

УДК 621.331

Исследование модели ездового цикла электровоза с экспериментальным накопителем электроэнергии в процессе маневровых работ

С. Ф. Алеков¹, А. С. Куликов¹, Т. В. Голубчик², М. А. Иванов³

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский просп., 64

²Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

³ООО «Центр перспективных технологий ТМХ», Российская Федерация, 121205, Москва, ул. Нобеля (инновационного центра Сколково Тер), эт. 3, пом. 28, раб. 1

Для цитирования: Алеков С. Ф., Куликов А. С., Голубчик Т. В., Иванов М. А. Исследование модели ездового цикла электровоза с экспериментальным накопителем электроэнергии в процессе маневровых работ // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 88–105. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-88-105

Аннотация

В настоящее время наблюдается активный переход на электрифицированные транспортные средства, обусловленный снижением стоимости энергии и ростом плотности химических источников тока. В железнодорожной отрасли это проявляется в электрификации подвижного состава, особенно для работ на вокзалах и в депо, где использование дизелей ограничено экологическими факторами. Кроме того, электровозы могут функционировать на неэлектрифицированных участках железнодорожных путей, что открывает новые перспективы для устойчивого развития транспортной инфраструктуры. **Цель:** Исследование технических параметров и энергетических характеристик накопителя электроэнергии (НЭ) для эффективного применения в составе электровозов. **Методы:** В данной статье рассмотрены ключевые вопросы энергетики ездовых циклов движения и актуальности применения накопителя электроэнергии в составе электровоза. Показано сравнение полученных экспериментальных данных с расчетными. **Результаты:** Приведена модель ездового цикла аккумуляторного локомотива, основанная на расчете времени эксплуатационной работы дизель-генераторной установки (ДГУ) традиционного дизельного локомотива. Представлены экспериментальные данные работы накопителя энергии (НЭ) в составе электровоза, а также результаты анализа полученных данных. Выявлены необходимые технические параметры НЭ, которые обеспечивают эффективное функционирование электровоза в рамках суточного цикла работы на железнодорожном вокзале. **Практическая значимость:** Проведенные исследования дают представление об энергетических параметрах и режимах работы контактно-аккумуляторного маневрового локомотива в течение рабочего дня. Позволяют определить параметры НЭ, такие как мощности заряда и разряда, средние и максимальные значения расхода энергии. Исследования могут привести к созданию более эффективных механизмов накопления и использования электроэнергии, что позволит снизить эксплуатационные затраты электровозов и повысить их энергетическую эффективность. Практическое исследование накопителей электроэнергии может быть полезно не только для железнодорожного транспорта, но и для других областей, где необходимы эффективные системы энергосбережения.

Ключевые слова: Накопитель электроэнергии, электровоз, ездовые циклы, литий-ионный аккумулятор, железнодорожный транспорт.

Введение

Дизельные маневровые локомотивы, которые используются сегодня, обладают обширным спектром мощностей. Однако интересно отметить, что максимальная мощность задействуется лишь в 5–10 % случаев в течение всего времени эксплуатации. Для достижения этой максимальной мощности необходима специализированная силовая установка, которая чаще всего функционирует на уровне мощностей ниже максимальных, менее эффективных. Такое оборудование, рассчитанное на пиковые нагрузки, неизбежно ведет к увеличению стоимости локомотива. Применение накопителей электроэнергии (НЭ) позволяет значительно уменьшить требования к мощности первичного источника энергии, что, в свою очередь, может снизить затраты на силовую установку и обеспечить более стабильную ее работу, способствуя повышению эффективности использования энергии [1].

С развитием электрификации всей транспортной системы встал вопрос о перспективе работы гибридных контактно-аккумуляторных локомотивов. Исследования по созданию локомотивов с системами аккумулирования энергии, проведенные как в России, так и за рубежом, демонстрируют перспективы уменьшения потребления топлива на уровне 40–60 % в сравнении с маневровыми локомотивами, работающими по традиционной схеме. Кроме того, применение таких технологий может привести к сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу на 80–90 % [2, 3].

Существенный интерес такой разработки в первую очередь обусловлен снижением стоимости серийно выпускаемых литий-ионных аккумуляторов, прогнозируемое изменение стоимости кВт · ч аккумуляторов представлено на рис. 1 [4–7].

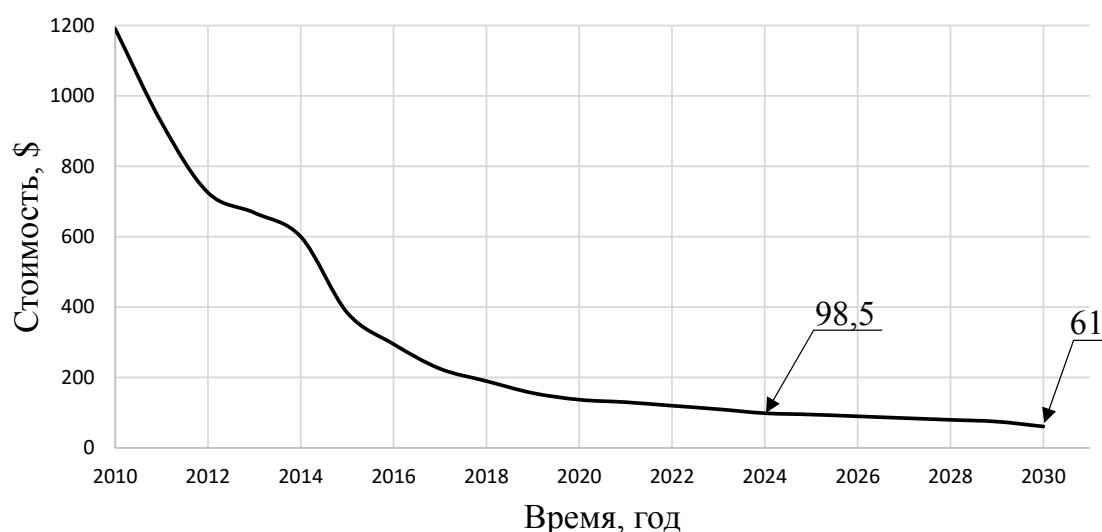


Рис. 1. Изменение цены и прогнозная стоимость литий-ионных аккумуляторов за кВт · ч

Дальнейшее снижение стоимости элементов окажет весомое влияние на экономические показатели и доступность их применения в системах накопления электроэнергии. В свою очередь, техническое усовершенствование НЭ способствует увеличению дальности хода и улучшению динамических характеристик электрических транспортных средств.

В процессе разработки НЭ для транспортных средств цена на системы хранения энергии долгое время оставалась одним из основных сдерживающих факторов. Однако не менее значимым ограничением была и невозможность создания накопителей с высокой емкостью.

Ситуация начала меняться с появлением литиевых аккумуляторов, а особенно с разработкой безопасных литий-железо-фосфатных (LFP) аккумуляторных ячеек. Эти новые технологии отвечают требованиям безопасности для транспортных средств [8–11], что стало основополагающим для создания НЭ.

Использование таких перевозимых источников энергии находит применение в различных областях техники [12–14], одним из примеров являются электровозы, где высокая емкость и безопасность аккумуляторов играют ключевую роль в обеспечении эффективной работы [15–17].

Для оценки эффективности применения накопителей электроэнергии в конструкции электровоза с целью выполнения маневровых работ критически важно иметь точное понимание режимов работы и реальных условий эксплуатации существующих локомотивов.

Конструкция и режимы работы накопителя электроэнергии

Экспериментальный накопитель электроэнергии состоит из батарейных модулей (БМ), системы управления накопителем энергии (СУНЭ), системы контроля и управления накопителем электроэнергии (СКУНЭ), системы термостатирования, оборудования коммутации и защиты.

Накопитель энергии предназначен для аккумуляции электрической энергии, получаемой от преобразователя при питании маневрового электровоза от контактной сети постоянного тока с номинальным напряжением 3000 В или от стационарного зарядного устройства локомотивного депо. При этом НЭ обеспечивает передачу запасенной электроэнергии в тяговую систему и питание преобразователя собственных нужд при движении электровоза по неэлектрифицированным железнодорожным участкам. Состоит из двух секций, в каждой из которых находятся 28 ед. БМ. Количество аккумуляторных ячеек в БМ — 18 шт. [18]. В конструкции применены аккумуляторные элементы электрохимии LiFePO_4 , что обусловлено их преимуществами [19, 20].

Основные технические характеристики НЭ:

– номинальная емкость 288 А · ч:

- номинальное напряжение 870 В;
- кратность тока разряда 2С;
- ток заряда 1С.

Суточный цикл движения (модель ездового цикла) определяет требования к временным показателям в процессе эксплуатации для конкретных режимов работы. Рассмотрим его на примере расчета времени эксплуатационной работы ДГУ тепловоза [21, 22].

Различают 3 режима работы локомотива: резервный, когда к локомотиву не присоединен состав; режим тяги; режим простоя.

Тепловозы выполняют маневровую работу по станции: перемещение вагонов из парка отстоя до станции и наоборот — для формирования поездов или их разделения. Потребность маневровых локомотивов — 2 единицы круглосуточно, соответственно, для обеспечения указанных режимов работа локомотива с НЭ должна совпадать с работой дизельного локомотива. При этом заряд НЭ возможен между всеми циклами разряда в моменты простоя. Режимы работы определены как режим тяги и выбега в одну сторону (РТВ1), когда локомотив тянет состав только в парк отстоя или на вокзал. Режим тяги и выбега в 2 стороны (РТВ2), когда локомотив тянет состав в оба направления. И режим резерва (РР), когда локомотив не переставляет составы. На основе времени и сценариев работы рассчитаны максимальные и среднесуточные циклы разряда НЭ (потребности электровоза в электроэнергии), которые представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Модель ездового цикла электровоза на базе работы ДГУ тепловоза

№	Режим	Максимальные суточные циклы разряда НЭ, кВт · ч	Среднесуточные циклы разряда НЭ, кВт · ч
1	РТВ1	114	89
2	РТВ1	114	89
3	РТВ1	114	113
4	РТВ1	114	89
5	РТВ2	145	114
6	РР	50	39
7	РР	50	39
8	РТВ2	145	114
9	РР	50	39
	Суммарный суточный расход	926	726

В расчетах модели ездового цикла [22] время работы дизельного локомотива составляет в среднем 1260 мин, в зависимости от сценария. Простой составляет 180 мин, за это время можно обеспечить заряд НЭ. Максимальное необходимое время для полного заряда накопителя на величину полезной энергоемкости НЭ $200 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ должно быть не более 50 мин.

Программный комплекс управления режимами разряда и заряда выполняется под управлением операционной системы Linux x Debian 10.x с версией ядра 4.14.78. Программный комплекс написан на языке C++ с применением стандарта C++11. С помощью СУ НЭ были получены данные для последующего исследования.

Исследование экспериментальных данных

В соответствии с разработанным ездовым циклом производились испытания электровоза с НЭ, в результате были получены экспериментальные данные режимов работы НЭ электровоза в процессе маневровых работ. На рис. 2 и 3 представлены графики токов заряда и разряда НЭ соответственно.

Полученный максимальный ток заряда — 157 А, при этом максимальный ток заряда НЭ — 288 А. Можно констатировать, что в разработанном рабочем цикле ток заряда является оптимальным и предотвращает быстрое деградирование аккумулярующих элементов НЭ [23, 24].

Максимальный разрядный ток составил 239 А, что в два раза ниже номинального разрядного тока аккумуляторных элементов, входящих в состав НЭ, имеющих оптимальную разрядную характеристику.

На рис. 4 представлено изменение напряжения НЭ в процессе проведения испытаний, а на рис. 5 — напряжение на аккумуляторной ячейке в момент разряда в интервале от 10 300 до 10 500 с.

Минимальное напряжение на ячейке 3,09 В указывает на максимальную глубину разряда НЭ — 80 % в процессе испытаний на 10 500 с (около 3 ч эксплуатации), что позволяет сделать вывод о граничной емкости аккумуляторной батареи. Это демонстрирует соблюдение баланса оптимального веса на единицу энергоемкости и отсутствие резерва. Также присутствует опасность глубокого разряда НЭ, при которой аккумуляторные ячейки быстро деградируют [25–27].

По расчетам ездового цикла и рис. 2–4 следует, что максимальное нахождение локомотива в режиме движения резервом (без состава) составляет 21 мин период времени с 4499 по 5766 с.

На рис. 6 представлен график энергоемкости, затраченной за промежуток времени в режиме тяги, как видно из графика общая затраченная электроэнергия за исследуемый цикл разряда составляет $22 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ за 21 мин тяги.

На рис. 7, 8 и 9 соответственно представлен ток разряда, напряжение НЭ и минимальное напряжение аккумуляторной ячейки для исследуемой области.

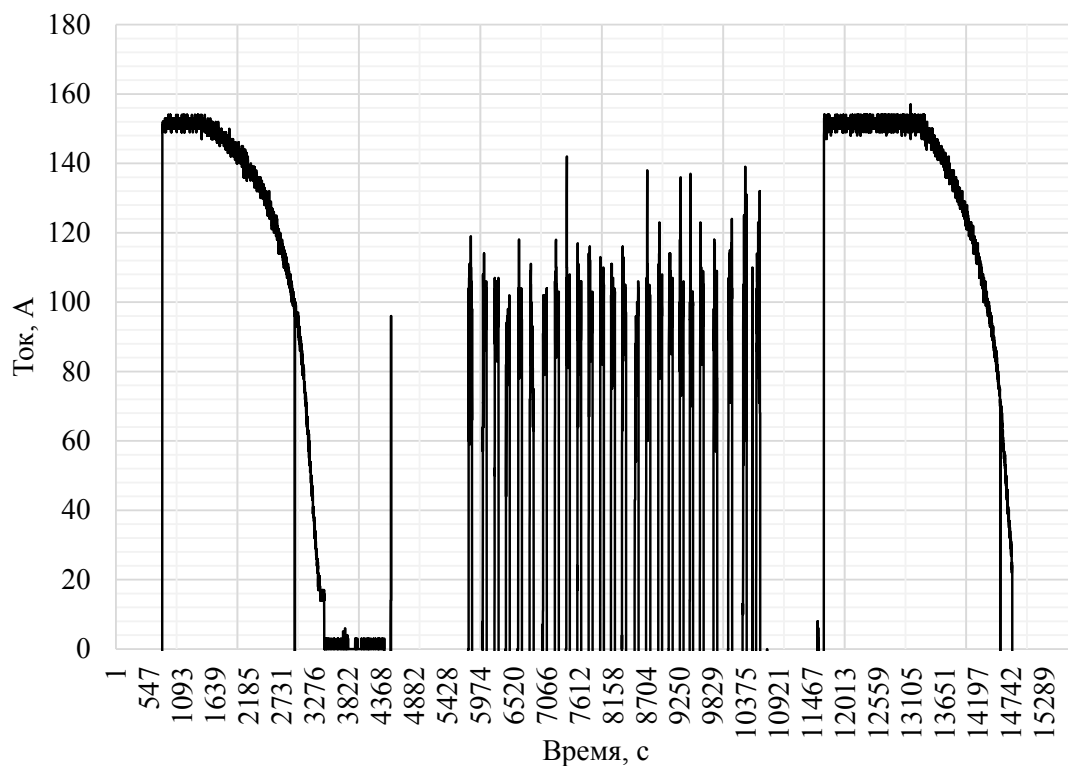


Рис. 2. Параметры заряда накопителя электроэнергии

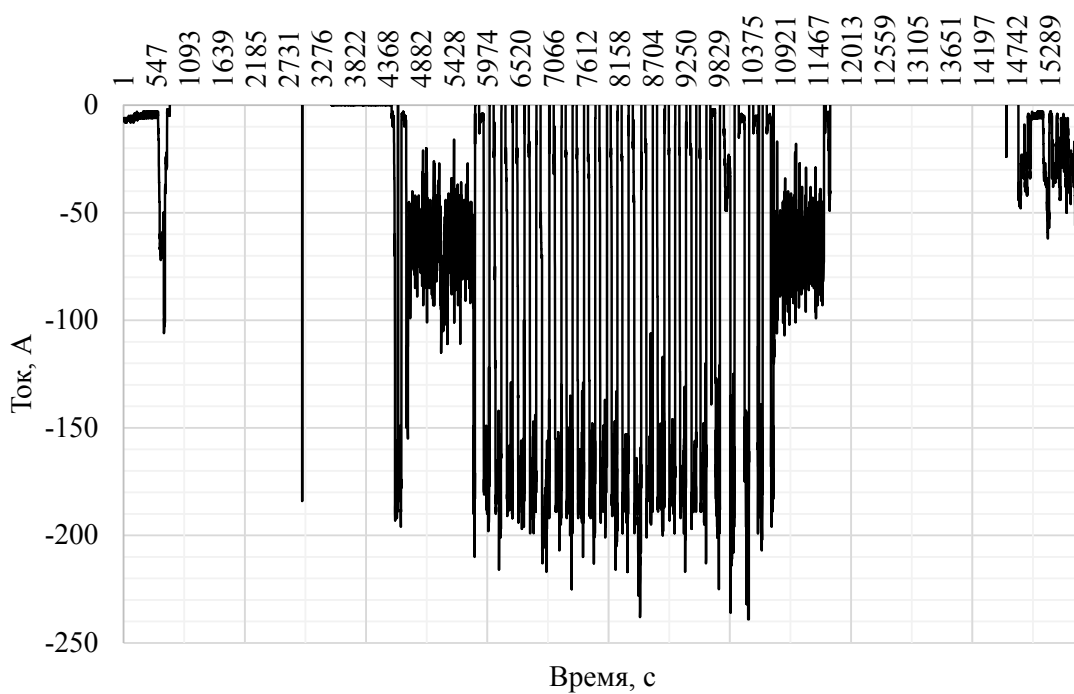


Рис. 3. Параметры разряда накопителя электроэнергии

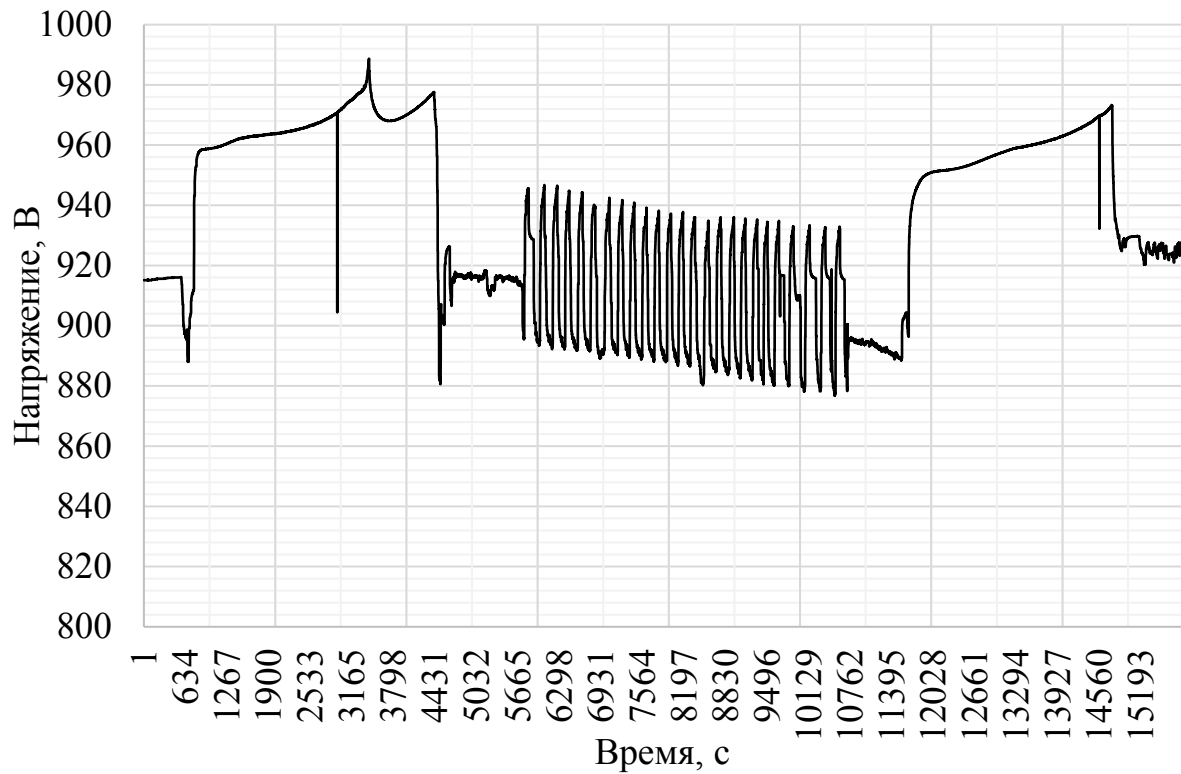


Рис. 4. Напряжение накопителя электроэнергии при ездовом цикле электровоза

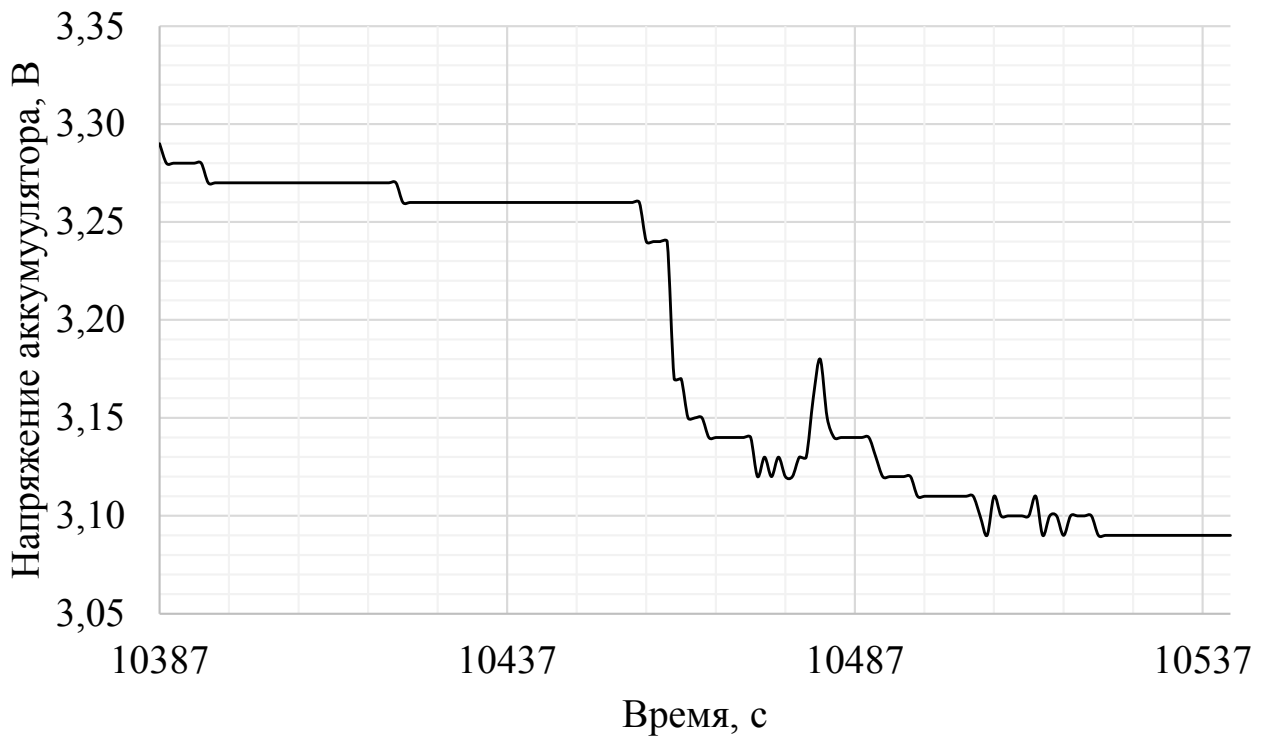


Рис. 5. Напряжение одного аккумуляторного элемента накопителя электроэнергии в момент разряда

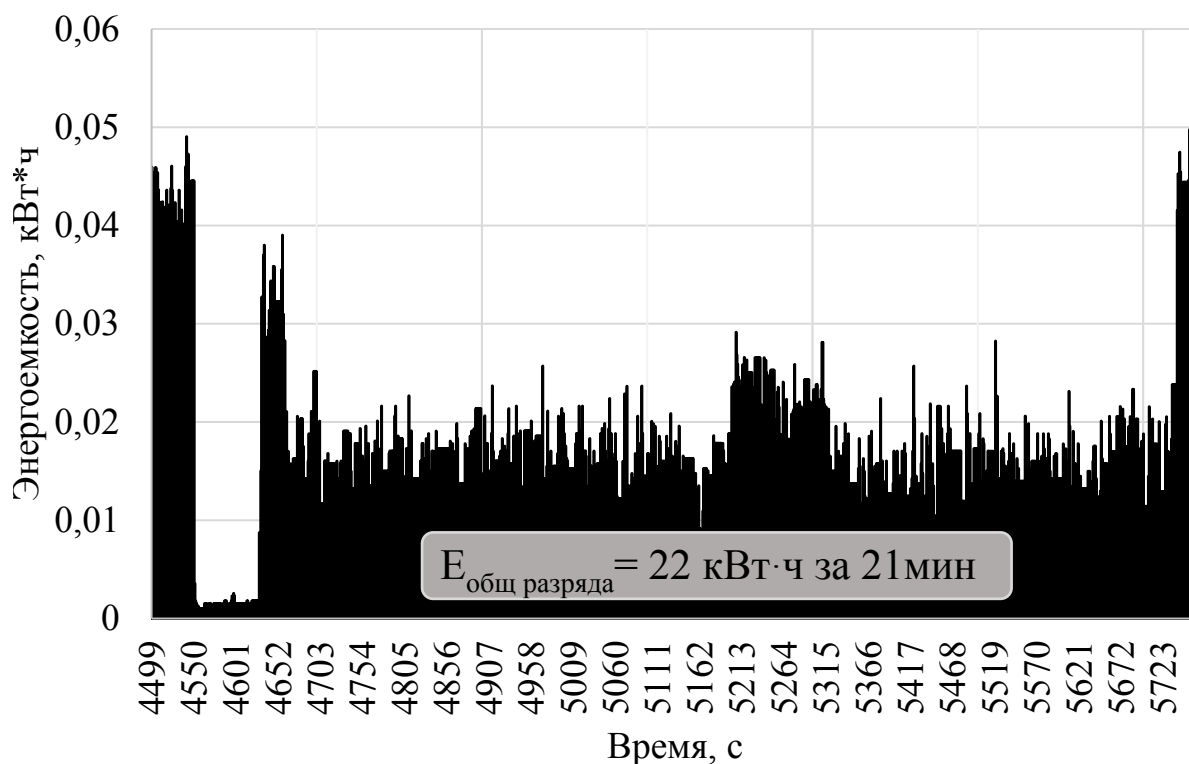


Рис. 6. Затраченная энергия на исследуемом промежутке времени в режиме тяги

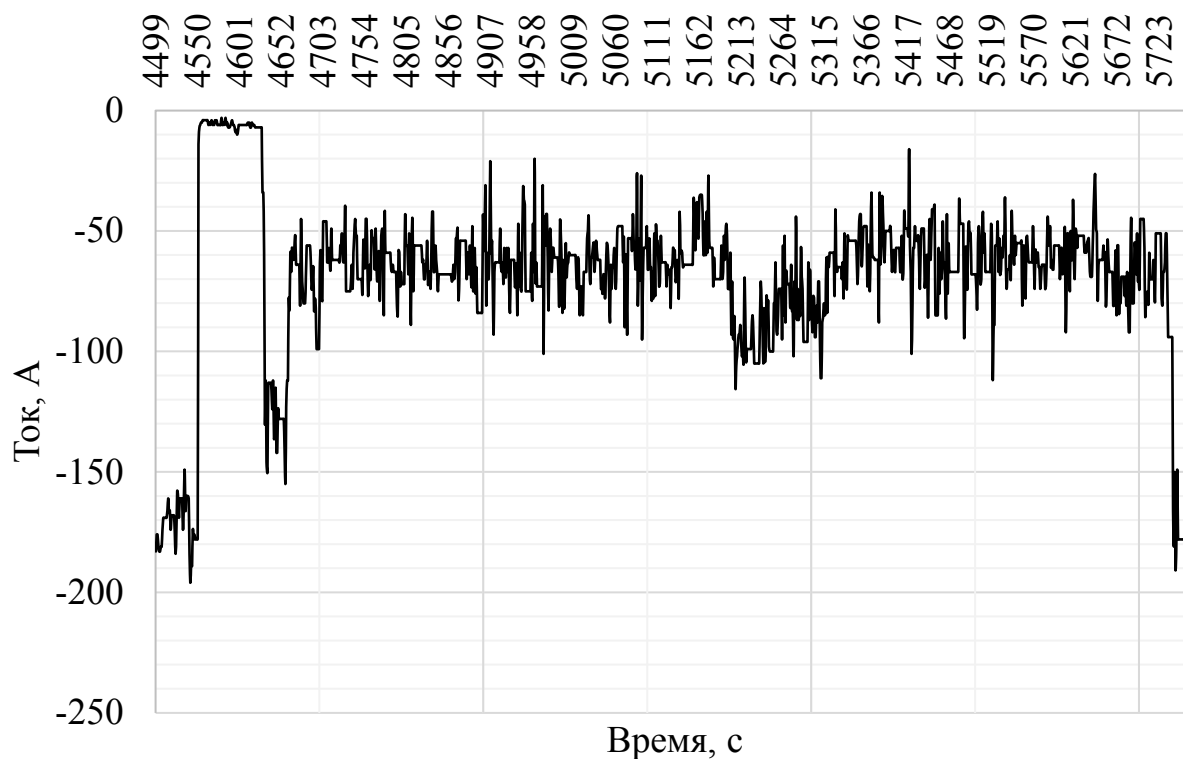


Рис. 7. Ток разряда накопителя электроэнергии на исследуемом промежутке времени разряда

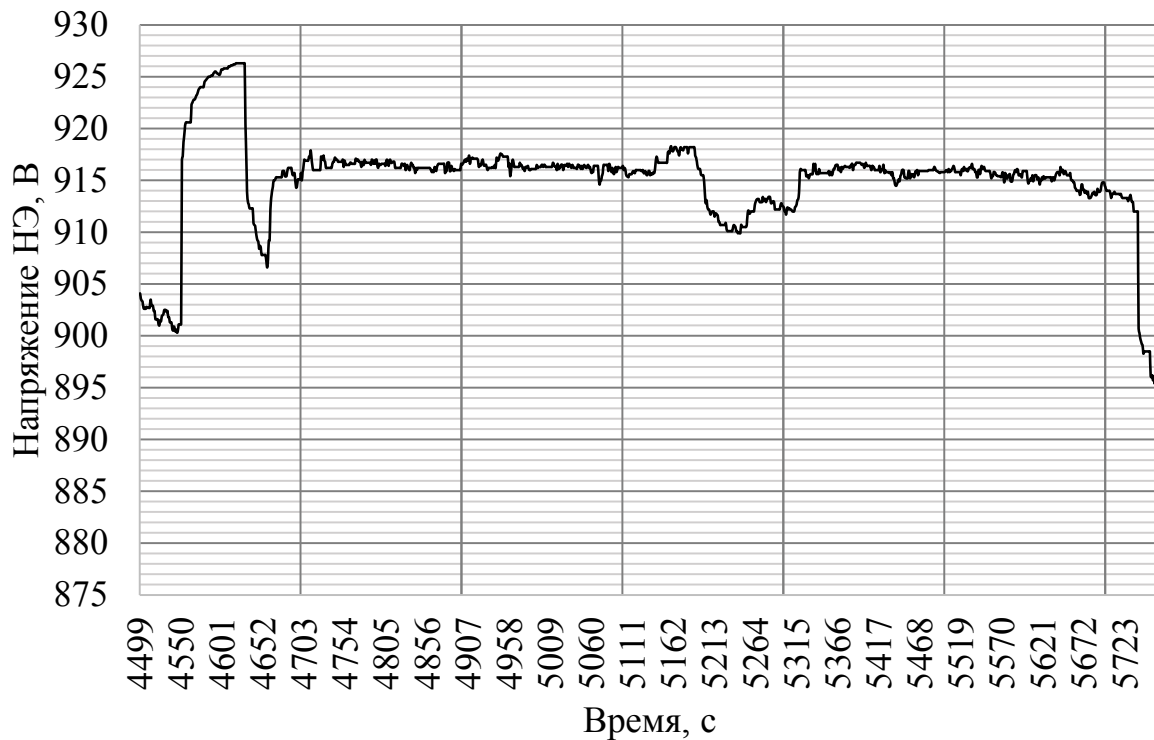


Рис. 8. Напряжение накопителя электроэнергии на исследуемом промежутке времени разряда

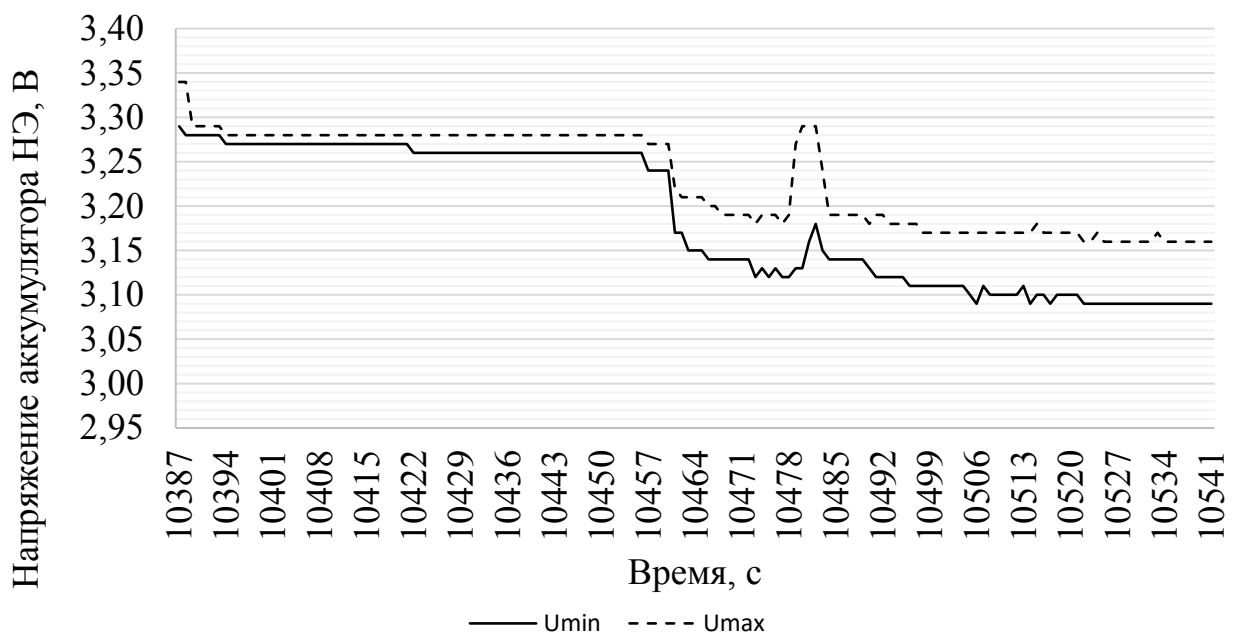


Рис. 9. Минимальное напряжение аккумуляторного элемента при разряде

Для расчета запасаемой энергии в НЭ примем самый длительный промежуток времени с 760 по 3473 с, в котором ток заряда был на номинальном уровне без колебаний. Выборка данного промежутка обусловлена оптимальным режимом заряда НЭ, при котором деградация аккумуляторных ячеек минимальна, поскольку такой режим считается предпочтительным, при этом время заряда составило 45 мин.

Резкое возрастание напряжения на рис. 8 и 9 обусловлено спадом нагрузки на НЭ.

На рис. 10 представлен график расчета энергоемкости. А на рис. 11–13 соответственно представлен ток разряда, напряжение НЭ и минимальное напряжение аккумуляторной ячейки для исследуемой области заряда.

Общее время прохождения дневного маршрута (суточного цикла работы электровоза) составляет $t_p = 21$ час тяги, как указано ранее [22]. При этом остается еще $t_3 = 3$ часа простоя, которые могут быть использованы для заряда накопителя энергии.

Согласно данным, представленным на рис. 6, рассчитана затраченная электроэнергия за исследуемый цикл разряда путем интегрирования мгновенной энергии, затраченной за 1 секунду, по времени. Результатом данного интегрирования стало значение $E_{пр} = 22$ кВт · ч, затраченное за $t_{пр} = 0,35$ часа тяги.

Расчетное значение общей затраченной энергии можно определить через

соотношение:
$$E_p = \frac{E_{пр}}{t_{пр}} t_p.$$

Проведя расчеты, получаем, что затраченная энергия за суточный цикл работы равняется $E_p = 1320$ кВт · ч.

Аналогичным образом можно рассчитать энергию заряда, которую электровоз может получить в режиме простоя. На основании данных, представленных на рис. 10, рассчитано, что за $t_{пз} = 0,75$ часа заряда накопитель энергии получит $E_{пз} = 88,7$ кВт · ч. Расчетное значение полученной энергии за цикл работы по

соотношению $E_3 = \frac{E_{пз}}{t_{пз}} t_3$ будет равно 354,8 кВт · ч.

Максимальная затраченная энергия, согласно модели ездового цикла электровоза, приведенной в табл. 1, составляет 926 кВт · ч, а среднесуточная — 726 кВт · ч. По расчетам, выполненным в предыдущих разделах, затраченная энергия исследуемого электровоза составляет 1320 кВт · ч. С учетом вычитания энергии, которую накопитель может запасти в моменты простоя, скорректированное значение затраченной энергии будет равняться $1320 - 354,8 = 965,2$ кВт · ч. Данный результат остается ниже, чем максимальное по модели ездового цикла тепловоза.

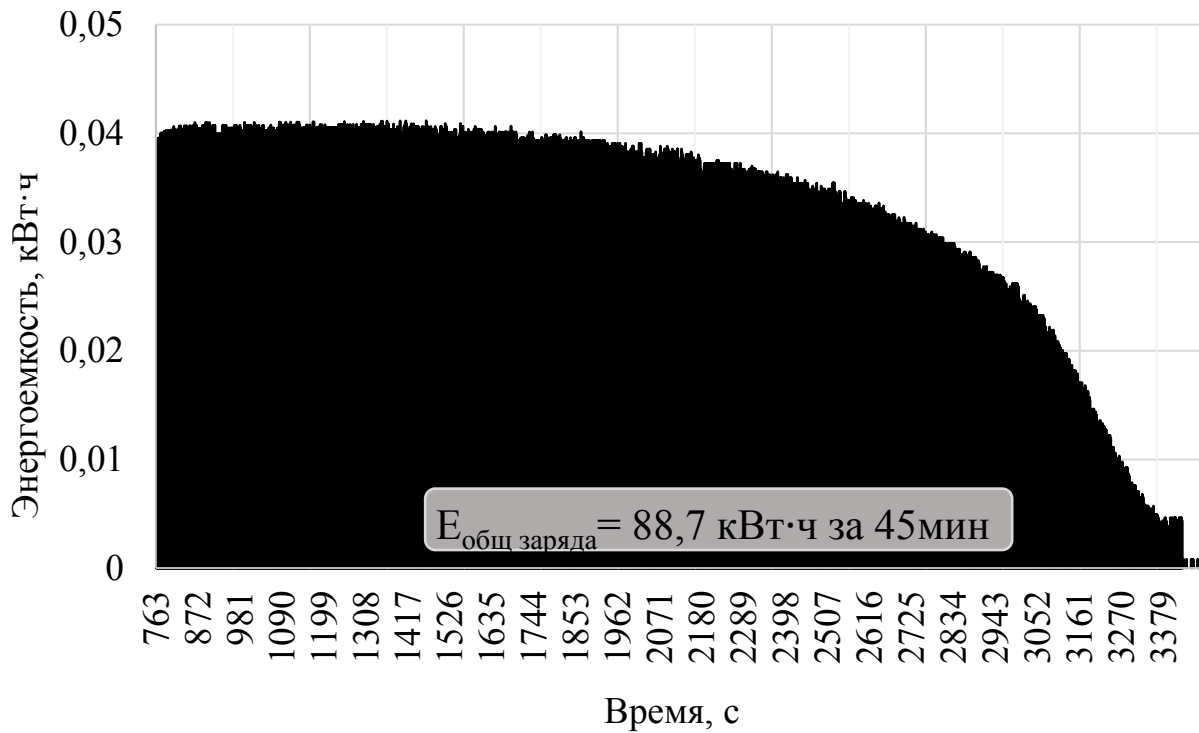


Рис. 10. Затраченная энергия накопителя электроэнергии на исследуемом промежутке времени заряда

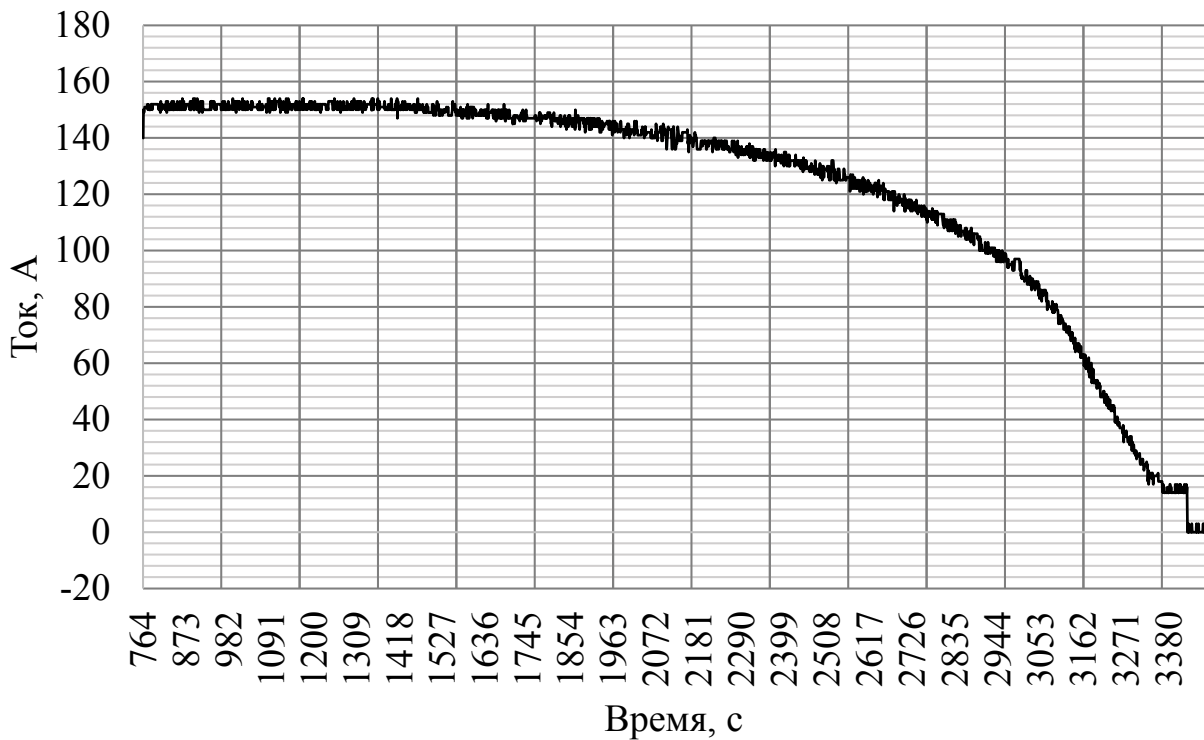


Рис. 11. Ток заряда накопителя электроэнергии на исследуемом промежутке времени разряда

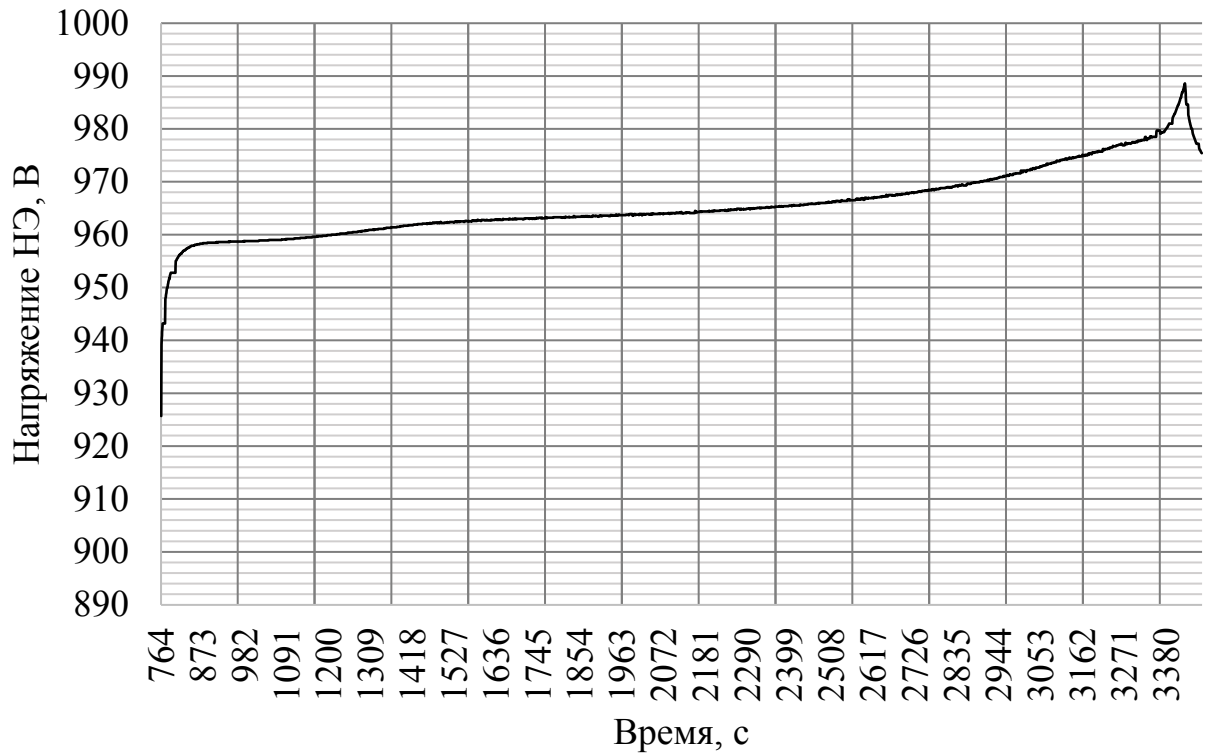


Рис. 12. Напряжение накопителя электроэнергии на исследуемом промежутке времени заряда

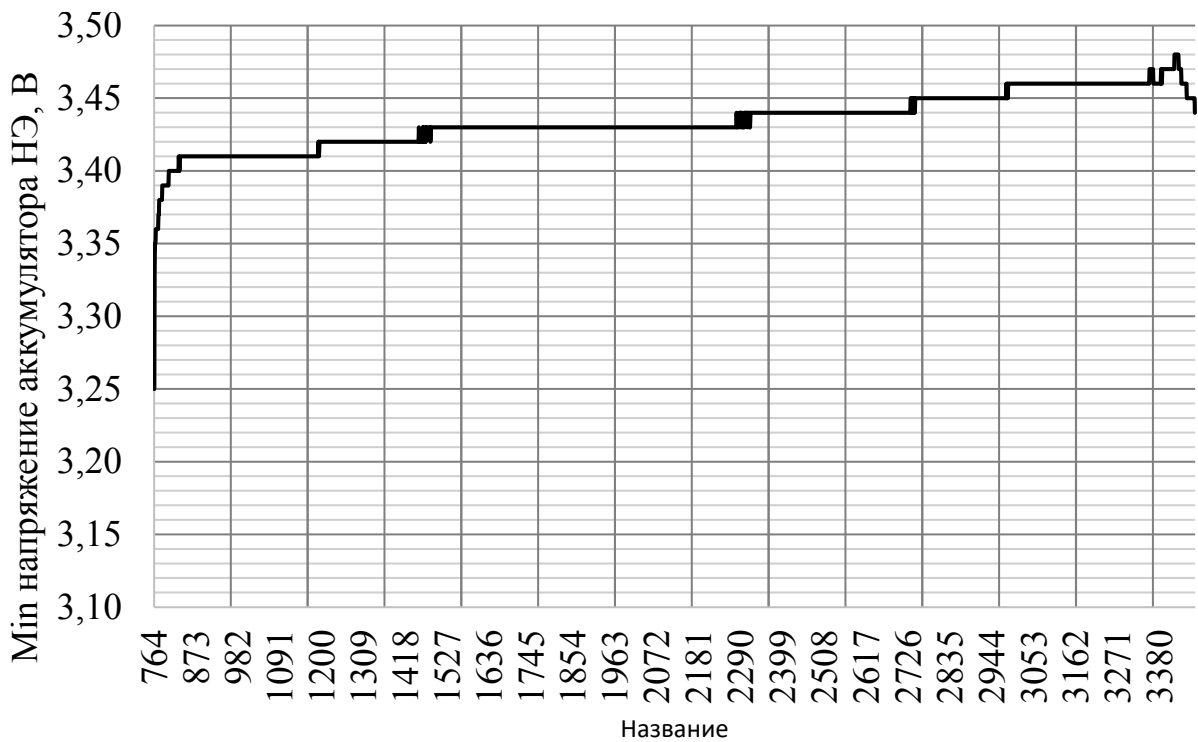


Рис. 13. Минимальное напряжение аккумуляторного элемента на исследуемом промежутке времени заряда

Надо отметить, что значение запасенной энергии получено при условии простоя электровоза. В реальных условиях существует возможность кратковременного подзаряда на всем участке пути, где присутствует контактная сеть. Такой режим работы можно видеть на рис. 1–4.

Дополнительно важно отметить, что заряд производился при значении тока 0,5С (рис. 11). Однако при режиме заряда в 1С возможно добиться показаний запасенной энергии в 2 раза выше.

Соответственно, можно считать, что батарея имеет достаточную энергоемкость, оптимальный размер и массу.

Заключение

В статье представлен разработанный цикл движения электровоза с экспериментальным накопителем электроэнергии при выполнении маневровых работ, а также результаты экспериментальных исследований НЭ при работе электровоза по ездовому циклу дизельного локомотива. По итогам анализа полученных данных можно сделать вывод, что характеристики НЭ удовлетворяют модели ездового цикла, а массогабаритные параметры экспериментального НЭ считаются оптимальными.

Результаты, полученные и представленные в этой статье, могут быть использованы для уточнения технических требований к накопителям электроэнергии железнодорожного транспорта.

Выявлено отсутствие резерва по емкости НЭ, эту задачу может решить добавление аккумуляторных ячеек, но при этом повышается масса, что может быть критичным фактором. Данную проблему можно решить путем повышения энергетической эффективности аккумулирующих элементов НЭ или применения в его составе двух вариантов электрохимии, влекущего усложнение конструкции, но в значительной степени повышение эффективности в процессе эксплуатации и на жизненном цикле, что влечет за собой последующий поиск решений и разработку программных и аппаратных комплексов для повышения их энергетической эффективности.

Список источников

1. Alekov S. F. Increasing the durability of diesel generator engines by using energy storage systems and optimizing operating modes / S. F. Alekov, A. A. Pegachkov // STEEL IN TRANSLATION 2024. — Pp. 220–225.
2. Marius A. G. Electric Drive Solution for Short Distance Passenger Railway Vehicles on Non-Electrified or Mixed Lines / A. G. Marius, P. Gabriel, A. Sorin // Electric Vehicles International Conference (EV) 2019. — 5 p.

3. Hoang-Phuong N. CO2 Reduction Potential by Putting Electric Vehicles into Operation in Phu Quoc Island, Viet Nam / N. Hoang-Phuong, V. Viet-Cuong, L. Tan-Dong et al. // IEEE Conference 2019. — 6 p.
4. Щуров Н. И. Анализ влияния режимов движения электромобилей на процесс старения тяговых аккумуляторов на основе цикла WLTC / Н. И. Щуров, А. А. Штанг, С. И. Дедов и др. // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. — 2020. — Т. 13(8). — С. 977–990.
5. Florian D. Modeling Large-Scale Manufacturing of Lithium-Ion Battery Cells: Impact of New Technologies on Production Economics / D. Florian // IEEE Transactions on Engineering Management 2023. — Pp. 6753–6769.
6. Mingyue J. Evaluation on Total Cost of Ownership of Electric Forklifts with lithium-ion battery / J. Mingyue, P. Fengwen, H. Xueqi et al. // IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC) 2021.
7. Umar S. Comparing the economic value of lithium-ion battery technologies in the nine wholesale electricity markets in North America 2022 / S. Umar, B. Sacha, J. Zekun et al. — Pp. 363–373.
8. ГОСТ Р 55364 — 2012. Электровозы. Общие технические требования. — М.: Стандартформ, 2013. — 36 с.
9. Федеральный закон от 22.07.2008 №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
10. ГОСТ 34394—2018. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав. Требования пожарной безопасности. М.: Стандартформ, 2018. — 19 с.
11. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» (редакция, действующая с 20 мая 2023 года). — 322 с.
12. Акуличев В. О. Применение мобильных систем накопления электрической энергии для электроснабжения удаленных потребителей малой и средней мощности / В.О. Акуличев, В. В. Микрюков, А.А. Пацев и др. // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2022. — № 6(75).
13. Аблазов Б. Г. Технология бесперебойного электроснабжения удаленных потребителей с применением мобильных систем накопления электрической энергии на базе литий-ионных аккумуляторных батарей / Б. Г. Аблазов, Е. В. Ежов, А. С. Куликов // Роснано. — URL: <https://www.rusnano.com/upload/documents/BMSNEE-Article.pdf>.
14. Helmut W. Battery powered high efficiency drive systems in practical applications / W. Helmut // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», г. Екатеринбург, 05–09 октября 2015 г. — Екатеринбург: УрФУ, 2015. — С. 163–166. — URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/35302> 2015.
15. Helmut W. Large lithium-ion battery-powered electric vehicles — from idea to reality / W. Helmut, W. Thomas, Z. Herbert // IEEE Conference 2018. — 5 p.
16. Shtang A. A. Battery-electric shunting locomotive with lithium-polymer storage batteries / A. A. Shtang, M. V. Yaroslavtsev // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST) 2016. — 4 p.

17. Yodsaphat W. A Design of Energy Storage System for Electric Locomotive / W. Yodsaphat, R. Tananat, T. Chanchai // IEEE Conference 2021. — 4 p.
18. Сокирка О. П. Дайджест перспективные технологии развития отрасли железнодорожного транспорта / О. П. Сокирка. — РОСЖЕЛДОР Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), 2023. — 124 с.
19. Алеков С. Ф. Обзор систем термостатирования литий-ионных ячеек аккумуляторной батареи / С. Ф. Алеков, Т. В. Голубчик // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2022. — № 6. — С. 20–25.
20. Голубчик Т. В. Результаты экспериментальных испытаний литий-железо-фосфатного аккумулятора производства компании «ЛИОТЕХ» в низкотемпературных условиях / Т. В. Голубчик, А. С. Куликов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2021. — № 1. — С. 17–20.
21. Михеев В. А. Оценка эксплуатационной экономичности дизельных локомотивов на заданном участке обслуживания / В. А. Михеев // Вестник СибАДИ. — 2015. — Вып. 1(41). — С. 91–96.
22. Михеев В. А. Расчет времени эксплуатационной работы дизель-генераторной установки тепловоза по позициям контроллера машиниста / В. А. Михеев // Вестник ИрГТУ. — 2010. — № 2(42). — С. 142–146.
23. Laxman T. Battery Degradation in Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Survey Study / T. Laxman, R. Payam, H. Phuong et al. // IEEE 2023. — Pp. 42431–42462.
24. Aramis P. Modelling the degradation process of lithium-ion batteries when operating at erratic state-of-charge swing ranges / P. Aramis, Q. Vanessa, R. Heraldo et al. // IEEE Conference 2017. — 6 p.
25. Ahmed S. A. Battery Energy Management Techniques for an Electric Vehicle Traction System / S. A. Ahmed, M. Shayok, R. Habibur // IEEE Access. 2022. — Vol. 10. — Pp. 84015–84037.
26. Mingyu L. Electric Vehicle Operation Scheduling Optimization Considering Electrochemical Characteristics of Li-ion Batteries / L. Mingyu, H. Bing, L. Shaofeng // 35th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). — 2020. — Pp. 89–94.
27. Wang H. The influence of operating conditions on discharge characteristics for traction battery / H. Wang, H. Sun, W. Chen et al. // 5th International Conference on Information Science and Control Engineering. — 2018. — Pp. 1286–1290.

Дата поступления: 01.12.2024

Решение о публикации: 14.02.2025

Контактная информация:

АЛЕКОВ Степан Федорович — аспирант; VirusApienz@yandex.ru

КУЛИКОВ Алексей Сергеевич — аспирант; mechanicbird@gmail.com

ГОЛУБЧИК Тимофей Владимирович — канд. техн. наук, доц.; golubchik@bmstu.ru

ИВАНОВ Михаил Алексеевич — руководитель департамента специальных проектов; ma.ivanov@tmholding.ru

Studying an Electric Locomotive Driving Cycle Model with an Experimental Electric Energy Storage Device for Shunting Operations

S. F. Alekov¹, A. S. Kulikov¹, T. V. Golubchik², M. A. Ivanov³

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64, Leningradskiy pr., Moscow, 125319, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 5, bld. 1, 2-ya Baumanskaya Str., Moscow, 105005, Russian Federation

³ООО “Tsentr Perspektivnykh Tekhnologii TMH”, fl. 3, pom. 28, rab. 1, Nobel Str., (Skolkovo Ter Innovation Center), Moscow, 121205, Russian Federation

For citation: Alekov S. F., Kulikov A. S., Golubchik T. V., Ivanov M. A. Studying an Electric Locomotive Driving Cycle Model with an Experimental Electric Energy Storage Device for Shunting Operations. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 88–105. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-88-105

Summary

Currently, there has been an active transition to electrified vehicles due to energy cost reduction and increased density of electro-chemical power sources. This has been manifested in the rolling stock electrification in the railway industry, especially in railway stations and depots where the use of diesel engines is limited due to environmental factors. In addition, electric locomotives can operate on non-electrified railway sections and this opens up new prospects for the sustainable development of transport infrastructure. **Purpose:** To study the technical parameters and energy characteristics of the electric energy storage for efficient use on electric locomotives. **Methods:** This article considers the key issues of energy of driving cycles and application of electric energy storage on electric locomotives. The experimental data obtained have been compared with the calculated ones. **Results:** A driving cycle model of a battery locomotive has been developed based on the calculation of the diesel generator (DGS) operating time of a traditional diesel locomotive. The experimental data on the energy storage system (ESS) operation as part of an electric locomotive, as well as the obtained data analysis are presented. The ESS technical parameters necessary for ensuring the electric locomotive efficient operation within the daily cycle of work at the railway station have been identified. **Practical significance:** The conducted studies have illustrated the energy parameters and operating modes of the contact-battery shunting locomotive during the workday. They allow determining the ESS parameters such as charge and discharge capacity and energy consumption average and maximum values. The study can promote the creation of more efficient mechanisms for the electrical energy accumulation and application, which will reduce the electric locomotive operating costs and increase their energy efficiency. Practical research of electrical energy storage devices can be useful not only for rail transport but also for other areas where efficient energy saving systems are essential.

Keywords: Electrical energy storage device, electric locomotive, driving cycles, lithium-ion battery, rail transport.

References

1. Alekov S. F., Pegachkov A. A. Increasing the durability of diesel generator engines by using energy storage systems and optimizing operating modes. *STEEL IN TRANSLATION* 2024, pp. 220–225.
2. Marius A. G., Gabriel P., Sorin A. Electric Drive Solution for Short Distance Passenger Railway Vehicles on Non-Electrified or Mixed Lines. *Electric Vehicles International Conference (EV) 2019*, 5 p.

3. Hoang-Phuong N., Viet-Cuong V., Tan-Dong L. et al. CO2 Reduction Potential by Putting Electric Vehicles into Operation in Phu Quoc Island, Viet Nam. IEEE Conference 2019, 6 p.
4. Shchurov N. I., Shtang A. A., Dedov S. I. et al. Analiz vliyaniya rezhimov dvizheniya elektromobiley na protsess stareniya tyagovykh akkumulyatorov na osnove tsikla WLTC [Analysis of the influence of electric vehicle driving modes on the aging process of traction batteries based on the WLTC cycle]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies]. 2020, vol. 13(8), pp. 977–990. (In Russian)
5. Florian D. Modeling Large-Scale Manufacturing of Lithium-Ion Battery Cells: Impact of New Technologies on Production Economics. IEEE Transactions on Engineering Management 2023, pp. 6753–6769.
6. Mingyue J., Fengwen P., Xueqi H. et al. Evaluation on Total Cost of Ownership of Electric Forklifts with lithium-ion battery. IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC) 2021.
7. Umar S., Sacha B., Zekun J. et al. Comparing the economic value of lithium-ion battery technologies in the nine wholesale electricity markets in North America 2022, pp. 363–373.
8. *GOST R 55364 — 2012. Elektrovozy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [GOST R 55364—2012. Electric locomotives. General technical requirements]. Moscow: Standartforms Publ., 2013, 36 p. (In Russian)
9. *Federal'nyy zakon ot 22.07.2008 № 123-FZ "Tekhnicheskiy reglament o trebovaniyakh pozharnoy bezopasnosti"* [Federal Law of 22.07.2008 № 123-FZ "Technical Regulations on Fire Safety Requirements"]. (In Russian)
10. *GOST 34394—2018. Lokomotivy i motorvagonnyy podvizhnoy sostav. Trebovaniya pozharnoy bezopasnosti* [GOST 34394—2018. Locomotives and multiple unit rolling stock. Fire safety requirements]. Moscow: Standartforms Publ., 2018, 19 p. (In Russian)
11. *Tekhnicheskiy reglament Tamozhennogo soyuza TR TS 018/2011 "O bezopasnosti kolesnykh transportnykh sredstv" (redaktsiya, deystvuyushchaya s 20 maya 2023 goda)* [Technical Regulations of the Customs Union TR CU 018/2011 "On the Safety of Wheeled Vehicles" (as amended on May 20, 2023)]. 322 p. (In Russian)
12. Akulichev V. O., Mikryukov V. V., Patsev A. A. et al. Primenenie mobil'nykh sistem nakopleniya elektricheskoy energii dlya elektrosnabzheniya udalennykh potrebiteley maloy i sredney moshchnosti [Application of mobile systems for storing electric energy for power supply of remote consumers of low and medium power]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electricity. Transmission and Distribution]. 2022, Iss. 6(75). (In Russian)
13. Ablazov B. G., Ezhov E. V., Kulikov A. S. Tekhnologiya bespereboynogo elektrosnabzheniya udalennykh potrebiteley s primeneniem mobil'nykh sistem nakopleniya elektricheskoy energii na baze lityi-ionnykh akkumulyatornykh batarey [Technology of uninterruptible power supply of remote consumers using mobile systems for storing electrical energy based on lithium-ion batteries]. *Rosnano* [Rusnano]. 2022. Available at: <https://www.rusnano.com/upload/documents/BMSNEE-Article.pdf>. (In Russian)
14. Helmut W. Battery powered high efficiency drive systems in practical applications. *Trudy Mezhdunarodnoy shestnadtsatoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektroprivody peremennogo toka"*, g. Ekaterinburg, 05–09 oktyabrya 2015 g. [Proceedings of the International Sixteenth Scientific and Technical Conference "AC Electric Drives", Yekaterinburg, October 5–9, 2015]. Available at: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/35302> 2015. (In Russian)
15. Helmut W., Thomas W., Herbert Z. Large lithium-ion battery-powered electric vehicles — from idea to reality. IEEE Conference 2018, 5 p.

16. Shtang A. A., Yaroslavtsev M. V. Battery-electric shunting locomotive with lithium-polymer storage batteries. 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST) 2016, 4 p.
17. Yodsaphat W., Tananat R., Chanchai T. A Design of Energy Storage System for Electric Locomotive. IEEE Conference 2021, 4 p.
18. Sokirka O. P. *Daydzhest perspektivnye tekhnologii razvitiya otrasli zheleznodorozhnogo transporta. ROSZHELDOR Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya" (FGBOU VO RGUPS)* [Digest of promising technologies for the development of the railway transport industry. ROSZHELDOR Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Rostov State University of Railway Engineering" (FGBOU VO RGUPS)]. 2023, 124 p. (In Russian)
19. Alekov S. F., Golubchik T. V. Obzor sistem termostatirovaniya litiy-ionnykh yacheek akkumulyatornoy batarei [Review of thermostating systems for lithium-ion battery cells]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Restoration. Modernization]. 2022, Iss. 6, pp. 20–25. (In Russian)
20. Golubchik T. V., Kulikov A. S. Rezul'taty eksperimental'nykh ispytaniy litiy-zhelezo-fosfatnogo akkumulyatora proizvodstva kompanii "LIOTEKh" v nizkotemperaturnykh usloviyakh [Results of experimental tests of lithium-iron-phosphate battery produced by LIOTECH company in low-temperature conditions]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2021, Iss. 1, pp. 17–20. (In Russian)
21. Mikheev V. A. Otsenka ekspluatatsionnoy ekonomichnosti dizel'nykh lokomotivov na zadannom uchastke obsluzhivaniya [Evaluation of operational efficiency of diesel locomotives on a given service section]. *Vestnik SibADI* [Bulletin of SibADI]. 2015, Iss. 1(41), pp. 91–96. (In Russian)
22. Mikheev V. A. Raschet vremeni ekspluatatsionnoy raboty dizel'-generatornoy ustanovki teplovoza po pozitsiyam kontrollera mashinista [Calculation of operational time of diesel generator set of diesel locomotive based on driver's controller positions]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of IrSTU]. 2010, Iss. 2(42), pp. 142–146. (In Russian)
23. Laxman T., Payam R., Phuong H. et al. Battery Degradation in Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Survey Study. IEEE 2023, pp. 42431–42462.
24. Aramis P., Vanessa Q., Heraldo R. et al. Modelling the degradation process of lithium-ion batteries when operating at erratic state-of-charge swing ranges. IEEE Conference 2017, 6 p.
25. Ahmed S. A., Shayok M., Habibur R. Battery Energy Management Techniques for an Electric Vehicle Traction System. IEEE Access, 2022, vol. 10, pp. 84015–84037.
26. Mingyu L., Bing H., Shaofeng L. Electric Vehicle Operation Scheduling Optimization Considering Electrochemical Characteristics of Li-ion Batteries. 35th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), 2020, pp. 89–94.
27. Wang H., Sun H., Chen W. et al. The influence of operating conditions on discharge characteristics for traction battery. 5th International Conference on Information Science and Control Engineering, 2018, pp. 1286–1290.

Received: December 01, 2024

Accepted: February 14, 2025

Author's information:

Stepan F. ALEKOV — Postgraduate Student; virusApienz@yandex.ru

Alexey S. KULIKOV — Postgraduate Student; mexanicbird@gmail.com

Timofey V. GOLUBCHIK — PhD in Engineering, Associate Professor; golubchik@bmstu.ru

Mikhail A. IVANOV — Head of Special Projects Department; ma.ivanov@tmholding.ru