УДК 62-932.4

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ ТЯГОВЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Бурманов С.А. – аспирант 3 курс
Новосибирский государственный технический университет
Россия, г. Новосибирск

Электрификация транспорта стала одним из ключевых трендов развития автомобильной и горнодобывающей отраслей. Рост парка легковых электромобилей, электрических автобусов и карьерной техники предъявляет повышенные требования к надёжности и ресурсу тяговых литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИА). Стоимость аккумуляторного пакета может достигать 30–40 % от цены электромобиля, а замена батареи является одной из наиболее затратных операций жизненного цикла. [1–3]

Современные исследования показывают, что деградация ЛИА определяется комбинацией факторов: химическим составом и конструкцией элементов, температурой, глубиной разряда (Depth of Discharge, DoD), диапазоном уровня заряда (State of Charge, SOC) и C-rate — С-кратностью тока заряда/разряда. [1, 4–6] Для транспортных приложений, где батарея ежедневно проходит множество циклов при высокой мощности, управление C-rate становится ключевым инструментом увеличения ресурса.

Цель работы – проанализировать влияние C-rate и профиля эксплуатационных нагрузок на ресурс тяговых ЛИА и предложить подход к интеллектуальному управлению ресурсом на основе комбинированных накопителей энергии и алгоритмов BMS для применения в системах автотранспорта.

C-rate (С-кратность тока, C-rating) характеризует скорость заряда или разряда аккумулятора относительно его номинальной ёмкости. Если ёмкость батареи составляет $Q = 100$А·ч, то ток 1C равен 100 А, при котором идеальное время полного разряда составляет 1 ч; ток 0,5C – 50 А (2 ч), ток 2C – 200 А (0,5 ч) и т.д. В общем виде:

$$I = C\text{-rate} \cdot Q.$$

Таким образом, C-rate одинаково удобно описывает как режимы заряда, так и разряда. [1, 7, 8]

Увеличение C-rate приводит к:

- росту тепловыделения и температурных градиентов в ячейке;
- усилению концентрационных градиентов в объёме электродов;
- повышенному риску литиевого осаждения при быстром заряде, особенно при низких температурах. [4–6, 9]

Экспериментальные исследования показывают, что рост C-rate при разряде и заряде может в разы сокращать число циклов до достижения пороговой

остаточной ёмкости (обычно 70–80 % от номинальной). При сочетании высоких C-rate с глубокой DoD и экстремальными температурами наблюдается наиболее быстрое старение. [5, 6, 9, 10]

Отсюда следует практический вывод: ограничение C-rate для основной тяговой батареи и перераспределение пиковых токов на специализированный буферный накопитель позволяет существенно увеличить срок службы без радикальной смены химии.

В современных системах автотранспорта преобладают три группы литий-ионных химий:

- **NMC/NCA** (никель-марганец-кобальт / никель-кобальт-алюминий) – высокоэнергоёмкие катодные материалы, обеспечивающие удельную энергию порядка 150–250 Вт·ч/кг и более. Они широко применяются в легковых электромобилях с увеличенным запасом хода, однако чувствительны к повышенным температурам и высоким C-rate. [2, 3, 11]
- **LFP** (литий-железо-фосфат) – химия с меньшей удельной энергией (≈90–160 Вт·ч/кг), но повышенной термостабильностью и безопасностью, устойчивой к тепловому разгону. LFP-ячейки демонстрируют увеличенный циклический ресурс – тысячи циклов при умеренных режимах, поэтому широко используются в массовых электробусах и электромобилях. [10, 11]
- **LTO** (литий-титанат) – химия с наименьшей удельной энергией (≈60–120 Вт·ч/кг), но с возможностью работы при очень высоких C-rate (до 5–10C и более) и ресурсом в десятки тысяч циклов. [3, 7, 11] Такие ячейки целесообразно применять в качестве буферных накопителей, работающих в самых жёстких режимах.

Для задач автотранспорта выбор конкретной химии представляет собой компромисс между запасом хода, ресурсом, безопасностью и стоимостью. Однако во всех случаях ограничение C-rate и оптимизация профиля нагрузок позволяют существенно продлить срок службы любой из указанных химий.

Один из перспективных подходов к управлению ресурсом ЛИА – применение комбинированных накопителей энергии (Hybrid Energy Storage Systems, HESS), в которых высокоэнергоёмкая батарея сочетается с высокомощным буферным контуром (LTO-модуль или суперконденсаторы). [12–14]

В такой архитектуре:

- **основная батарея** (NMC или LFP) обеспечивает требуемый запас хода и работает с ограниченным C-rate;
- **буферный накопитель** принимает на себя пиковые токи тяги и рекуперативного торможения, а также сглаживает быстрые колебания нагрузки на уровне шин постоянного тока.

Публикации по HESS для электромобилей показывают, что подобное распределение функций позволяет:

- снизить максимальные C-rate и тепловую нагрузку для основной батареи;
- уменьшить амплитуду токовых пульсаций;

- увеличить срок службы основного аккумулятора на десятки процентов при незначительном росте массы и стоимости системы. [12–14]

Для тяжёлой техники (карьерные самосвалы, городские грузовые автомобили) буферный контур может быть особенно полезен в режимах длительной тяги под высокой нагрузкой и мощной рекуперации при спуске.

Предлагается рассматривать управление ресурсом тяговых ЛИА на трёх уровнях.

Инженерный уровень

- выбор химии основного накопителя с учётом требуемого запаса хода и условий эксплуатации (NMC/NCA – при приоритете энергоёмкости, LFP – при приоритете безопасности и ресурса);
- включение буферного высокомощного контура на базе LTO-ячееек или суперконденсаторов, способных выдерживать большие C-rate без существенной деградации;
- разработка эффективной системы теплового менеджмента, поддерживающей оптимальный температурный диапазон для используемой химии. [3, 9–11]

Алгоритмический уровень (BMS)

- ограничение C-rate основного аккумулятора в зависимости от SOC и температуры; перераспределение пиковых токов на буферный контур;
- эксплуатация батареи в «здоровом» окне SOC (например, 10–90 %, а по мере старения – 20–80 %), что снижает механические и химические нагрузки на электроды; [4–6]
- применение встроенных моделей деградации, учитывающих C-rate, DoD, температуру и историю эксплуатации, для оценки параметра SOH (State of Health) и прогноза остаточного ресурса. [4–6, 9]

Эксплуатационный уровень

- обучение водителей и операторов особенностям работы с электротранспортом (избегать постоянных режимов «полный разгон – полное торможение», не проводить быстрый заряд при низких температурах);
- использование телематики для мониторинга токов, температур и профилей SOC и последующей корректировки режимов эксплуатации;
- планирование обслуживания и возможной модернизации аккумуляторных систем на основе прогноза SOH, а не только по пробегу или календарному сроку. [9, 15]

Ресурс тяговых литий-ионных батарей является критическим фактором эффективности электрического автотранспорта. Показано, что ключевую роль играет C-rate, определяющий интенсивность деградации при циклической эксплуатации. Ограничение C-rate основного аккумулятора, применение комбинированных накопителей энергии и использование интеллектуальных алгоритмов BMS позволяют существенно увеличить срок службы батарей без радикального изменения химии элементов.

Развитие указанных подходов в системах автотранспорта способствует снижению совокупной стоимости владения, повышению надёжности

электротранспорта и расширению его применения в условиях городских перевозок и тяжёлых горнодобывающих циклов.

Список литературы:

1. Battery University. BU-402: What Is C-rate? – URL: https://batteryuniversity.com/article/bu-402-what-is-c-rate (дата обращения: 21.11.2025).
2. International Energy Agency. Global EV Outlook 2024. – URL: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024 (дата обращения: 21.11.2025).
3. Battery University. BU-205: Types of Lithium-ion. – URL: https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion (дата обращения: 21.11.2025).
4. Fischer M. et al. Degradation factors of commercial lithium-ion batteries // Applied Physics Reviews. 2025. Vol. 12. 031320.
5. Rahman T. et al. Exploring Lithium-Ion Battery Degradation: A Concise Review // Batteries. 2024. Vol. 10, No. 7. 220.
6. Birkl C. et al. Degradation diagnostics for lithium-ion cells // Journal of Power Sources. 2017. Vol. 341. P. 373–386.
7. Ufine Battery. NMC vs LFP vs LTO Batteries: A Complete Comparison Guide. – URL: https://www.ufinebattery.com/blog/nmc-vs-lfp-vs-lto-batteries-a-complete-comparison-guide/ (дата обращения: 21.11.2025).
8. Ossila. What is Battery C-rate? – URL: https://www.ossila.com/pages/what-is-battery-c-rate (дата обращения: 21.11.2025).
9. Vetter J. et al. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries // Journal of Power Sources. 2005. Vol. 147. P. 269–281.
10. Large Battery. Lithium Iron Phosphate (LFP) and Battery Density Guide. – URL: https://www.large-battery.com/blog/lithium-ion-battery-weight-and-density-explained-guide/ (дата обращения: 21.11.2025).
11. Xu B. et al. Recent progress in cathode materials for lithium-ion batteries // Materials Science and Engineering R. 2018. Vol. 135. P. 1–55.
12. Kouchachvili L. et al. Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles // Journal of Power Sources. 2018. Vol. 374. P. 237–248.
13. Mariasiu F. et al. Control Algorithms for Ultracapacitors Integrated in Hybrid Energy Storage Systems // Batteries. 2025. Vol. 11, No. 11. 395.
14. Xiong R. et al. Advanced hybrid energy storage systems for electric vehicles // Energy Storage Materials. 2020. Vol. 25. P. 316–331.

Neubauer J., Pesaran A. The ability of battery second use strategies to impact plug-in electric vehicle prices and serve utility energy storage applications // Journal of Power Sources. 2011. Vol. 196. P. 10351–10358.