	98,33	98,33	0,0000	9669,22	7	99,34	99,30	0,0013	9867,96
8	98,49	98,57	0,0060	9699,96	8	98,19	98,23	0,0013	9642,21	8	99,24	99,25	0,0001	9848,91
9	98,39	98,51	0,0130	9681,10	9	97,97	98,13	0,0257	9598,62	9	99,25	99,20	0,0027	9851,47
10	98,38	98,45	0,0043	9678,94	10	97,91	98,03	0,0158	9586,21	10	99,13	99,15	0,0004	9827,30
11	98,36	98,39	0,0009	9674,48	11	97,64	97,94	0,0862	9534,18	11	98,82	99,10	0,0782	9766,15
12	98,38	98,33	0,0023	9678,07	12	97,67	97,84	0,0302	9538,49	12	98,68	99,05	0,1391	9737,93
13	98,28	98,27	0,0002	9659,66	13	97,47	97,74	0,0733	9500,47	13	98,85	99,00	0,0252	9770,44
14	98,28	98,21	0,0040	9658,01	14	97,31	97,64	0,1124	9468,87	14	98,91	98,95	0,0020	9783,32
15	98,14	98,15	0,0001	9632,12	15	97,11	97,55	0,1870	9431,00	15	98,93	98,91	0,0005	9786,74
16	98,14	98,09	0,0019	9631,05	16	97,23	97,45	0,0458	9454,49	16	98,86	98,86	0,0000	9772,97
17	98,12	98,03	0,0071	9627,32	17	96,99	97,35	0,1303	9407,05	17	98,83	98,81	0,0006	9767,77
18	98,07	97,98	0,0095	9618,41	18	97,17	97,25	0,0072	9441,72	18	98,82	98,76	0,0038	9765,19
19	98,07	97,92	0,0244	9618,44	19	97,00	97,16	0,0242	9409,17	19	98,68	98,71	0,0008	9737,53
20	98,01	97,86	0,0229	9605,92	20	97,13	97,06	0,0046	9433,70	20	98,72	98,66	0,0041	9746,19
21	97,85	97,80	0,0022	9574,04	21	96,92	96,96	0,0015	9394,26	21	98,60	98,61	0,0002	9721,14
22	97,71	97,74	0,0012	9546,50	22	97,04	96,87	0,0323	9417,73	22	98,65	98,56	0,0086	9732,37
23	97,57	97,68	0,0122	9520,30	23	96,87	96,77	0,0107	9384,18	23	98,44	98,51	0,0044	9691,21
24	97,52	97,62	0,0111	9509,87	24	97,03	96,67	0,1273	9414,55	24	98,49	98,46	0,0009	9700,58
25	97,43	97,57	0,0180	9492,87	25	96,91	96,58	0,1125	9391,66	25	98,35	98,41	0,0037	9673,01
Сумма			0,2883	231648	Сумма			1,8411	229094	Сумма			0,4000	235147
K _T			0,0011		K _T			0,0028		K _T			0,0013	

Определение коэффициентов детерминации уравнений регрессии

Диапазон напряжений 4,05÷3,00					Диапазон напряжений 4,05÷3,25					Диапазон напряжений 4,05÷3,50				
t	Уобъедин i	$\hat{Y}_i$	$(\text{Уобъедин } i - \hat{Y}_i)^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	t	Уобъедин i	$\hat{Y}_i$	$(\text{Уобъедин } i - \hat{Y}_i)^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	t	Уобъедин i	$\hat{Y}_i$	$(\text{Уобъедин } i - \hat{Y}_i)^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
2	98,41	97,67	0,5395	2,2928	2	99,07	98,43	0,4029	3,3645	2	99,25	98,57	0,4534	2,4034
3	97,98	97,60	0,1436	1,1887	3	98,97	98,32	0,4189	3,0225	3	98,86	98,49	0,1351	1,3589
4	97,65	97,54	0,0123	0,5683	4	98,56	98,22	0,1148	1,7479	4	98,58	98,41	0,0287	0,7897
5	97,47	97,47	0,0000	0,3297	5	98,19	98,11	0,0058	0,9053	5	98,42	98,34	0,0065	0,5200
6	97,24	97,40	0,0266	0,1180	6	98,07	98,00	0,0050	0,7020	6	98,24	98,26	0,0004	0,2930
7	97,10	97,33	0,0553	0,0413	7	97,85	97,89	0,0023	0,3744	7	98,11	98,18	0,0047	0,1722
8	96,99	97,26	0,0776	0,0084	8	97,75	97,79	0,0010	0,2712	8	97,94	98,10	0,0242	0,0622
9	96,99	97,20	0,0417	0,0096	9	97,49	97,68	0,0340	0,0677	9	97,85	98,02	0,0311	0,0226
10	97,00	97,13	0,0171	0,0107	10	97,42	97,57	0,0215	0,0363	10	97,79	97,94	0,0224	0,0097
11	96,99	97,06	0,0055	0,0085	11	97,21	97,46	0,0631	0,0005	11	97,72	97,86	0,0225	0,0004
12	96,84	96,99	0,0226	0,0027	12	97,10	97,36	0,0669	0,0185	12	97,64	97,79	0,0221	0,0033
13	96,84	96,92	0,0064	0,0025	13	96,83	97,25	0,1749	0,1620	13	97,52	97,71	0,0370	0,0321
14	96,73	96,86	0,0165	0,0275	14	96,88	97,14	0,0680	0,1240	14	97,53	97,63	0,0107	0,0284
15	96,72	96,79	0,0051	0,0311	15	96,88	97,04	0,0257	0,1284	15	97,48	97,55	0,0056	0,0475
16	96,65	96,72	0,0055	0,0611	16	96,78	96,93	0,0216	0,2041	16	97,39	97,47	0,0064	0,0905
17	96,59	96,65	0,0039	0,0919	17	96,73	96,82	0,0087	0,2545	17	97,39	97,40	0,0001	0,0956
18	96,47	96,59	0,0130	0,1781	18	96,90	96,72	0,0342	0,1107	18	97,31	97,32	0,0001	0,1486
19	96,51	96,52	0,0000	0,1464	19	96,70	96,61	0,0076	0,2883	19	97,32	97,24	0,0060	0,1423
20	96,44	96,45	0,0001	0,2057	20	96,47	96,50	0,0010	0,5793	20	97,16	97,16	0,0000	0,2814
21	96,45	96,38	0,0049	0,1941	21	96,46	96,40	0,0038	0,6008	21	97,17	97,09	0,0077	0,2725
22	96,41	96,32	0,0088	0,2348	22	96,37	96,29	0,0065	0,7426	22	97,09	97,01	0,0062	0,3709
23	96,33	96,25	0,0073	0,3137	23	96,44	96,19	0,0672	0,6226	23	97,05	96,93	0,0142	0,4176
24	96,34	96,18	0,0247	0,3089	24	96,26	96,08	0,0339	0,9408	24	97,01	96,85	0,0241	0,4727
25	96,32	96,11	0,0435	0,3269	25	96,22	95,97	0,0600	1,0296	25	96,89	96,78	0,0122	0,6554
Σ	2325,4	2325,4	1,0814	6,7014	Σ	2333,7	2332,8	1,6489	16,2983	Σ	2344,7	2344,1	0,8813	8,6906
$\bar{y}$	96,89				$\bar{y}$	97,23				$\bar{y}$	97,70			
R^2	0,84				R^2	0,90				R^2	0,90			

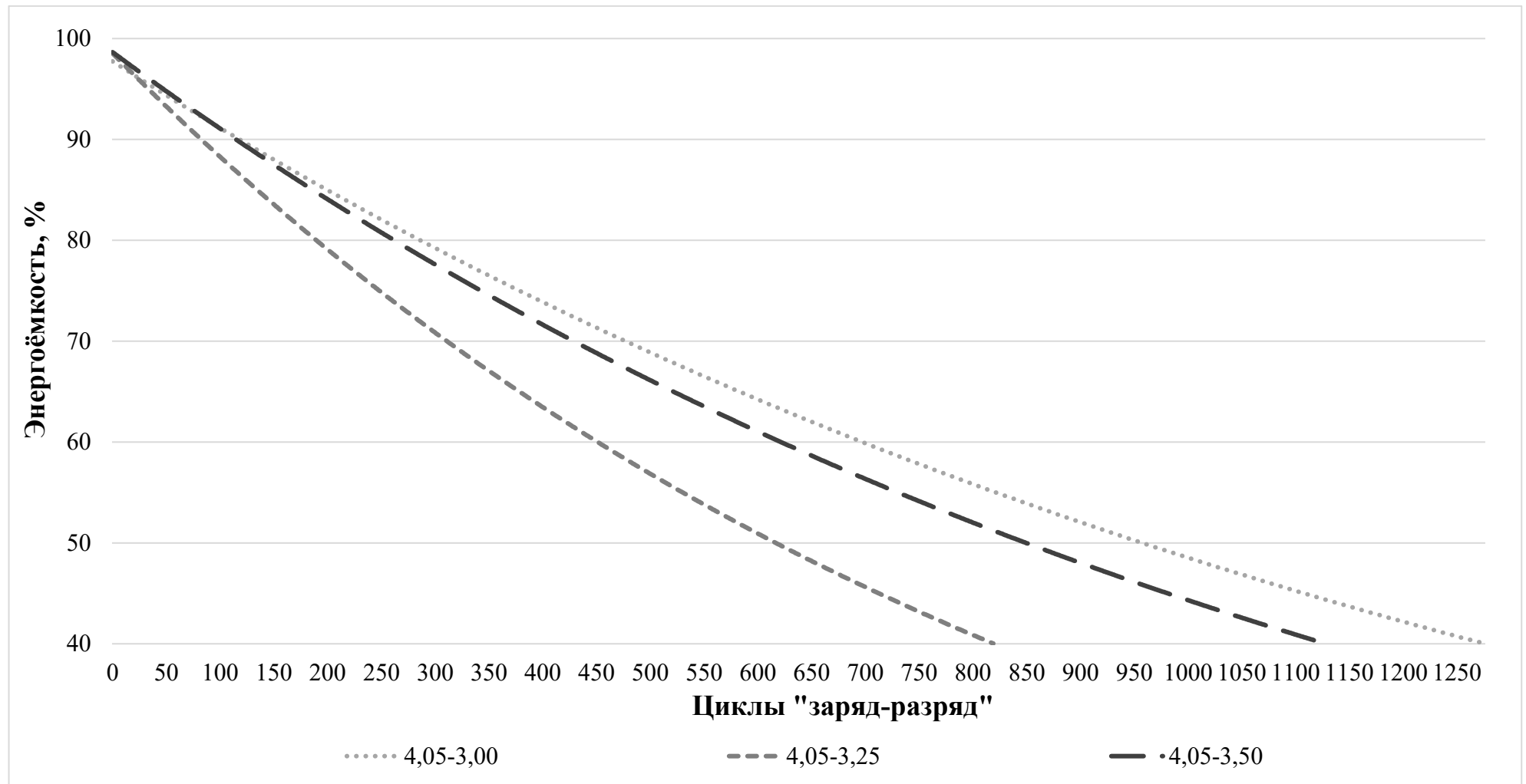
Определение коэффициентов детерминации уравнений регрессии

Диапазон напряжений 4,10÷3,00					Диапазон напряжений 4,10÷3,25					Диапазон напряжений 4,10÷3,50				
t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	$(\text{Уобъедин } i - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	$(\text{Уобъедин } i - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	$(\text{Уобъедин } i - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
2	99,61	99,50	0,0128	0,4714	1	100,00	100,07	0,0049	0,2831	2	99,80	99,60	0,0397	0,5930
3	99,56	99,45	0,0121	0,4015	2	99,79	100,02	0,0532	0,1033	3	99,72	99,55	0,0284	0,4752
4	99,46	99,40	0,0039	0,2878	3	99,79	99,97	0,0320	0,1044	4	99,61	99,50	0,0123	0,3387
5	99,31	99,35	0,0018	0,1455	4	99,83	99,92	0,0073	0,1344	5	99,36	99,45	0,0075	0,1121
6	99,24	99,30	0,0034	0,0998	5	99,87	99,87	0,0000	0,1592	6	99,41	99,40	0,0002	0,1480
7	99,22	99,25	0,0012	0,0842	6	99,88	99,82	0,0031	0,1661	7	99,34	99,35	0,0002	0,0955
8	99,15	99,20	0,0030	0,0487	7	99,85	99,77	0,0063	0,1459	8	99,23	99,30	0,0050	0,0408
9	99,10	99,15	0,0033	0,0283	8	99,84	99,72	0,0140	0,1373	9	99,18	99,25	0,0049	0,0232
10	99,03	99,10	0,0052	0,0109	9	99,79	99,67	0,0143	0,1038	10	99,03	99,20	0,0285	0,0000
11	99,02	99,05	0,0012	0,0086	10	99,79	99,62	0,0297	0,1057	11	99,09	99,15	0,0042	0,0035
12	98,97	99,00	0,0009	0,0022	11	99,72	99,57	0,0231	0,0649	12	99,02	99,10	0,0067	0,0001
13	98,91	98,95	0,0022	0,0004	12	99,68	99,52	0,0241	0,0434	13	99,03	99,05	0,0005	0,0000
14	98,93	98,91	0,0008	0,0000	13	99,50	99,47	0,0007	0,0009	14	98,99	99,00	0,0004	0,0019
15	98,79	98,86	0,0037	0,0175	14	99,53	99,42	0,0120	0,0040	15	98,93	98,96	0,0007	0,0103
16	98,78	98,81	0,0008	0,0221	15	99,33	99,37	0,0019	0,0193	16	98,87	98,91	0,0010	0,0242
17	98,69	98,76	0,0043	0,0554	16	99,29	99,32	0,0010	0,0313	17	98,84	98,86	0,0002	0,0351
18	98,73	98,71	0,0004	0,0399	17	99,10	99,27	0,0290	0,1338	18	98,76	98,81	0,0024	0,0741
19	98,67	98,66	0,0003	0,0638	18	99,04	99,22	0,0318	0,1792	19	98,78	98,76	0,0003	0,0645
20	98,67	98,61	0,0033	0,0680	19	99,16	99,17	0,0001	0,0929	20	98,70	98,71	0,0001	0,1085
21	98,58	98,56	0,0006	0,1177	20	99,11	99,12	0,0001	0,1254	21	98,69	98,66	0,0008	0,1178
22	98,51	98,51	0,0000	0,1744	21	99,07	99,07	0,0000	0,1597	22	98,54	98,61	0,0044	0,2370
23	98,51	98,46	0,0024	0,1740	22	99,06	99,02	0,0016	0,1629	23	98,63	98,56	0,0052	0,1578
24	98,45	98,41	0,0012	0,2304	23	98,93	98,98	0,0017	0,2848	24	98,58	98,51	0,0053	0,1990
25	98,35	98,36	0,0002	0,3336	24	98,86	98,93	0,0045	0,3716	25	98,57	98,46	0,0109	0,2150
Σ	2374,25	2374,33	0,0689	2,8862	25	98,87	98,88	0,0000	0,3554	Σ	2376,71	2376,72	0,1698	3,0755
$\bar{y}$	98,93				Σ	2486,70	2486,80	0,2964	3,472892	$\bar{y}$	99,03			
R^2	0,98				$\bar{y}$	99,47				R^2	0,94			
					R^2	0,91								

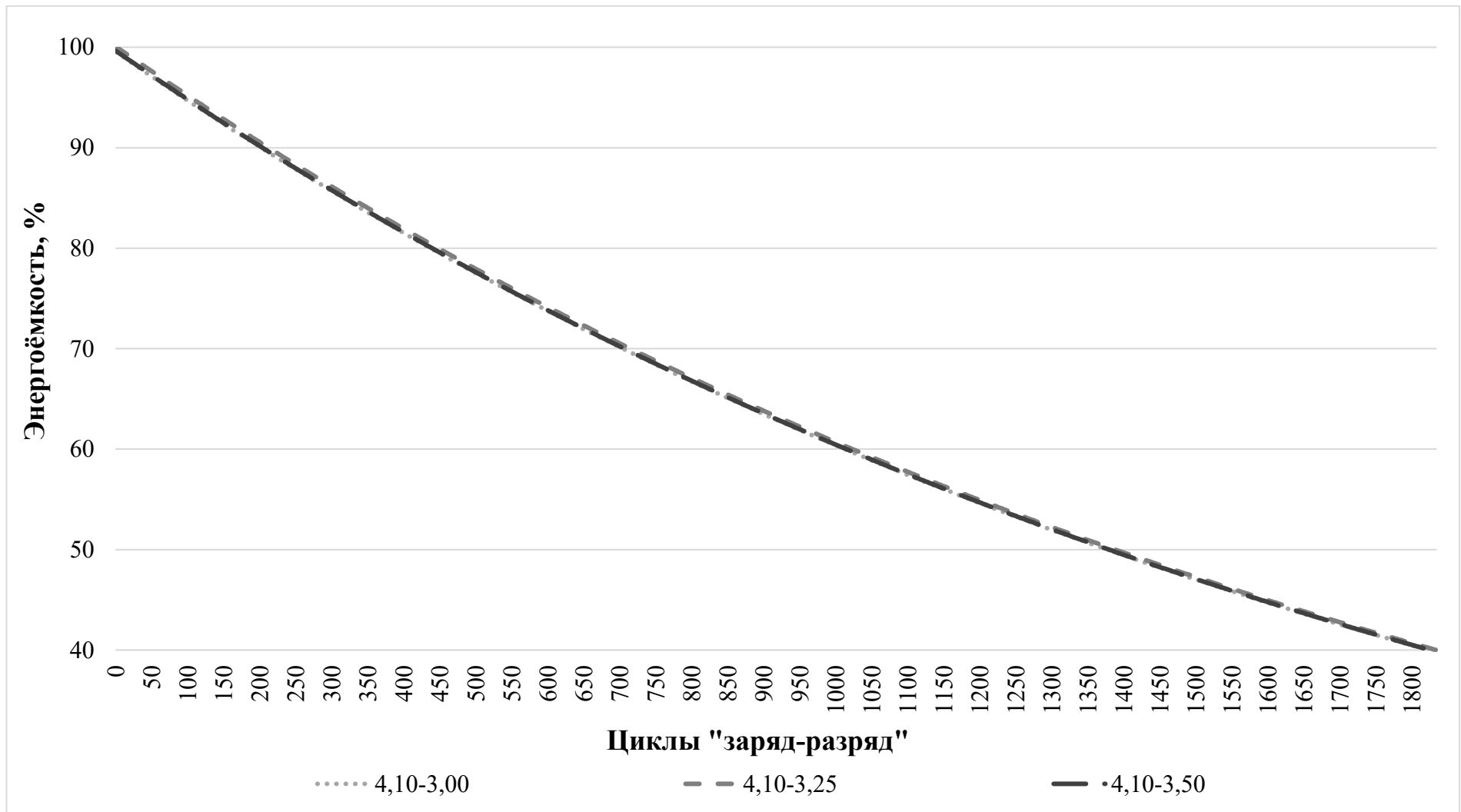
Определение коэффициентов детерминации уравнений регрессии

Диапазон напряжений 4,15÷3,00					Диапазон напряжений 4,15÷3,25					Диапазон напряжений 4,15÷3,50				
t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	$(y_{объедин i} - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	$(y_{объедин i} - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	t	Уобъедин i	$\hat{y}_i$	$(y_{объедин i} - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
2	99,23	98,92	0,0927	0,9643	2	99,52	98,82	0,4907	3,3278	2	99,78	99,55	0,0517	0,6316
3	98,93	98,86	0,0046	0,4709	3	99,06	98,72	0,1161	1,8649	3	99,70	99,50	0,0378	0,5071
4	98,81	98,80	0,0001	0,3238	4	99,03	98,62	0,1676	1,7839	4	99,58	99,45	0,0160	0,3533
5	98,64	98,74	0,0111	0,1555	5	98,67	98,53	0,0197	0,9371	5	99,49	99,40	0,0087	0,2616
6	98,61	98,68	0,0057	0,1330	6	98,57	98,43	0,0189	0,7514	6	99,45	99,35	0,0090	0,2147
7	98,44	98,62	0,0327	0,0401	7	98,33	98,33	0,0000	0,4017	7	99,34	99,30	0,0013	0,1257
8	98,49	98,57	0,0060	0,0599	8	98,19	98,23	0,0013	0,2463	8	99,24	99,25	0,0001	0,0669
9	98,39	98,51	0,0130	0,0222	9	97,97	98,13	0,0257	0,0751	9	99,25	99,20	0,0027	0,0737
10	98,38	98,45	0,0043	0,0190	10	97,91	98,03	0,0158	0,0444	10	99,13	99,15	0,0004	0,0224
11	98,36	98,39	0,0009	0,0133	11	97,64	97,94	0,0862	0,0031	11	98,82	99,10	0,0782	0,0253
12	98,38	98,33	0,0023	0,0178	12	97,67	97,84	0,0302	0,0011	12	98,68	99,05	0,1391	0,0913
13	98,28	98,27	0,0002	0,0016	13	97,47	97,74	0,0733	0,0520	13	98,85	99,00	0,0252	0,0189
14	98,28	98,21	0,0040	0,0010	14	97,31	97,64	0,1124	0,1523	14	98,91	98,95	0,0020	0,0052
15	98,14	98,15	0,0001	0,0101	15	97,11	97,55	0,1870	0,3423	15	98,93	98,91	0,0005	0,0030
16	98,14	98,09	0,0019	0,0112	16	97,23	97,45	0,0458	0,2155	16	98,86	98,86	0,0000	0,0156
17	98,12	98,03	0,0071	0,0156	17	96,99	97,35	0,1303	0,5019	17	98,83	98,81	0,0006	0,0228
18	98,07	97,98	0,0095	0,0290	18	97,17	97,25	0,0072	0,2808	18	98,82	98,76	0,0038	0,0269
19	98,07	97,92	0,0244	0,0289	19	97,00	97,16	0,0242	0,4865	19	98,68	98,71	0,0008	0,0925
20	98,01	97,86	0,0229	0,0547	20	97,13	97,06	0,0046	0,3263	20	98,72	98,66	0,0041	0,0678
21	97,85	97,80	0,0022	0,1573	21	96,92	96,96	0,0015	0,5998	21	98,60	98,61	0,0002	0,1499
22	97,71	97,74	0,0012	0,2889	22	97,04	96,87	0,0323	0,4270	22	98,65	98,56	0,0086	0,1091
23	97,57	97,68	0,0122	0,4511	23	96,87	96,77	0,0107	0,6830	23	98,44	98,51	0,0044	0,2906
24	97,52	97,62	0,0111	0,5258	24	97,03	96,67	0,1273	0,4486	24	98,49	98,46	0,0009	0,2416
25	97,43	97,57	0,0180	0,6598	25	96,91	96,58	0,1125	0,6207	25	98,35	98,41	0,0037	0,3989
Σ	2357,85	2357,80	0,2883	4,4548	Σ	2344,76	2344,67	1,8411	14,5737	Σ	2375,59	2375,53	0,4000	3,8165
$\bar{y}$	98,24				$\bar{y}$	97,70				$\bar{y}$	98,98			
R^2	0,94				R^2	0,87				R^2	0,90			

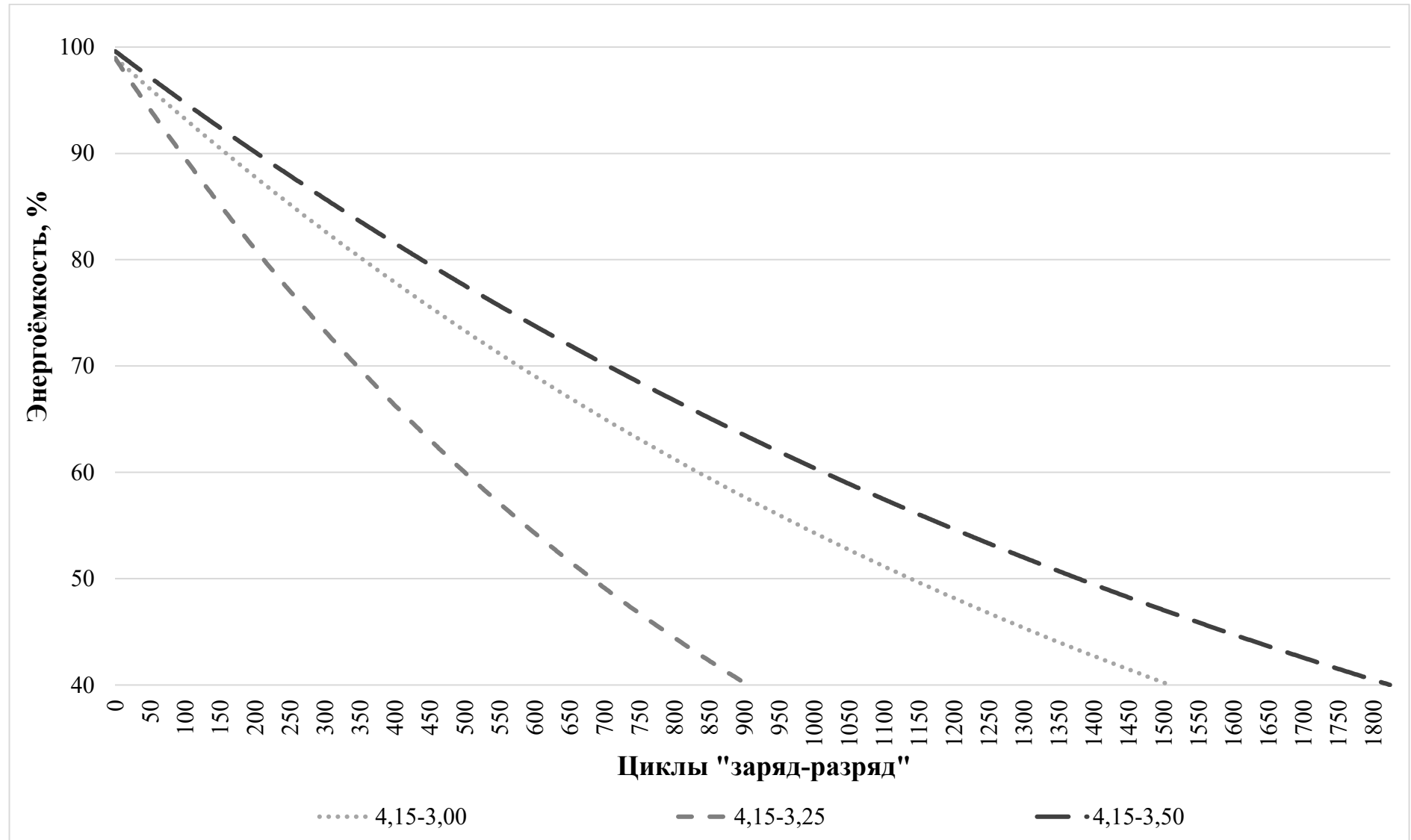
Графики прогноза снижения энергоёмкости плеч аккумуляторных модулей



Графики прогноза снижения энергоёмкости плеч аккумуляторных модулей



Графики прогноза снижения энергоёмкости плеч аккумуляторных модулей



Расчёт КПД циклов «заряд-разряд» при различных диапазонах рабочих напряжений

№ цикла	4,05-3,00						4,05-3,25						4,05-3,50					
	Плечо №1			Плечо №2			Плечо №1			Плечо №2			Плечо №1			Плечо №2		
	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %
2	101,08	96,55	95,52	105,96	101,24	95,55	100,32	96,18	95,87	101,08	96,98	95,94	101,83	98,05	96,29	96,62	92,92	96,17
3	100,76	96,16	95,43	105,48	100,77	95,53	100,61	96,15	95,57	101,20	96,83	95,68	101,54	97,67	96,19	96,33	92,56	96,09
4	100,63	95,81	95,21	105,13	100,45	95,55	100,01	95,67	95,66	100,80	96,49	95,72	101,24	97,39	96,20	95,93	92,31	96,23
5	100,32	95,63	95,32	105,04	100,27	95,46	99,53	95,24	95,69	100,42	96,19	95,79	101,10	97,24	96,18	95,78	92,13	96,19
6	100,18	95,36	95,19	104,79	100,09	95,51	99,27	95,05	95,75	100,50	96,15	95,67	100,83	97,05	96,25	95,61	91,98	96,20
7	100,05	95,28	95,23	104,51	99,87	95,56	99,17	94,93	95,72	100,08	95,84	95,76	100,86	96,98	96,15	95,50	91,78	96,10
8	99,71	95,19	95,47	104,54	99,73	95,40	99,07	94,82	95,71	100,02	95,77	95,75	100,66	96,82	96,19	95,21	91,62	96,23
9	99,83	95,27	95,43	104,49	99,64	95,36	98,78	94,55	95,72	99,73	95,53	95,79	100,57	96,74	96,19	95,15	91,5	96,16
10	99,96	95,31	95,35	104,43	99,60	95,37	98,64	94,44	95,74	99,69	95,50	95,80	100,51	96,71	96,22	95,03	91,42	96,20
11	99,94	95,29	95,35	104,45	99,60	95,36	98,57	94,36	95,73	99,48	95,18	95,68	100,42	96,63	96,23	95,00	91,35	96,16
12	99,75	95,15	95,39	104,18	99,45	95,46	98,53	94,28	95,69	99,56	95,04	95,46	100,45	96,64	96,21	94,88	91,15	96,07
13	99,83	95,20	95,36	104,20	99,39	95,38	97,77	93,83	95,97	99,01	94,95	95,90	100,37	96,53	96,17	94,52	91,02	96,30
14	99,52	95,01	95,47	104,18	99,37	95,38	98,22	93,99	95,69	98,98	94,90	95,88	100,23	96,46	96,24	94,73	91,15	96,22
15	99,69	95,06	95,36	104,09	99,28	95,38	98,08	93,91	95,75	99,14	94,96	95,78	100,18	96,38	96,21	94,77	91,15	96,18
16	99,69	94,95	95,25	103,99	99,26	95,45	98,05	93,84	95,71	98,95	94,85	95,86	100,15	96,34	96,20	94,59	91,01	96,22
17	99,53	94,92	95,37	103,95	99,17	95,40	97,94	93,72	95,69	99,03	94,86	95,79	100,20	96,38	96,19	94,49	90,93	96,23
18	99,32	94,71	95,36	103,94	99,17	95,41	98,25	94,03	95,70	99,14	94,90	95,72	100,02	96,23	96,21	94,59	90,97	96,17
19	99,41	94,81	95,37	103,97	99,13	95,34	97,95	93,72	95,68	99,03	94,80	95,73	100,08	96,27	96,19	94,57	90,93	96,15
20	99,26	94,70	95,41	103,81	99,11	95,47	97,69	93,57	95,78	98,55	94,52	95,91	99,96	96,15	96,19	94,28	90,74	96,25
21	99,28	94,70	95,39	104,04	99,14	95,29	97,62	93,53	95,81	98,59	94,53	95,88	100,01	96,13	96,12	94,40	90,79	96,18
22	99,20	94,63	95,39	103,91	99,13	95,40	97,72	93,53	95,71	98,35	94,37	95,95	99,82	96,07	96,24	94,26	90,67	96,19
23	99,08	94,55	95,43	103,88	99,06	95,36	97,67	93,49	95,72	98,70	94,54	95,79	99,79	96,03	96,23	94,22	90,64	96,20
24	99,13	94,55	95,38	103,76	99,07	95,48	97,79	93,34	95,45	98,40	94,34	95,87	99,75	95,99	96,23	94,13	90,6	96,25
25	99,10	94,56	95,42	103,87	99,02	95,33	97,53	93,46	95,83	98,10	94,15	95,97	99,60	95,88	96,27	94,00	90,47	96,24
	КПД, %		95,37	КПД, %		95,42	КПД, %		95,72	КПД, %		95,80	КПД, %		96,21	КПД, %		96,19
	<i>s</i>		0,0817	<i>s</i>		0,0762	<i>s</i>		0,0972	<i>s</i>		0,1142	<i>s</i>		0,0362	<i>s</i>		0,0530

Расчёт КПД циклов «заряд-разряд» при различных диапазонах рабочих напряжений

№ цикла	4,10-3,00						4,10-3,25						4,10-3,50					
	Плечо №1			Плечо №2			Плечо №1			Плечо №2			Плечо №1			Плечо №2		
	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %
2	121,23	116,35	95,97	120,88	115,61	95,64	120,1	115,54	96,20	123,55	118,50	95,91	115,91	111,63	96,31	115,89	111,63	96,32
3	121,20	116,26	95,92	120,87	115,58	95,62	120,1	115,48	96,15	123,71	118,58	95,85	115,90	111,56	96,26	115,79	111,52	96,31
4	121,30	116,18	95,78	120,67	115,43	95,66	119,99	115,46	96,22	123,67	118,72	96,00	115,70	111,45	96,33	115,59	111,39	96,37
5	121,01	115,99	95,85	120,39	115,26	95,74	120,16	115,56	96,17	123,66	118,68	95,97	115,43	111,27	96,40	115,34	111,02	96,25
6	120,85	115,89	95,90	120,40	115,21	95,69	120,1	115,57	96,23	123,51	118,69	96,10	115,44	111,27	96,39	115,06	111,13	96,58
7	120,92	115,86	95,82	120,28	115,18	95,76	120,13	115,54	96,18	123,47	118,66	96,10	115,33	111,16	96,38	115,18	111,07	96,43
8	120,80	115,85	95,90	120,04	115,02	95,82	120,02	115,54	96,27	123,36	118,63	96,17	115,10	111,03	96,46	115,07	110,96	96,43
9	120,92	115,77	95,74	120,19	114,98	95,67	119,98	115,47	96,24	123,41	118,59	96,09	115,24	111,00	96,32	115,06	110,88	96,37
10	120,59	115,71	95,95	119,93	114,89	95,80	120,02	115,50	96,23	123,16	118,56	96,27	114,99	110,89	96,43	114,48	110,66	96,66
11	120,72	115,72	95,86	119,94	114,85	95,76	119,8	115,40	96,33	123,15	118,50	96,22	115,00	110,86	96,40	115,01	110,81	96,35
12	120,64	115,70	95,91	119,85	114,76	95,75	119,85	115,31	96,21	123,12	118,49	96,24	114,91	110,78	96,41	114,81	110,74	96,46
13	120,66	115,59	95,80	119,80	114,72	95,76	119,94	115,04	95,91	123,11	118,36	96,14	114,87	110,75	96,41	114,94	110,79	96,39
14	120,70	115,62	95,79	119,84	114,75	95,75	119,48	115,14	96,37	122,77	118,32	96,38	114,91	110,76	96,39	114,79	110,68	96,42
15	120,48	115,42	95,80	119,65	114,63	95,80	119,6	114,89	96,06	122,95	118,10	96,06	114,72	110,66	96,46	114,67	110,65	96,49
16	120,50	115,42	95,78	119,54	114,59	95,86	119,38	114,89	96,24	122,70	118,00	96,17	114,62	110,62	96,51	114,79	110,57	96,32
17	120,41	115,21	95,68	119,56	114,61	95,86	119,41	114,66	96,02	122,62	117,79	96,06	114,64	110,63	96,50	114,54	110,49	96,46
18	120,34	115,37	95,87	119,55	114,52	95,79	119,1	114,77	96,36	121,78	117,50	96,49	114,63	110,53	96,42	114,46	110,4	96,45
19	120,53	115,28	95,64	119,42	114,49	95,87	119,32	114,86	96,26	122,46	117,70	96,11	114,50	110,52	96,52	114,63	110,45	96,35
20	120,41	115,37	95,81	119,32	114,37	95,85	119,31	114,82	96,24	122,29	117,62	96,18	114,41	110,39	96,49	114,47	110,41	96,45
21	120,30	115,17	95,74	119,35	114,39	95,84	119,28	114,78	96,23	122,12	117,55	96,26	114,43	110,40	96,48	114,5	110,37	96,39
22	120,12	115,14	95,85	119,19	114,24	95,85	119,3	114,70	96,14	122,28	117,64	96,21	114,28	110,29	96,51	114,38	110,16	96,31
23	120,24	115,06	95,69	119,41	114,33	95,75	119,21	114,49	96,04	122,31	117,56	96,12	114,49	110,37	96,40	114,28	110,28	96,50
24	120,15	115,02	95,73	119,31	114,22	95,73	119,11	114,37	96,02	122,17	117,51	96,19	114,40	110,29	96,41	114,38	110,25	96,39
25	120,01	114,84	95,69	119,22	114,18	95,77	118,85	114,47	96,31	122,34	117,42	95,98	114,31	110,25	96,45	114,33	110,25	96,43
	КПД, %		95,81	КПД, %		95,77	КПД, %		96,19	КПД, %		96,14	КПД, %		96,42	КПД, %		96,41
	s		0,0899	s		0,0726	s		0,1135	s		0,1412	s		0,0689	s		0,0908

Расчёт КПД циклов «заряд-разряд» при различных диапазонах рабочих напряжений

№ цикла	4,15-3,00						4,15-3,25						4,15-3,50					
	Плечо №1			Плечо №2			Плечо №1			Плечо №2			Плечо №1			Плечо №2		
	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %	Заряд, Вт*ч	Разряд, Вт*ч	КПД, %
2	131,38	124,99	95,14	127,02	120,84	95,13	127,68	121,72	95,33	126,2	120,42	95,42	118,25	113,36	95,86	120,32	115,48	95,98
3	130,86	124,55	95,18	126,69	120,61	95,20	126,99	121,29	95,51	125,65	119,8	95,34	117,98	113,22	95,97	120,22	115,43	96,02
4	130,46	124,37	95,33	126,17	120,53	95,53	126,42	121,10	95,79	125,29	119,84	95,65	117,67	113,08	96,10	120,07	115,30	96,03
5	130,16	124,19	95,41	126,12	120,24	95,34	125,97	120,50	95,66	125,08	119,47	95,51	117,70	113,01	96,02	119,94	115,18	96,03
6	130,21	124,17	95,36	125,80	120,17	95,52	125,50	120,11	95,71	124,8	119,48	95,74	117,72	112,98	95,97	119,89	115,10	96,00
7	129,81	124,02	95,54	125,68	119,86	95,37	125,22	119,64	95,54	124,81	119,29	95,58	117,46	112,81	96,04	119,78	115,02	96,03
8	130,09	124,14	95,43	125,35	119,79	95,56	124,92	119,60	95,74	124,54	119,06	95,60	117,32	112,71	96,07	119,61	114,90	96,06
9	129,81	123,99	95,52	125,55	119,73	95,36	124,76	119,25	95,58	124,32	118,83	95,58	117,42	112,77	96,04	119,59	114,87	96,05
10	129,82	123,99	95,51	125,24	119,69	95,57	124,49	119,30	95,83	124,16	118,69	95,59	117,10	112,57	96,13	119,50	114,79	96,06
11	129,99	124,03	95,42	125,23	119,53	95,45	124,37	118,85	95,56	124,04	118,43	95,48	117,08	112,06	95,71	119,20	114,59	96,13
12	129,99	124,08	95,45	125,02	119,50	95,58	124,15	118,81	95,70	123,86	118,49	95,66	116,53	111,67	95,83	119,43	114,65	96,00
13	129,97	123,96	95,38	125,11	119,39	95,43	123,98	118,50	95,58	123,9	118,29	95,47	116,54	112,11	96,20	119,22	114,59	96,12
14	129,90	123,97	95,43	124,94	119,34	95,52	123,85	118,53	95,70	123,49	117,98	95,54	116,78	112,25	96,12	119,30	114,60	96,06
15	129,83	123,84	95,39	124,86	119,11	95,39	123,66	118,20	95,58	123,41	117,79	95,45	116,85	112,30	96,11	119,25	114,59	96,09
16	129,81	123,84	95,40	124,63	119,09	95,55	123,47	118,28	95,80	123,34	117,97	95,65	116,72	112,19	96,12	119,26	114,54	96,04
17	129,75	123,83	95,44	124,66	119,04	95,49	123,43	117,95	95,56	123,38	117,69	95,39	116,66	112,20	96,18	119,17	114,47	96,06
18	129,68	123,77	95,44	124,52	118,99	95,56	123,29	118,06	95,76	123,37	117,96	95,61	116,70	112,17	96,12	119,07	114,47	96,14
19	129,78	123,76	95,36	124,56	119,01	95,54	123,49	117,99	95,55	123,37	117,69	95,40	116,58	112,14	96,19	118,89	114,18	96,04
20	129,65	123,66	95,38	124,47	118,97	95,58	123,47	118,09	95,64	123,32	117,87	95,58	116,71	112,13	96,08	118,96	114,29	96,07
21	129,42	123,43	95,37	124,41	118,82	95,51	123,35	117,93	95,61	123,16	117,58	95,47	116,70	112,10	96,06	118,86	114,03	95,94
22	129,23	123,20	95,33	124,32	118,75	95,52	123,27	117,93	95,67	123,23	117,8	95,59	116,66	112,10	96,09	118,78	114,16	96,11
23	128,98	123,05	95,40	124,22	118,55	95,44	123,70	117,76	95,20	123,14	117,57	95,48	116,45	111,76	95,97	118,82	114,02	95,96
24	129,02	122,98	95,32	124,00	118,49	95,56	123,90	117,83	95,10	123,18	117,82	95,65	116,23	111,91	96,28	118,63	113,98	96,08
25	128,63	122,81	95,48	124,11	118,50	95,48	123,40	117,70	95,38	123,1	117,67	95,59	116,45	111,87	96,07	118,59	113,70	95,88
	КПД, %		95,39	КПД, %		95,47	КПД, %		95,59	КПД, %		95,54	КПД, %		96,06	КПД, %		96,04
	s		0,0925	s		0,1176	s		0,1817	s		0,1011	s		0,1250	s		0,0618

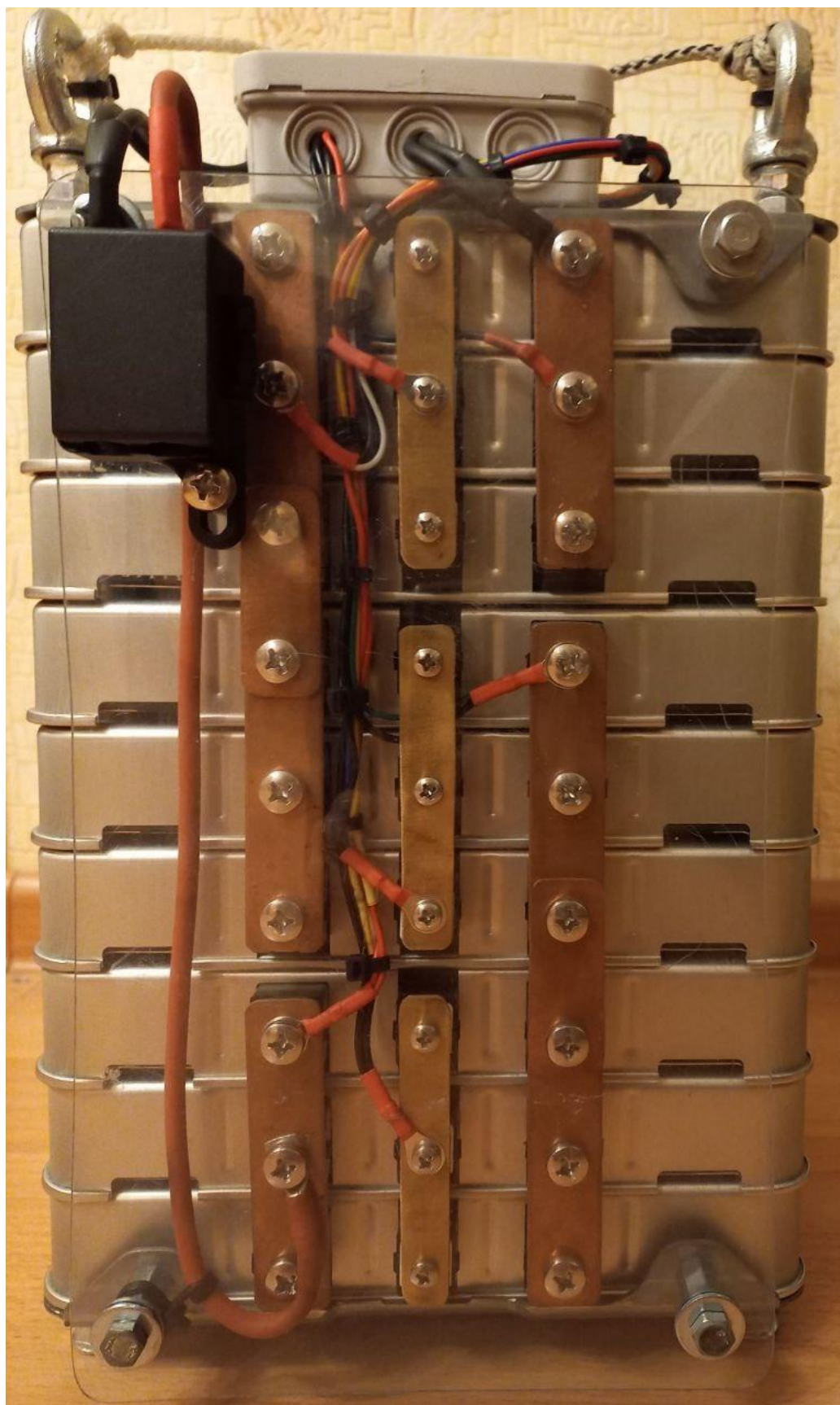
Z-оценки коэффициентов полезного действия циклов «заряд-разряд» плеч аккумуляторных модулей

№ цикла «заряд- разряд»	4,05÷3,00		4,05÷3,25		4,05÷3,50		4,10÷3,00		4,10÷3,25		4,10÷3,50		4,15÷3,00		4,15÷3,25		4,15÷3,50	
	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2	Плечо №1	Плечо №2
2	1,84	1,58	1,55	1,30	2,23	-0,38	1,81	-1,74	0,08	-1,58	-1,61	-0,98	-2,76	-2,82	-1,40	-1,21	-1,52	-1,02
3	0,81	1,44	-1,60	-0,99	-0,51	-1,97	1,25	-1,97	-0,36	-2,00	-2,36	-1,11	-2,31	-2,26	-0,41	-1,96	-0,72	-0,40
4	-1,93	1,62	-0,64	-0,62	-0,28	0,67	-0,37	-1,50	0,27	-0,98	-1,33	-0,51	-0,65	0,54	1,13	1,06	0,35	-0,21
5	-0,53	0,45	-0,34	-0,07	-0,70	-0,03	0,44	-0,38	-0,20	-1,15	-0,32	-1,74	0,23	-1,10	0,39	-0,27	-0,32	-0,14
6	-2,20	1,18	0,27	-1,08	1,21	0,24	0,93	-1,06	0,30	-0,27	-0,44	1,89	-0,33	0,49	0,65	1,92	-0,65	-0,58
7	-1,66	1,78	0,02	-0,28	-1,50	-1,62	0,04	-0,09	-0,13	-0,22	-0,49	0,21	1,60	-0,83	-0,24	0,34	-0,11	-0,23
8	1,21	-0,34	-0,13	-0,39	-0,61	0,73	1,00	0,71	0,65	0,21	0,66	0,17	0,37	0,83	0,85	0,57	0,12	0,35
9	0,78	-0,87	-0,05	-0,06	-0,43	-0,51	-0,79	-1,39	0,41	-0,29	-1,41	-0,50	1,35	-0,87	-0,02	0,41	-0,12	0,21
10	-0,24	-0,66	0,20	0,02	0,33	0,20	1,57	0,43	0,35	0,92	0,24	2,75	1,27	0,87	1,34	0,51	0,61	0,30
11	-0,26	-0,90	0,06	-1,03	0,51	-0,62	0,51	-0,14	1,17	0,63	-0,26	-0,71	0,25	-0,16	-0,14	-0,65	-2,74	1,49
12	0,25	0,46	-0,37	-2,94	-0,01	-2,30	1,04	-0,18	0,16	0,74	-0,18	0,46	0,67	1,00	0,62	1,20	-1,81	-0,69
13	-0,07	-0,54	2,54	0,91	-0,92	2,00	-0,15	-0,09	-2,46	0,04	-0,07	-0,26	-0,17	-0,33	-0,04	-0,70	1,15	1,23
14	1,22	-0,55	-0,30	0,73	0,86	0,57	-0,23	-0,19	1,53	1,70	-0,43	0,07	0,47	0,44	0,65	-0,04	0,53	0,32
15	-0,15	-0,60	0,26	-0,10	-0,01	-0,20	-0,13	0,52	-1,16	-0,57	0,62	0,90	-0,06	-0,61	-0,01	-0,95	0,41	0,84
16	-1,50	0,35	-0,17	0,54	-0,32	0,46	-0,31	1,28	0,40	0,24	1,34	-0,98	0,10	0,75	1,15	1,02	0,51	0,03
17	0,00	-0,31	-0,32	-0,05	-0,54	0,78	-1,45	1,29	-1,51	-0,53	1,22	0,56	0,49	0,21	-0,15	-1,53	0,97	0,26
18	-0,12	-0,19	-0,18	-0,63	0,09	-0,34	0,65	0,36	1,50	2,48	0,07	0,44	0,55	0,78	0,94	0,71	0,51	1,56
19	0,06	-1,05	-0,42	-0,58	-0,39	-0,75	-1,87	1,45	0,60	-0,16	1,54	-0,65	-0,33	0,66	-0,22	-1,45	1,09	-0,03
20	0,46	0,62	0,62	1,01	-0,52	1,03	0,03	1,17	0,38	0,32	0,99	0,44	-0,13	0,97	0,31	0,38	0,17	0,55
21	0,23	-1,77	0,90	0,76	-2,40	-0,28	-0,85	1,07	0,29	0,87	0,87	-0,22	-0,22	0,37	0,11	-0,72	0,03	-1,68
22	0,31	-0,33	-0,11	1,38	0,99	0,01	0,47	1,11	-0,44	0,50	1,31	-1,13	-0,63	0,45	0,45	0,50	0,29	1,14
23	0,73	-0,85	-0,03	-0,09	0,68	0,18	-1,34	-0,28	-1,35	-0,14	-0,24	0,96	0,11	-0,26	-2,14	-0,65	-0,66	-1,30
24	0,14	0,72	-2,81	0,69	0,64	1,11	-0,91	-0,45	-1,53	0,35	-0,16	-0,26	-0,79	0,76	-2,67	1,05	1,83	0,65
25	0,62	-1,24	1,07	1,56	1,59	1,02	-1,33	0,08	1,06	-1,11	0,44	0,20	0,90	0,11	-1,13	0,46	0,10	-2,65

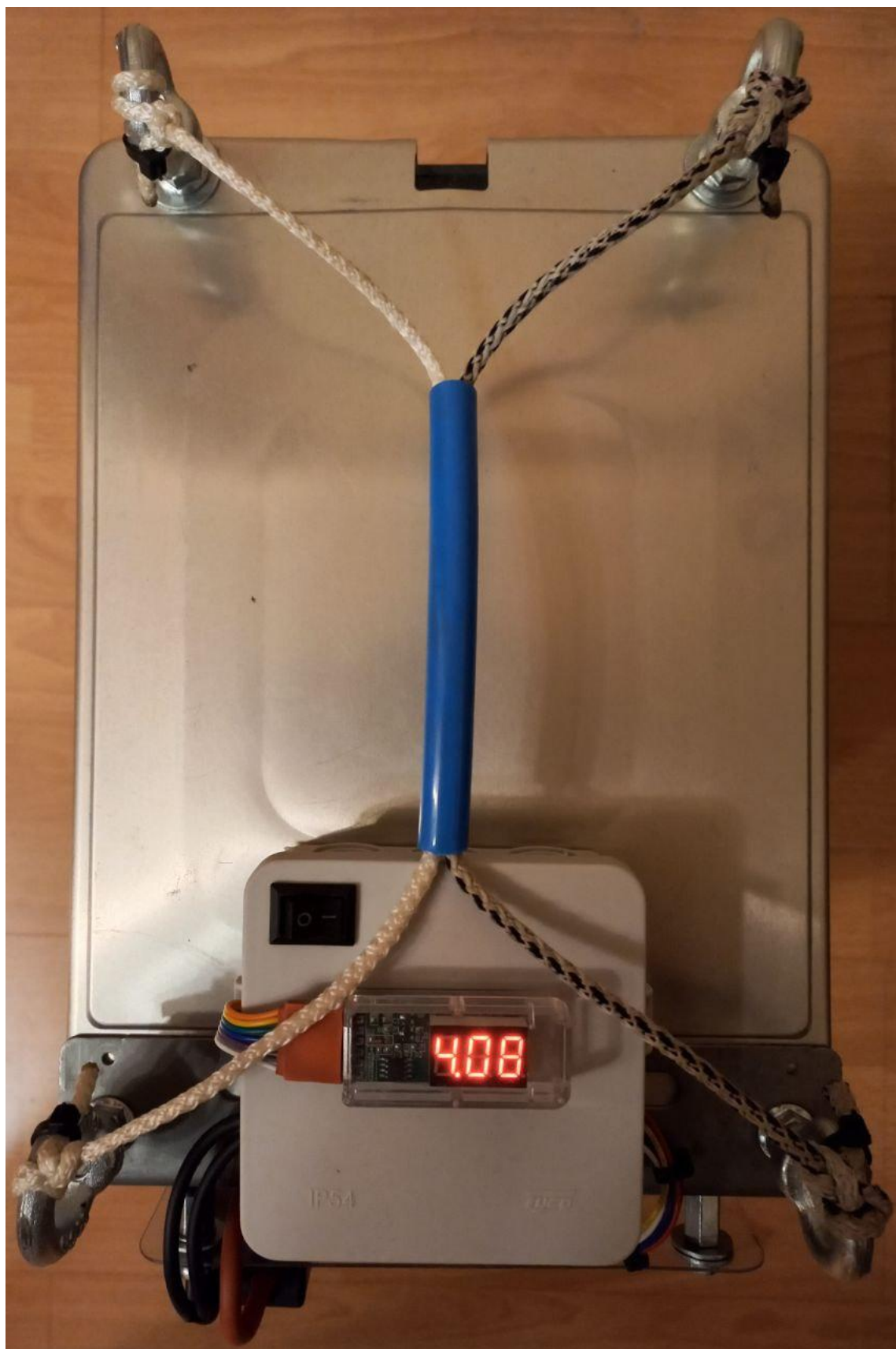
Взвешенные средние значения КПД циклов «заряд-разряд», %

№ цикла	4,05÷3,00	4,05÷3,25	4,05÷3,50	4,10÷3,00	4,10÷3,25	4,10÷3,50	4,15÷3,00	4,15÷3,25	4,15÷3,50
2	95,54	95,90	96,25	95,77	96,09	96,31	95,14	95,40	95,96
3	95,48	95,62	96,16	95,74	96,04	96,28	95,19	95,38	96,01
4	95,39	95,69	96,21	95,71	96,14	96,34	95,41	95,68	96,04
5	95,39	95,73	96,18	95,78	96,09	96,34	95,38	95,55	96,03
6	95,36	95,72	96,24	95,77	96,18	96,46	95,42	95,73	96,00
7	95,41	95,74	96,14	95,78	96,15	96,40	95,47	95,57	96,03
8	95,43	95,73	96,20	95,85	96,23	96,45	95,48	95,63	96,06
9	95,39	95,75	96,18	95,70	96,18	96,34	95,46	95,58	96,05
10	95,36	95,77	96,21	95,86	96,25	96,52	95,53	95,65	96,07
11	95,36	95,71	96,20	95,80	96,29	96,38	95,43	95,50	96,05
12	95,43	95,59	96,16	95,81	96,22	96,42	95,50	95,67	95,96
13	95,37	95,94	96,21	95,77	96,00	96,40	95,40	95,50	96,13
14	95,42	95,77	96,23	95,77	96,37	96,40	95,47	95,58	96,07
15	95,37	95,76	96,20	95,80	96,06	96,47	95,39	95,48	96,09
16	95,36	95,77	96,20	95,83	96,21	96,44	95,46	95,68	96,06
17	95,39	95,73	96,20	95,79	96,04	96,49	95,46	95,43	96,08
18	95,39	95,71	96,20	95,82	96,41	96,43	95,49	95,65	96,13
19	95,35	95,70	96,18	95,78	96,20	96,46	95,43	95,43	96,07
20	95,44	95,84	96,21	95,84	96,21	96,47	95,46	95,60	96,07
21	95,34	95,84	96,14	95,80	96,24	96,45	95,42	95,50	95,96
22	95,40	95,81	96,23	95,85	96,17	96,44	95,40	95,61	96,11
23	95,39	95,75	96,22	95,72	96,07	96,44	95,42	95,41	95,96
24	95,43	95,63	96,24	95,73	96,09	96,40	95,41	95,52	96,12
25	95,37	95,89	96,26	95,74	96,18	96,44	95,48	95,54	95,91
КПД _{взвеш.} , %	95,40	95,75	96,20	95,78	96,17	96,42	95,42	95,55	96,04

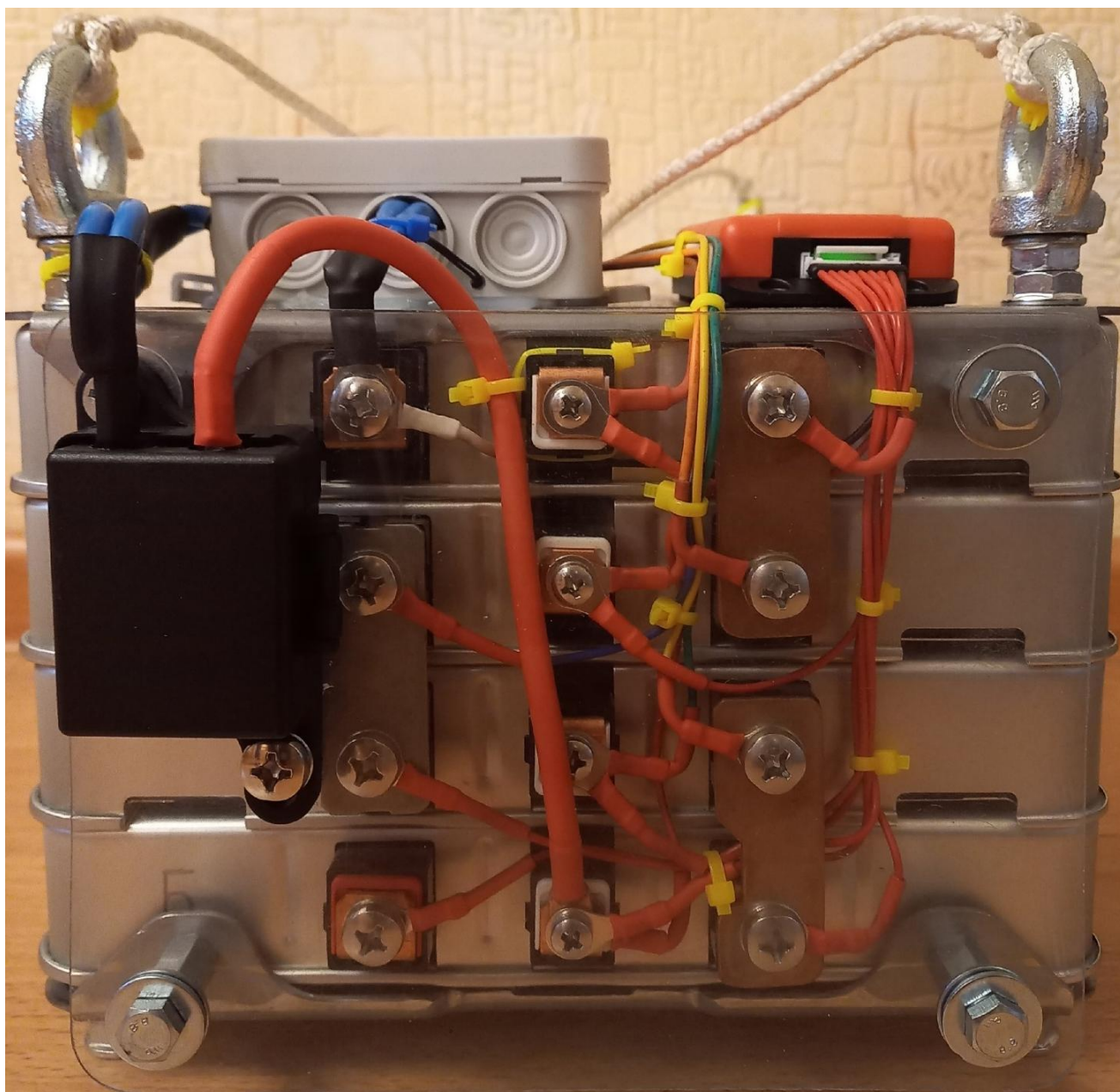
Батарея 6S изготовленная из аккумуляторных модулей



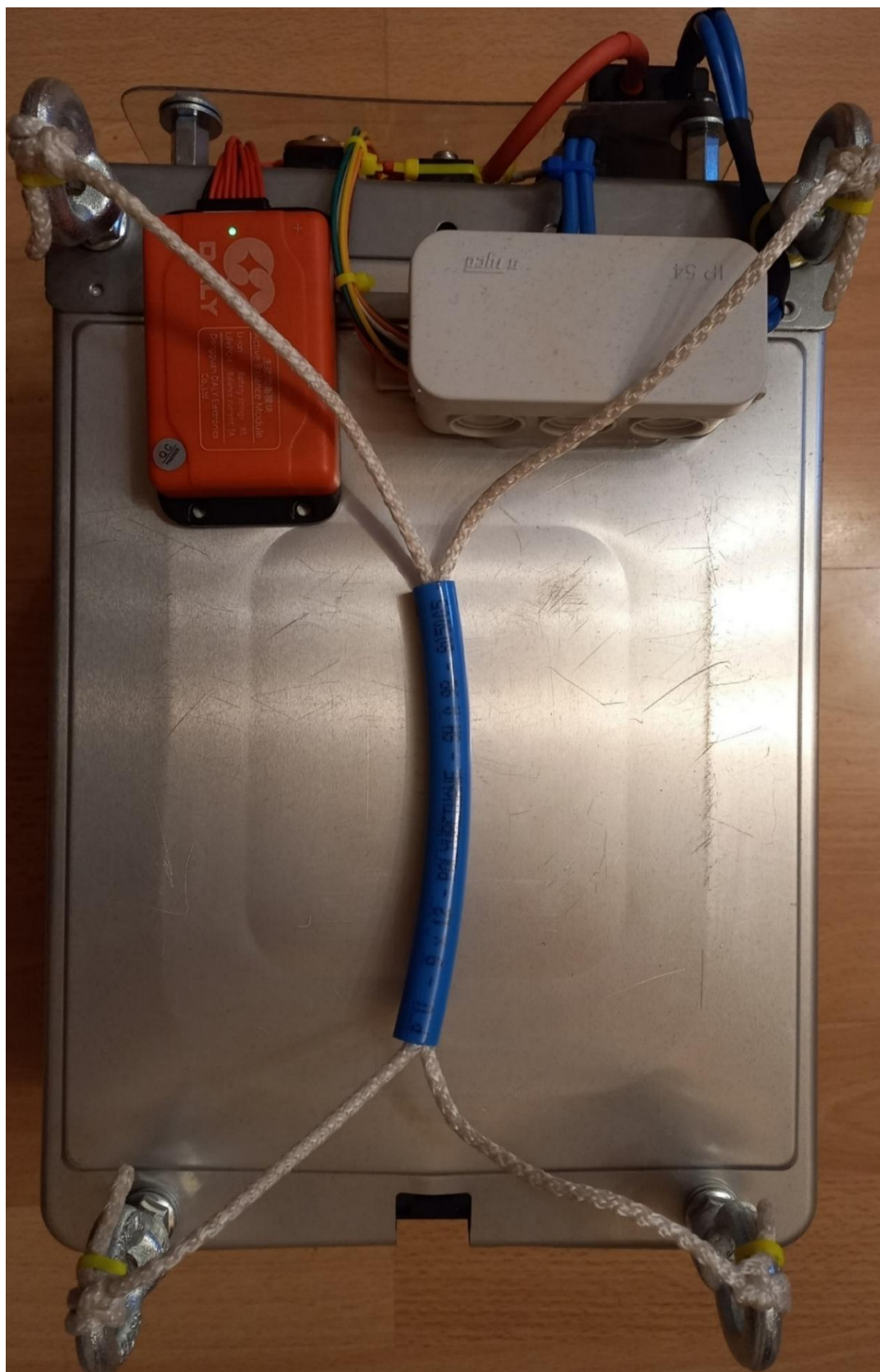
Батарея 6S изготовленная из аккумуляторных модулей



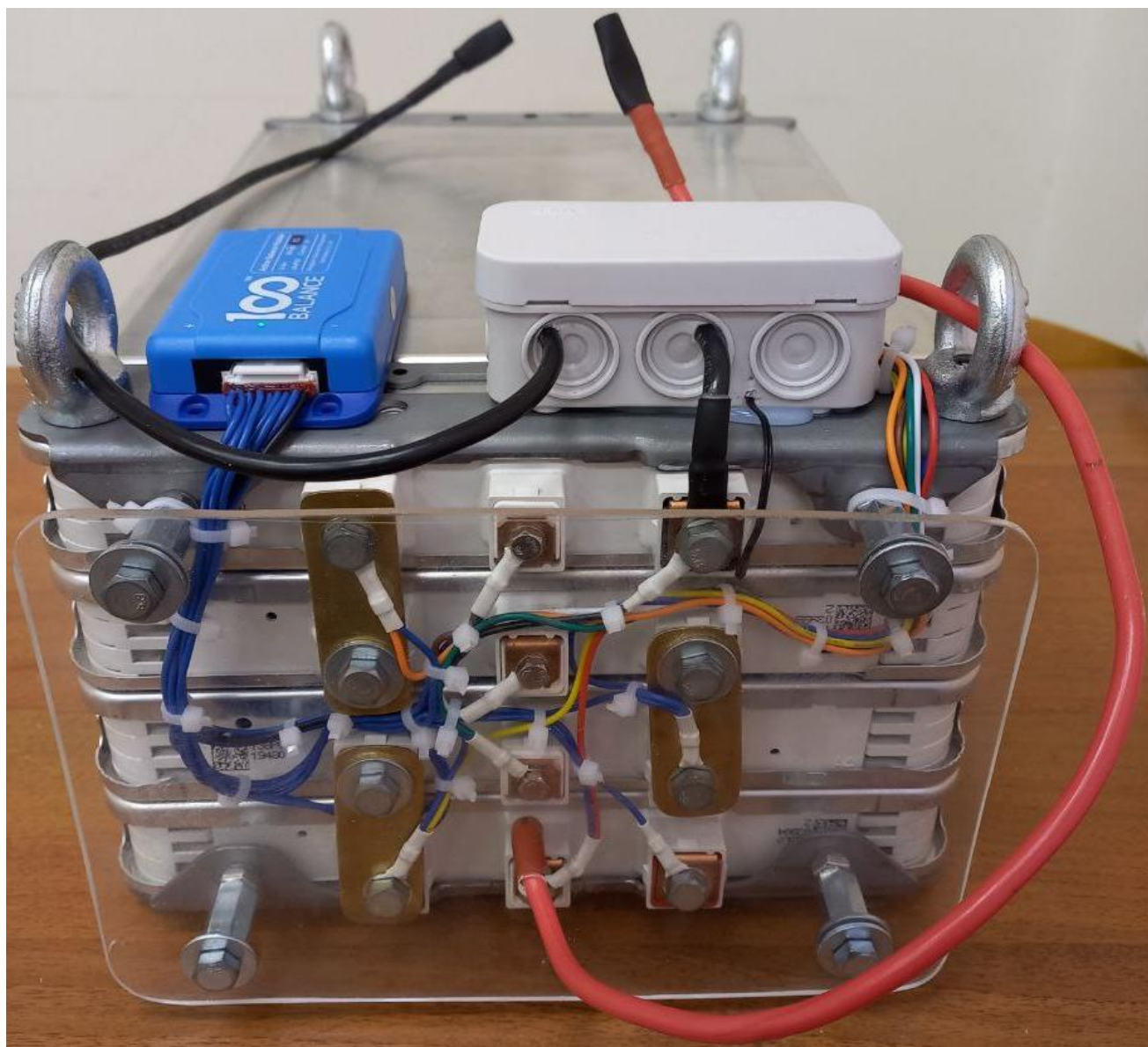
Батарея 7S с балластным плечом изготовленная из аккумуляторных модулей



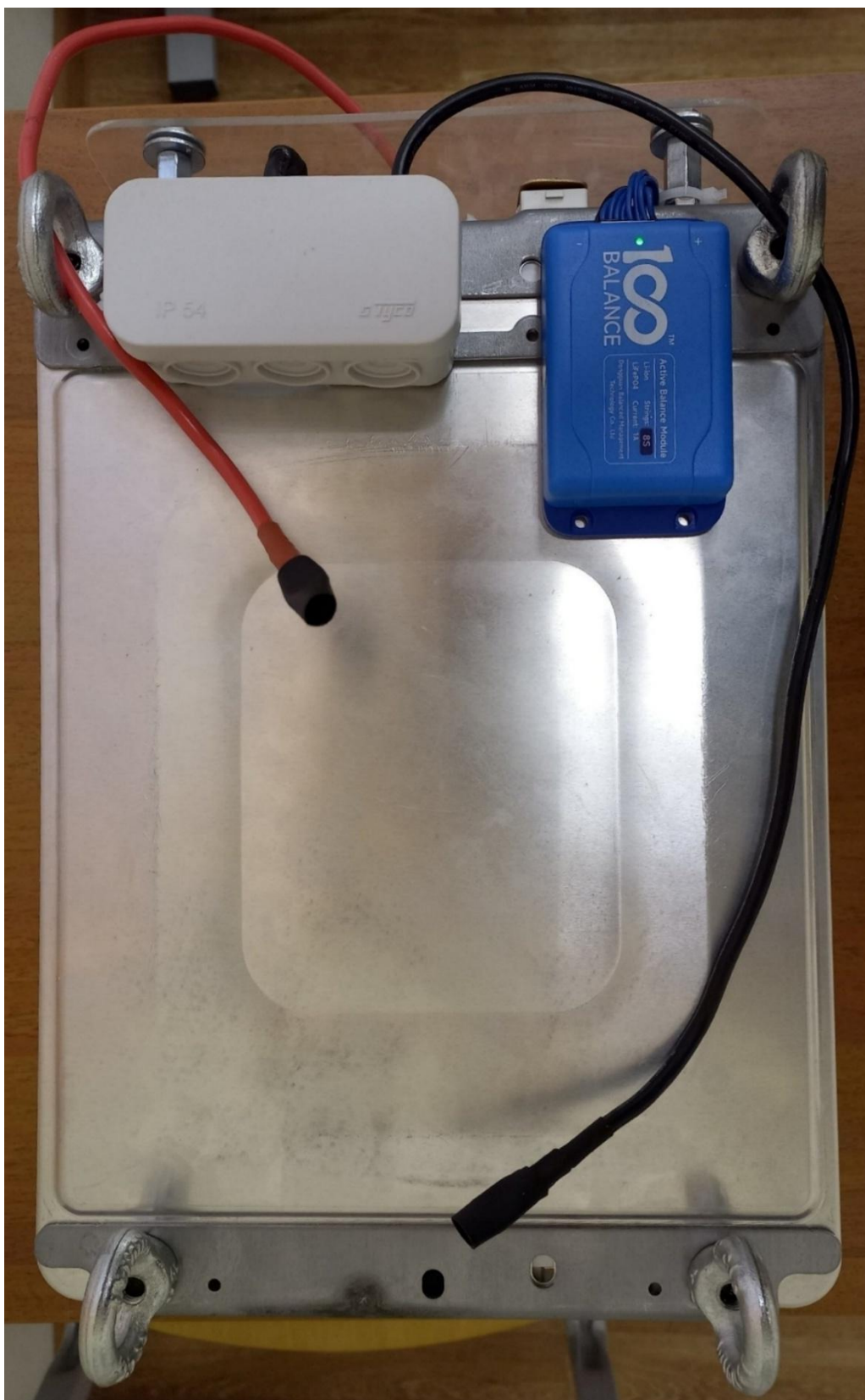
Батарея 7S с балластным плечом изготовленная из аккумуляторных модулей



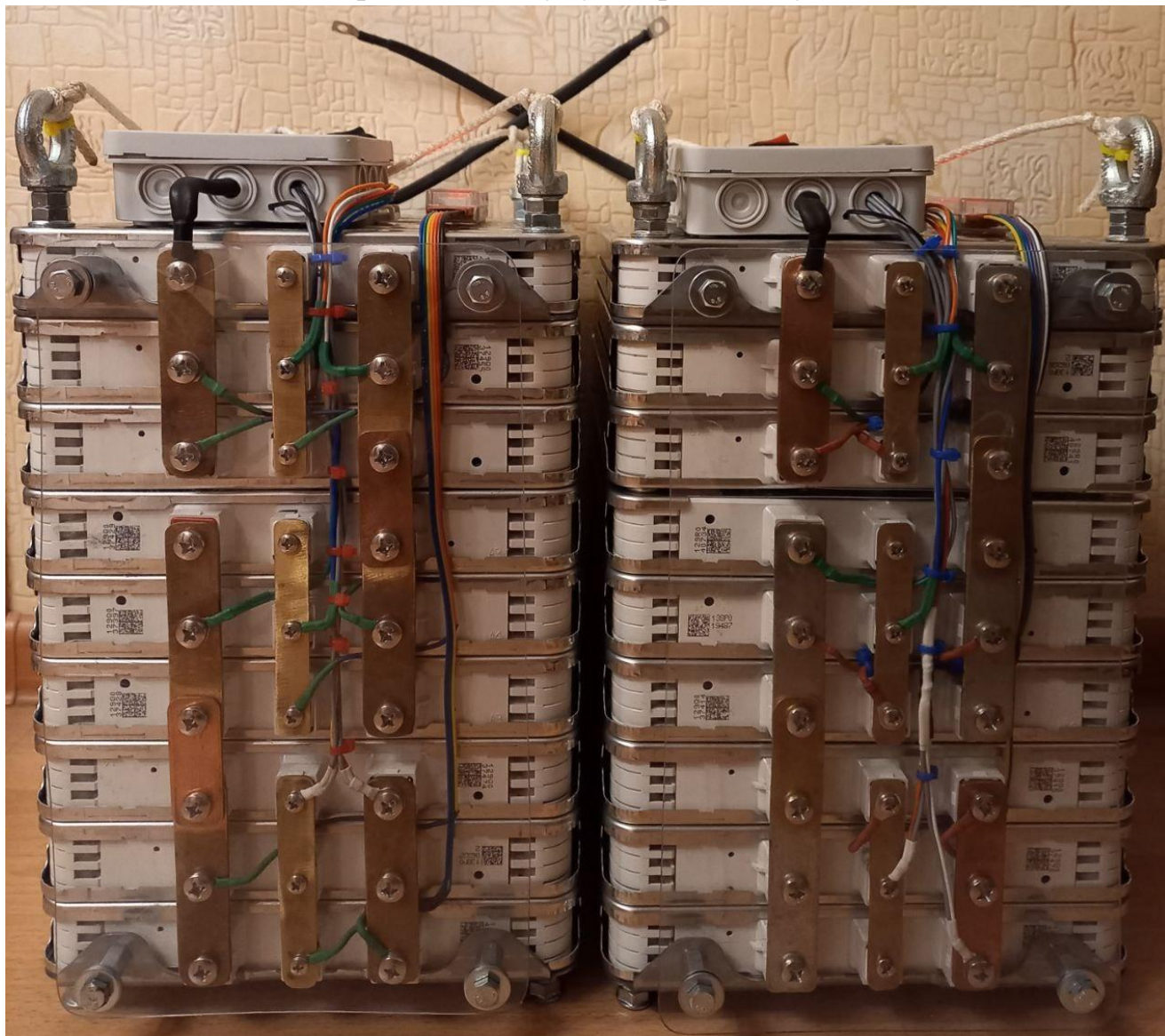
Батарея 7S с балластным плечом изготовленная из аккумуляторных модулей



Батарея 7S с балластным плечом изготовленная из аккумуляторных модулей



Батареи 6S из аккумуляторных модулей



Батареи 6S из аккумуляторных модулей





Закрытое акционерное общество «Тропарёво»

ОГРН 1025003469908, ИНН 5028001885, КПП 502801001, юридический адрес: 143232, Московская Область, Можайский район, г. Можайск, село Тропарёво, ул. Советская 15
тел. +7 (496) 385–28–36, e-mail: tropayovo_pigs@trpagro.ru, <https://zaotroparevo.ru/>

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата
технических наук аспиранта РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева
Карлакова Дмитрия Сергеевича

Компания ЗАО «Тропарёво» использовала результаты исследований, полученные в диссертационной работе Карлакова Дмитрия Сергеевича.

На основании предложенных в диссертации положений были разработаны 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. Предложенные мероприятия были внесены в технологические карты по техническому обслуживанию и текущему ремонту источников бесперебойного питания и аккумуляторных батарей.

Полученные рекомендации позволили повысить энергоэффективность работы источников бесперебойного питания и систем хранения энергии, увеличить время автономной работы оборудования при перебоях в электроснабжении, повысить срок службы аккумуляторных батарей, а также снизить периодичность их замены и связанные с данными мероприятиями сопутствующие финансовые затраты.

Технический директор ЗАО «Тропарёво»



К.И. Степанов



ООО «Авеста +»
 ИНН/КПП 7713773609/771801001, ОГРН 1137746696009,
 Филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО) в г. Москве,
 Р/с 40702810500000070303, К/С 30101810145250000411,
 БИК 044525411

www.avestaplus.ru
 Avesta-77@yandex.ru
 8-495-760-52-37

г. Москва, ул. Сокольнический вал, д. 38 ЭТ 1 ПОМ VII ОФ 2Р

Исх. №58/26 от 14.01.2026 г.

АКТ ПЕРЕДАЧИ И ВНЕДРЕНИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ «КАЛЬКУЛЯТОР ЕМКОСТИ LI-NMC АККУМУЛЯТОРА»

Компания ООО «Авеста+» настоящим Актом подтверждает успешное внедрение программы для ЭВМ «Калькулятор емкости Li-NMC аккумулятора» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: RU 2025665761, заявка № 2025619193), предназначенной для расчета процента от полной ёмкости аккумулятора при работе в заданном пользователем диапазоне напряжений заряда и разряда, а также для вычисления полезной ёмкости аккумулятора при заданной пользователем полной ёмкости и визуализации результатов расчета.

Указанная программа нашла применение при расчете требуемых параметров литий-ионных аккумуляторных батарей для замены штатно установленных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей типа AGM в источниках бесперебойного питания. Применение программы позволило упростить проведение технико-экономического обоснования при выборе типа и параметров накопителей энергии.

Результаты расчетов параметров аккумуляторных батарей, полученных при помощи программы, были использованы на объекте сельскохозяйственного назначения – фермы по производству молока ООО «ТиЭйч – РУС Милк Фуд», что позволило оптимизировать эксплуатационные показатели накопителей электроэнергии.

ООО «Авеста+» более пяти лет осуществляет техническое обслуживание системы бесперебойного питания (ИБП-0,4 кВ) многофункционального комплекса «IQквартал» в Москва Сити, находящегося по адресу: г. Москва, Пресненская набережная, д. 10, стр. 2. На данном объекте применение программы «Калькулятор емкости Li-NMC аккумулятора» позволило снизить финансовые затраты на реконструкцию системы бесперебойного питания.

Генеральный директор Соловых Ю.А.



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025665761

«Калькулятор емкости Li-NMC аккумулятора»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» (RU)*

Авторы: *Белов Сергей Иванович (RU), Карлаков Дмитрий Сергеевич (RU), Лештаев Олег Валерьевич (RU), Загинайлов Владимир Ильич (RU)*

Заявка № 2025619193

Дата поступления 17 апреля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 19 июня 2025 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e7610c300f542401670b0c2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026666448

**Подбор бывших в употреблении аккумуляторных
модулей электромобиля Nissan Leaf**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева» (RU)*

Авторы: *Карлаков Дмитрий Сергеевич (RU), Белов Сергей
Иванович (RU), Лештаев Олег Валерьевич (RU)*

Заявка № 2026665639

Дата поступления 14 мая 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 июня 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 00a570a477ad498531b4b6818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 09.07.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2026623297

**Влияние зарядного напряжения и конечного
напряжения разряда на энергоёмкость аккумулятора
LiMn2O4**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет -
МСХА имени К.А. Тимирязева» (RU)*

Авторы: *Карлаков Дмитрий Сергеевич (RU), Белов Сергей
Иванович (RU), Гарькавый Константин Алексеевич (RU),
Цедяков Андрей Александрович (RU), Соловьёв Сергей
Владимирович (RU)*

Заявка № 2026623049

Дата поступления 26 июня 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 13 июля 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7add8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.03.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов