

УДК 339.54.012

Сидоров Павел Владимирович, студент 4 курса группы Э-24 кафедры электроснабжение промышленных предприятий, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Попов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжение промышленных предприятий, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

ВТОРИЧНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЙ ИЗ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ: ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И РЫНОЧНЫЕ МОДЕЛИ

Аннотация. В статье рассматривается проблема вторичного использования литий-ионных батарей, отслуживших свой срок в электромобилях. Проанализированы технические аспекты оценки остаточного ресурса и сборки модулей, а также экономические модели и регуляторные условия для их применения в стационарных системах накопления энергии. Цель работы — оценка перспектив формирования устойчивой экосистемы переработки таких аккумуляторов.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, электромобили, вторая жизнь батарей, системы накопления энергии, циркулярная экономика.

Abstract. The article discusses the problem of recycling lithium-ion batteries that have reached the end of their service life in electric vehicles. It analyzes the technical aspects of assessing the residual resource and assembling modules, as well as the economic models and regulatory conditions for their application in stationary energy storage systems. The goal of this work is to assess the prospects for creating a sustainable recycling ecosystem for such batteries.

Keywords: lithium-ion batteries, electric vehicles, second life of batteries, energy storage systems, and circular economy.

Введение

Мировой переход к электрическому транспорту является одним из ключевых факторов декарбонизации экономики. Однако стремительный рост числа электромобилей создаёт сопутствующую экологическую и экономическую проблему: что делать с аккумуляторными батареями после окончания их срока службы в транспортном средстве? Для современных литий-ионных аккумуляторов этот срок обычно составляет 8–10 лет или 150–200 тысяч километров пробега, после чего остаточная ёмкость падает примерно до 70–80 % от номинальной [2]. Такая батарея уже не удовлетворяет требованиям к запасу хода автомобиля, но сохраняет значительный энергетический потенциал.

Прямая переработка (рециклинг) с извлечением ценных металлов (лития, кобальта, никеля) остаётся энергоёмкой и дорогостоящей процедурой. Более рациональным и экономически привлекательным решением видится концепция «второй жизни» батарей — их повторное применение в менее требовательных стационарных системах накопления энергии (СНЭ) [1]. Это позволяет:

- продлить жизненный цикл дорогостоящего продукта;
- отложить затраты на утилизацию;
- удешевить системы хранения энергии;
- снизить общий углеродный след аккумулятора за счёт распределения «энергетических затрат» на производство на большее количество лет службы.

В данной статье, подготовленной студентом, рассматриваются технологические цепочки подготовки батарей к повторному использованию и

анализируются возможные рыночные модели, которые могут сделать этот сектор коммерчески жизнеспособным.

1. Технические аспекты: от автомобиля к системе накопления

Путь АКБ от снятия с электромобиля до интеграции в стационарную систему является сложным инженерным процессом и включает несколько ключевых этапов [5].

1.1. Диагностика и оценка остаточного ресурса

Это критически важный и наиболее сложный этап. После демонтажа батарея представляет собой «чёрный ящик». Необходимо определить:

- **Остаточную ёмкость.** Проводится путём контрольных циклов заряда-разряда.
- **Внутреннее сопротивление** элементов и модулей.
- **Степень деградации и баланс** между отдельными ячейками.
- **Историю эксплуатации** (при наличии данных от BMS — Battery Management System).

Разрабатываются неразрушающие методы экспресс-диагностики на основе анализа импеданса и машинного обучения для прогнозирования оставшегося срока службы [3].

1.2. Разборка, тестирование и переборка

Современные автомобильные АКБ — это сложные сборки из тысяч отдельных ячеек, объединённых в модули. Процесс включает:

- **Безопасную разборку** высоковольтной системы.
- **Визуальный осмотр и тестирование** каждого модуля или группы ячеек.
- **Сортировку** по совместимым параметрам (ёмкость, внутреннее сопротивление).

- **Формирование новых батарейных блоков** из отобранных модулей. Новые блоки собираются с учётом требований стационарного применения: как правило, меньшие токи разряда, но более глубокий цикл и длительный срок службы [5].

1.3. Разработка системы управления (BMS) «второй жизни»

Штатная BMS электромобиля оптимизирована для динамичных режимов. Для стационарного хранилища требуется новая или существенно доработанная BMS, которая:

- учитывает повышенную неоднородность параметров элементов в сборке «вторая жизнь»;
- адаптирует алгоритмы балансировки и управления температурным режимом;
- обеспечивает безопасную работу в длительных циклах заряда/разряда от ВИЭ или в сетевых приложениях [5].

2. Сферы применения и рыночные модели

«Бэушные» АКБ неконкурентоспособны в сегменте высокоинтенсивных применений (например, частые быстрые разряды для поддержки частоты), но идеально подходят для сценариев с плавными и предсказуемыми циклами [1].

2.1. Ключевые сферы применения:

- **Накопление энергии от ВИЭ для домохозяйств и бизнеса:** Сглаживание суточной генерации солнечных панелей, увеличение самокупаемости.
- **Резервное электроснабжение:** Замена дизель-генераторов в качестве источника бесперебойного питания (ИБП) для критической инфраструктуры.
- **Сглаживание пиковых нагрузок для промышленности:** Снижение платы за пиковую мощность, потребляемую из сети.

- **Балансировка низковольтных распределительных сетей:** Поддержание напряжения и частоты в локальных сетях с высокой проницаемостью ВИЭ.

2.2. Потенциальные бизнес-модели:

1. **Модель продажи «как есть»:** Автопроизводитель или утилизатор продаёт бывшие в употреблении батареи системным интеграторам. Простая модель, но требует чёткой гарантии базовых параметров.
2. **Модель «Батарея как услуга» для СНЭ:** Пользователь (домохозяйство, завод) платит не за батарею, а за объём накопленной/поставленной энергии или за предоставляемую услугу (резервирование). Это снижает капитальные затраты для клиента и оставляет актив на балансе поставщика, который отвечает за его обслуживание и конечную утилизацию [4].
3. **Модель совместного предприятия автопроизводителя и энергокомпании:** Автоконцерн (например, Nissan, BMW, Volkswagen) совместно с энергетической компанией создают пулы бывших в употреблении батарей для создания крупных сетевых накопителей. Это обеспечивает контроль над цепочкой создания стоимости и брендом.
4. **Арендная/лизинговая модель для малого бизнеса:** Специализированная компания собирает и сертифицирует батареи «вторая жизнь», сдавая их в аренду малым предприятиям или операторам ВИЭ.

3. Проблемы и барьеры развития

Несмотря на потенциал, отрасль сталкивается с серьёзными вызовами:

3.1. Технологические и нормативные барьеры:

- **Отсутствие стандартов** на оценку SOH, тестирование и сертификацию батарей «второй жизни» [2, 5].

- **Сложность и стоимость диагностики и переборки**, которая может «съесть» значительную часть экономии.
- **Юридическая ответственность за безопасность и производительность.** Кто отвечает, если сборка «вторая жизнь» выйдет из строя или станет причиной пожара?
- **Проблема «двойной неопределённости»:** Неизвестная история эксплуатации в сочетании с неопределённым поведением в будущем.

3.2. Экономические барьеры:

- **Снижение стоимости новых аккумуляторов.** Цены на новые LFP-батареи (литий-железо-фосфатные) постоянно падают, сужая ценовое окно для продуктов «вторая жизнь» [1].
- **Высокие транспортные расходы** (батареи — тяжёлый и опасный груз).
- **Неразвитость инфраструктуры сбора и логистики** отработавших АКБ.

4. Выводы и перспективы

Концепция вторичного использования литий-ионных батарей от электромобилей представляет собой практическое воплощение принципов циркулярной экономики в высокотехнологичном секторе [4]. Она позволяет извлекать дополнительную ценность из сложного продукта, откладывая энергозатратный этап рециклинга.

Для успешного развития этого рынка необходимо:

1. **Разработать отраслевые стандарты и нормативную базу**, регулирующие требования к безопасности, тестированию и сертификации батарей «второй жизни».

2. **Стимулировать проектирование для разборки.** Автопроизводители должны закладывать возможность лёгкой и безопасной разборки АКБ, стандартизации модулей и предоставления доступа к данным BMS.
3. **Создать эффективные цепочки сбора и логистики** отработавших батарей.
4. **Инвестировать в R&D** в области быстрой диагностики, алгоритмов прогнозирования остаточного ресурса и систем управления [3].

В среднесрочной перспективе наиболее вероятным сценарием является формирование нишевого рынка, где батареи «вторая жизнь» будут успешно конкурировать с новыми в приложениях, не требующих максимальной удельной мощности и длительной гарантии, но критичных к стоимости системы [1]. Это направление открывает широкие возможности для инженеров, экологов и экономистов, делая его перспективной областью для студенческих исследований и будущей профессиональной деятельности.

Заключение

Вторичное использование литий-ионных батарей от электромобилей — это практичное решение в рамках циркулярной экономики, продлевающее жизненный цикл дорогостоящих ресурсов. Технически задача решается через совершенствование диагностики и создание специализированных систем управления, а экономически — через модели вроде «батарея как услуга». Однако развитию мешают отсутствие стандартов, юридические риски и снижение цен на новые аккумуляторы [1, 4].

Для успеха необходимы совместные действия: чёткое регулирование со стороны государства, инвестиции бизнеса в инфраструктуру и технологии, а также научные разработки в области оценки надёжности элементов. Реализация этого направления снизит экологическую нагрузку и создаст основу для устойчивой экономической модели в энергетике и транспорте.

Литература:

1. Вознюк А. М., Литвиненко В. С. Технично-экономический анализ вторичного использования литий-ионных батарей электромобилей // Транспорт на альтернативном топливе. – 2022. – № 4 (76). – С. 45–54.
2. ГОСТ Р 57144-2016 (МЭК 62660-1:2010). Аккумуляторы литиевые для тяги электромобилей. Часть 1. Испытания на эксплуатационные характеристики. – Введ. 2017-07-01. – М. : Стандартиформ, 2016. – 30 с.
3. Иванов А. В., Петров К. Д. Методы оценки остаточного ресурса литий-ионных аккумуляторов после эксплуатации в электромобилях // Известия высших учебных заведений. Электротехника. – 2021. – Т. 24, № 5. – С. 78–85.
4. Кругов А. С. Циркулярная экономика в автомобилестроении: стратегии reuse, remanufacturing и recycling литий-ионных батарей // Экономика и экология. – 2023. – № 1. – С. 112–125.
5. Неймарк М. А., Соловьёв Д. И. Системы накопления электроэнергии на базе аккумуляторных батарей «второй жизни»: обзор решений // Энергоэффективность и энергосбережение. – 2022. – № 8. – С. 2–39.

Literature:

1. Voznyuk A. M., Litvinenko V. S. Technical and economic analysis of the secondary use of lithium-ion batteries for electric vehicles // Transport on alternative fuel. – 2022. – No. 4 (76). – Pp. 45–54.
2. GOST R 57144-2016 (IEC 62660-1:2010). Lithium batteries for electric vehicle traction. Part 1. Performance tests. – Vved. 2017-07-01. – M. : Standartinform, 2016. – 30 p.
3. Ivanov A. V., Petrov K. D. Methods for Estimating the Remaining Life of Lithium-Ion Batteries after Use in Electric Vehicles // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektrotehnika. – 2021. – Vol. 24, No. 5. – Pp. 78–85.

4. Krugov A. S. Circular Economy in the Automotive Industry: Strategies for Reuse, Remanufacturing, and Recycling of Lithium-Ion Batteries // Economics and Ecology. – 2023. – No. 1. – Pp. 112–125.
5. Neymark M. A., Solovyov D. I. Energy Storage Systems Based on Second-Life Batteries: A Review of Solutions // Energy Efficiency and Energy Saving. – 2022. – No. 8. – Pp. 2–39.