

УДК 621.316

Анализ эффективности использования накопителей энергии на дизельных электропоездах на участке с малым пассажиропотоком Зеленогорск — Выборг

В. А. Шаряков, С. А. Теличенко, К. В. Марков

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шаряков В. А., Теличенко С. А., Марков К. В. Анализ эффективности использования накопителей энергии на дизельных электропоездах на участке с малым пассажиропотоком Зеленогорск — Выборг // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 149–157. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-149-157

Аннотация

Цель: Произвести анализ возможности интеграции накопителя энергии в дизельные поезда, определение технических характеристик и оценка его энергоэффективности, а также выявление направления для дальнейших исследований в этой области для повышения энергетической эффективности железнодорожного транспорта, снижение эксплуатационных расходов и минимизация воздействия на окружающую среду. **Методы:** Исследованы особенности участка Зеленогорск — Выборг, включая уклоны, кривые и ограничения скорости, для оценки потенциала рекуперации энергии при торможении и простоях подвижного состава. Построена математическая модель на базе Simulink с использованием основных уравнений энергетического баланса в дизельном приводе на локомотивах. Модель учитывает такие факторы, как мощность тяговых двигателей, характеристики передачи, массу поезда и профиль пути. **Результаты:** Установлена емкость накопителя энергии, достаточного для аккумуляции энергии, рекуперированной при торможении и простоях. Интеграция накопителей энергии позволяет оптимизировать работу дизельного генератора, снизить пиковые нагрузки и улучшить характеристики разгона, особенно на сложных участках маршрута. **Практическая значимость:** Работа позволяет дать теоретическое обоснование для использования накопителей энергии на дизельном подвижном составе. Предложенная система повышает энергоэффективность дизельных поездов за счет рекуперации и повторного использования энергии. Повышение энергоэффективности и снижение износа дизельного двигателя приводят к сокращению эксплуатационных и ремонтных расходов. Система обеспечивает более плавный разгон и торможение, улучшая комфорт пассажиров, особенно на маршрутах с переменным рельефом. Подобные технологии уже успешно применяются на электропоездах и гибридных транспортных средствах, что подтверждает их эффективность в снижении расхода энергии и улучшении экологических характеристик.

Ключевые слова: Накопитель энергии, рельсовый автобус, аккумулятор, дизель-поезд, энергоэффективность, моделирование электрооборудования.

Современные транспортные системы находятся в постоянном поиске решений, позволяющих повысить их эффективность, снизить эксплуатационные расходы и минимизировать экологическое воздействие. В частности, дизельные поезда, которые остаются важной частью железнодорожного транспорта в регионах с недостаточным развитием электрификации, сталкиваются с вызовами,

связанными с высоким уровнем выбросов углекислого газа и значительными затратами на топливо [1].

Внедрение накопителей энергии в дизельные поезда открывает дополнительные возможности, такие как обеспечение плавности работы двигателя, снижение пиковых нагрузок и увеличение срока службы компонентов силовой установки. Однако реализация таких решений требует комплексного подхода, включающего разработку подходящей архитектуры системы, оптимизацию алгоритмов управления и оценку экономической эффективности [2, 3].

На неэлектрифицированном участке Зеленогорск — Выборг движение осуществляется рельсовыми автобусами, работающими на дизельном топливе. Эти составы хорошо приспособлены для маршрутов с небольшим пассажиропотоком, обеспечивая стабильное движение при отсутствии контактной сети. Рельсовые автобусы также удобны на участках с переменным рельефом, характерным для данного маршрута. Они могут маневрировать на кривых с небольшим радиусом и справляться с уклонами, однако ограничены по скорости и требуют регулярного технического обслуживания для поддержания эффективности и безопасности.

Данный участок может обслуживаться поездами типа РА-3. Это дизель-поезд, разработанный для использования на неэлектрифицированных железнодорожных линиях, способный развивать скорость до 120 км/ч. Состав может включать от одного до трех вагонов, в зависимости от пассажиропотока и потребностей маршрута.

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики РА-3

Параметр	Величина
Конструкционная скорость	120 км/ч
Мощность двигателя силовой установки при 1800 об/мин	360 кВт (482 л. с.)
Масса вагона (тара), т	51 т (Г) и 50,5 т (И)
Тип передачи	Гидравлическая Voith
Населенность вагона расчетная, чел.	121 (И) / 110 (Г)
Запас топлива, л	700
Удельный расход топлива на номинальной мощности, г/кВтч	210 + 5 %
Максимальный крутящий момент на выходе двигателя силовой установки при 1300 об/мин, Н · м	2200
Максимальный крутящий момент на выходе гидропередачи силовой установки, Н · м	6000
Мощность (макс.) бортового генератора при 3000 мин ⁻¹	3000
Среднее ускорение (для двухвагонного РА-3) при расчетной населенности на прямом горизонтальном участке пути в диапазоне скоростей от 0 до 60 км/ч, м/с ²	0,37

ОАО «РЖД» в нормативной документации прописывает максимальное непогащенное ускорение для пассажирских поездов в 0,7 м/с², по условиям максимально возможного центробежного ускорения, при котором люди чувствуют себя

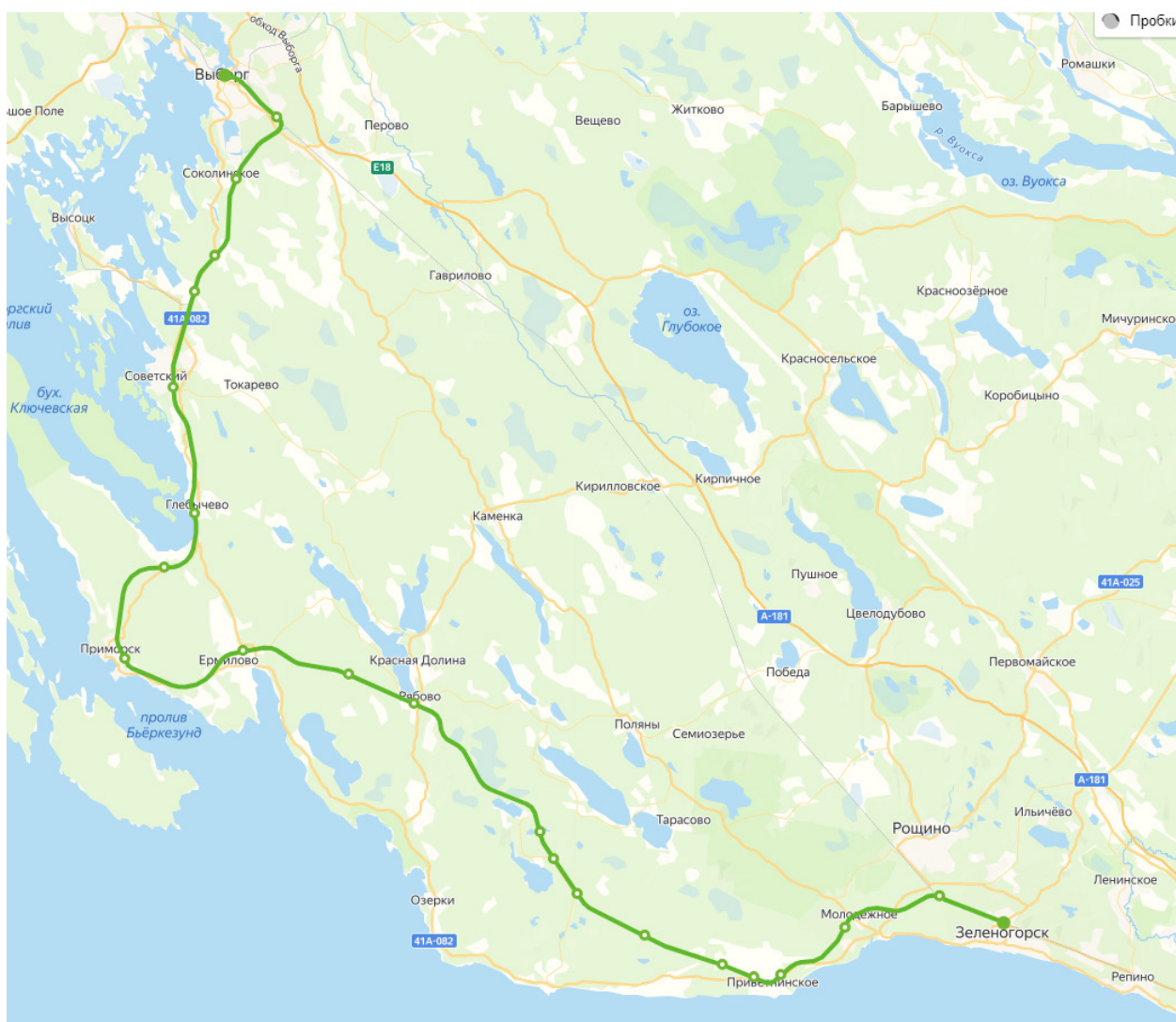


Рис. 1. Карта неэлектрифицированного участка пути Зеленогорск — Выборг

комфортно. При классической эксплуатации для двухвагонного состава при расчетной заполненности пассажирами на прямом горизонтальном участке пути в диапазоне скоростей от 0 до 60 км/ч среднее ускорение составляет $0,37 \text{ м/с}^2$. Данный факт показывает недостатки дизельной установки, применение которой ограничивает диапазон ускорений при эксплуатации рельсовых автобусов.

Эффективность применения электрической передачи в сравнении с гидравлической уже давно не новость. Электрическая передача энергии позволяет добиться большего КПД, производить устойчивое динамическое торможение в широком диапазоне нагрузок и скоростей [4, 5].

Применение асинхронного тягового привода в паре с накопителем для передачи энергии от дизельной установки на колесную пару позволяет повысить энергоэффективность тягового привода и обеспечить накопление энергии во время краткосрочных стоянок (без остановки дизельного агрегата) и рекуперативного торможения [6].

ТАБЛИЦА 2. Данные профиля пути на неэлектрифицированном участке Зеленогорск — Выборг

Участок	Протяженность, м	Средний приведенный уклон, ‰	Средний приведенный уклон с учетом кривых, ‰	Средние скорости движения на участке, км/ч
Зеленогорск — пл. Ушково	4800	1,85	1,85	48
пл. Ушково — о. п. Молодежная	7000	-0,84	-0,57	47
о. п. Молодежная — Приветненское	5700	-3,49	-3,46	49
Приветненское — о. п. 70 км	2600	4,70	5,22	22
о. п. 70 км — о. п. 72 км	1780	3,58	3,58	27
о. п. 72 км — о. п. Местерьярви	5620	6,41	6,41	37
о. п. Местерьярви — о. п. Япиля	5500	0,46	0,46	47
о. п. Япиля — о. п. Зеркальный	3000	-2,59	-2,59	36
о. п. Зеркальный — о. п. Тарасовское	2000	4,37	4,37	30
о. п. Тарасовское — Куолемаярви	14 000	-3,33	-3,29	60
Куолемаярви — о. п. 106 км	4000	0,15	0,15	30
о. п. 106 км — Ермилово	7000	-3,50	-3,47	38
Ермилово — Приморск	9500	0,65	0,69	34
Приморск — о. п. Бор	8200	1,62	1,66	41
о. п. Бор — Прибылово	4800	-4,19	-4,17	32
Прибылово — Советский	9000	1,58	1,58	36
Советский — Попово	6500	-0,92	-0,92	56
Попово — о. п. Матросово	3000	-2,57	-2,57	30
о. п. Матросово — о. п. Соколинское	5500	-2,03	-2,02	47
о. п. Соколинское — Лазоревка	5300	-0,90	-0,84	35
Лазоревка — Выборг пасс.	4700	0,06	0,06	28

Маршрут поезда на участке Зеленогорск — Выборг включает в себя разнообразный рельеф с частыми переменными уклонами и кривыми, что типично для данной местности. Большинство кривых радиусом 600–1200 м, но встречаются также более резкие повороты. Уклоны в основном составляют до 10 ‰, но иногда могут достигать 12 ‰, особенно на участках Ермилово — Приморск — Советское. Этот профиль был разработан с учетом местных особенностей, чтобы поддерживать стабильную скорость и минимизировать нагрузку на состав и рельсы.

Для рассмотрения возможности применения на данном участке накопителя энергии была разработана математическая модель поезда [7, 8]. Модель позволяет учитывать некоторые особенности подвижного состава, такие как мощность тяговых двигателей, особенности тяговой передачи, массогабаритные параметры, а также позволяет учесть особенности характера движения на маршруте следования путем задачи профиля пути и ограничений по скоростям движения [9, 10].

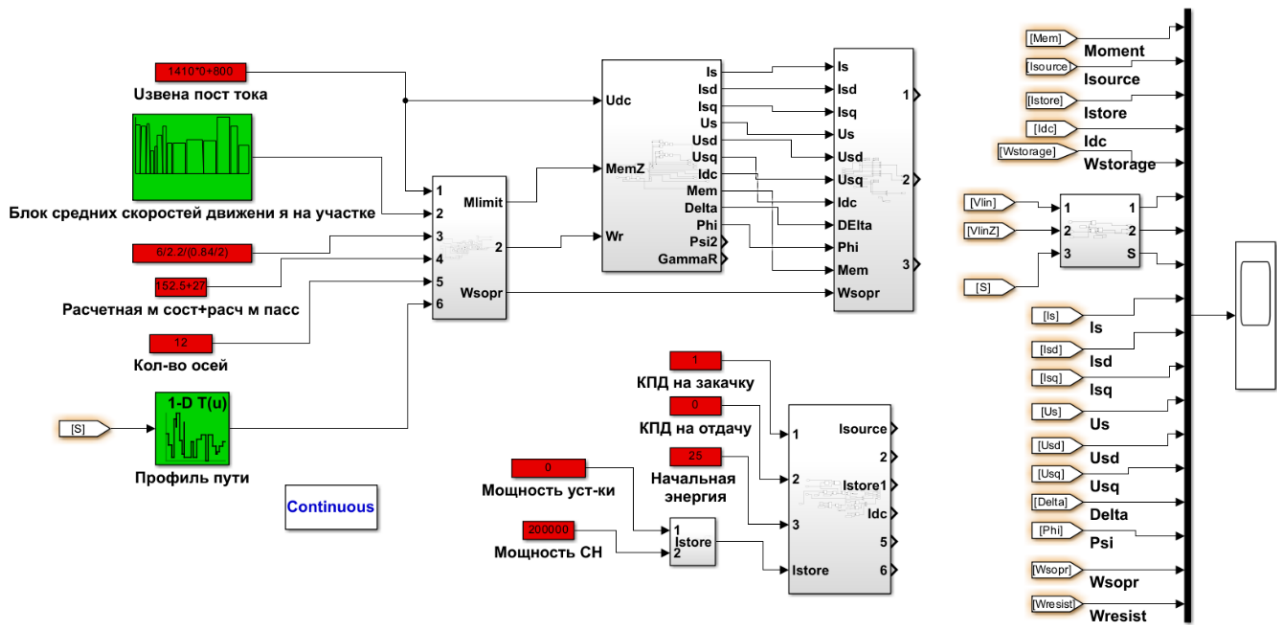


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели Matlab Simulink

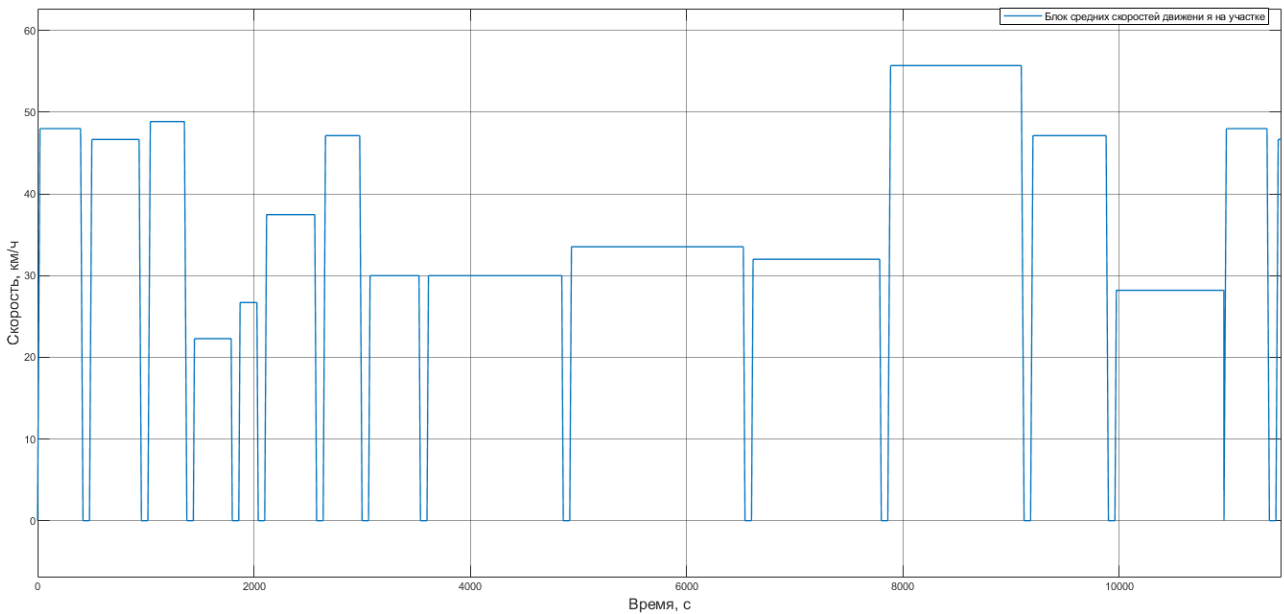


Рис. 3. Заданные ограничения скорости движения на участке Зеленогорск — Выборг

Полученные в модели данные после обработки позволяют определить зависимости:

$$W_{\text{МГН}} = \int I_{dc} U_{dc} dt.$$

За время прохождения маршрута, которое составило 11 000 с, был пройден путь в 120 км, а достигнутое значение потребляемой энергии составило 49 МДж, что соответствует 4,5 кВт потребляемой мощности.

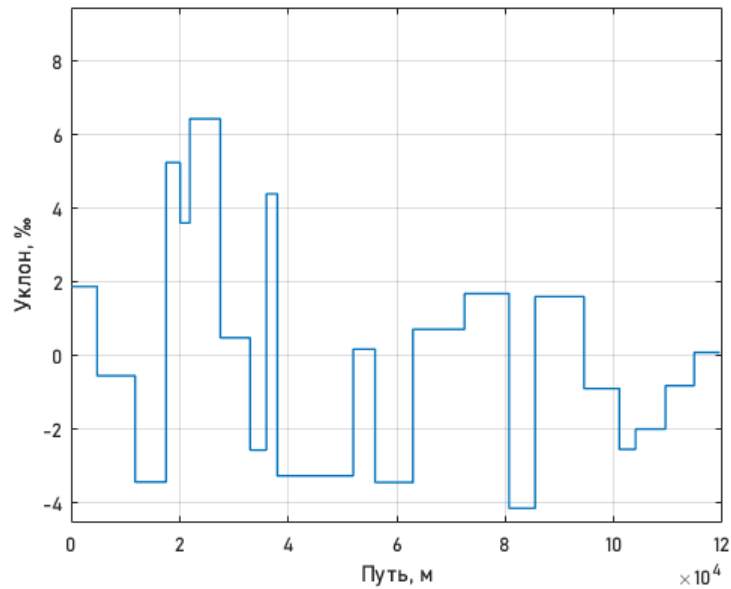


Рис. 4. Задаваемый усредненный профиль пути на участке Зеленогорск — Выборг

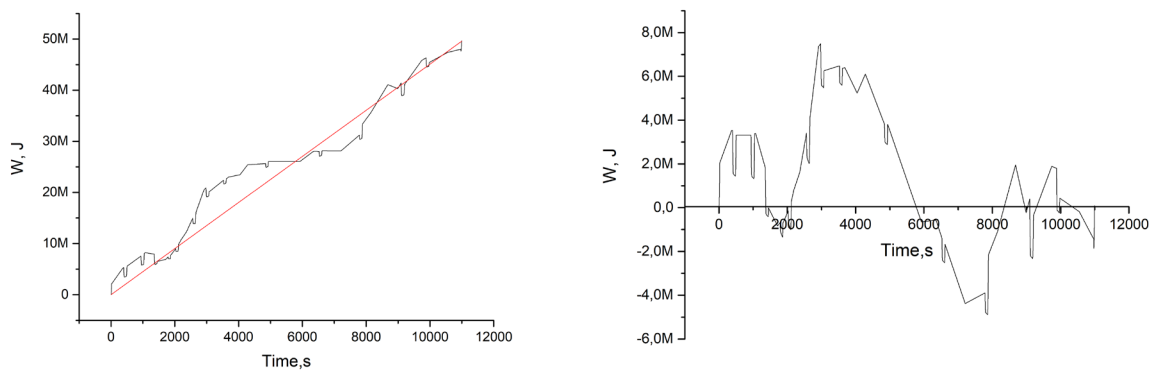


Рис. 5. Зависимость затрачиваемой энергии от времени движения

Установлено, что на данном участке для аккумуляции энергии, рекуперированной при торможении и при простое дизеля, необходимо иметь батарею с запасом энергии около 5 МДж в расчете на одну ось. Накопленная аккумуляторной батареей энергия позволит восполнять ее недостаток для питания тягового двигателя на сложных участках пути, улучшая режим работы дизельного генератора.

Список источников

1. Колпахчян П. Г. Особенности проектирования контактно-аккумуляторного маневрового электровоза / П. Г. Колпахчян, А. М. Евстафьев, В. В. Никитин и др. // Электротехника. — 2021. — № 10. — С. 15–20.
2. Обухов М. Ю. Применение гибридного мотор-вагонного подвижного состава с накопителями энергии в пригородном сообщении / М. Ю. Обухов, И. П. Викулов // Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава ско-

ростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: материалы VIII Международного симпозиума «Элтранс-2015», Санкт-Петербург, 07–09 октября 2015 года. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. — С. 336–343.

3. Зарифьян А. А. Мировой опыт в гибридном локомотивостроении / А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе, Н. В. Романченко и др. // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2016. — № 3(36). — С. 54–59.

4. Зарифьян А. А. Обзор конструкций тягового подвижного состава, оснащенных гибридным тяговым приводом / А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, про-изводство». Т. 1. Технические науки. — Ростов-на-Дону: РГУПС, 2017. — С. 136–139.

5. Талахадзе Т. З. Применение гибридных технологий на электроподвижном составе / Т. З. Талахадзе, Н. В. Романченко, А. А. Зарифьян и др. // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 4(49). — С. 111–114.

6. Андриященко А. А. Асинхронный тяговый привод локомотивов / А. А. Андриященко, Ю. В. Бабков и др. — М.: УМЦ ЖДТ, 2013. — 413 с.

7. Якушев А. Я. Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя / А. Я. Якушев, Т. М. Назирхонов, И. П. Викулов и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2019. — № 4. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredele-nie-osnovnyh-parametrov-asinhronnogo-tyagovogo-elektrodvigatelya>.

8. Ballois Le S. An experimental setup to study a hybrid drive train for a shunting locomotive / S. Le Ballois, T. Talakhadze, L. Vido et al. // 11th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EV-ER2016), April 6–8, 2016, Monte-Carlo (Monaco). Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. — DOI: 10.1109/EVER.2016.7476355.

9. Kolpakhchyan P. G. The determination of the asynchronous traction motor characteristics of locomotive / P. G. Kolpakhchyan, A. R. Shaikhiev, A. E. Kochin et al. // Advances in Electrical and Electronic Engineering. — 2017. — Vol. 15. — Iss. 2. — Pp. 130–135.

10. Kolpakhchyan P. Systems approach to the analysis of electromechanical processes in the asynchronous traction drive of an electric locomotive / P. Kolpakhchyan, A. Zarifian, A. Andruschenko // Studies in Systems, Decision and Control. — 2017. — Vol. 87. — Pp. 67–134. — DOI: 10.1007/978-3-319-51502-1_3.

Дата поступления: 05.01.2025

Решение о публикации: 16.02.2025

Контактная информация:

ШАРЯКОВ Владимир Анатольевич — канд. техн. наук, доц.; v_a_shar@mail.ru

МАРКОВ Кирилл Викторович — ст. преподаватель; markov@pgups.ru

ТЕЛИЧЕНКО Станислав Алексеевич — ст. преподаватель; telichenko@pgups.ru

Analyzing the Energy Storage System Efficiency Onboard Diesel-Electric Trains on the Zelenogorsk — Vyborg Railway with Low Passenger Traffic

V. A. Sharyakov, K. V. Markov, S. A. Telichenko

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Sharyakov V. A., Telichenko S. A., Markov K. V. Analyzing the Energy Storage System Efficiency Onboard Diesel-Electric Trains on the Zelenogorsk — Vyborg Railway with Low Passenger Traffic. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 149–157. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-149-157

Summary

Purpose: To analyze the feasibility of integrating the energy storage system into diesel trains, to determine its technical parameters, and to evaluate its energy efficiency. Additionally, to identify further research areas in this field aimed at improving the energy efficiency of railway transport, reducing operational costs, and minimizing environmental impact. **Methods:** The specific features of the Zelenogorsk-Vyborg line including gradients, curves and speed limits were investigated to assess the potential for energy recovery during train braking and idling. A *Simulink*-based mathematical model was built using the basic equations of the energy balance in the locomotive diesel drive. The model includes such factors as traction engine power, transmission characteristics, train weight and track profile. **Results:** The study has determined the capacity of the energy storage system required for energy recovery during braking and idling periods. The integration of the energy storage system will optimize the diesel generator operation, reduce peak loads, and improve acceleration performance, particularly, on difficult route sections. **Practical significance:** The study provides a theoretical foundation for applying the energy storage system in diesel rolling stock. The proposed system enhances the energy efficiency of diesel trains by recovering and reusing energy. Improved energy efficiency and reduced wear of the diesel engine lead to lower operational and maintenance costs. The system ensures smoother acceleration and braking enhancing passenger comfort, especially on routes with variable terrain. Similar technologies have already been successfully implemented in electric trains and hybrid vehicles confirming their effectiveness in reducing energy consumption and improving environmental performance.

Keywords: Energy storage, road-rail bus, battery, diesel train, energy efficiency, electrical equipment modelling.

References

1. Kolpakhch'yan P. G., Evstaf'ev A. M., Nikitin V. V. et al. Osobennosti proektirovaniya kontaktno-akkumulyatornogo manevrovogo elektrovoza [Design Features of a Contact-Battery Shunting Electric Locomotive]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2021, Iss. 10, pp. 15–20. (In Russian)
2. Obukhov M. Yu., Vikulov I. P. Primenenie gibridnogo motor-vagonnogo podvizhnogo sostava s nakopitel'yami energii v prigorodnom soobshchenii [Use of Hybrid Motor-Car Rolling Stock with Energy Storage Units in Suburban Traffic]. *Elektrifikatsiya, razvitie elektroenergeticheskoy infrastruktury i elektricheskogo podvizhnogo sostava skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta: materialy VIII Mezhdunarodnogo simpoziuma "Eltrans-2015", Sankt-Peterburg, 07–09 oktyabrya 2015 goda* [Electrification, Development of Electric Power Infrastructure and Electric Rolling Stock of High-Speed and High-Speed Rail Transport: Proceedings

of the VIII International Symposium “Eltrans-2015”, St. Petersburg, October 7–9, 2015]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2017, pp. 336–343. (In Russian)

3. Zarif’yan A. A., Talakhadze T. Z., Romanchenko N. V. et al. Mirovoy opyt v gibridnom lokomotivostroenii [World experience in hybrid locomotive building]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University]. 2016, Iss. 3(36), pp. 54–59. (In Russian)

4. Zarif’yan A. A., Talakhadze T. Z. Obzor konstruktsiy tyagovogo podvizhnogo sostava, osnashchennykh gibridnym tyagovym privodom [Review of traction rolling stock designs equipped with a hybrid traction drive]. *Sbornik nauchnykh trudov “Transport: nauka, obrazovanie, pro-izvodstvo”. T. 1. Tekhnicheskie nauki* [Collection of scientific papers “Transport: science, education, production”. Vol. 1. Technical sciences]. Rostov-on-Don: RGUPS Publ., 2017, pp. 136–139. (In Russian)

5. Talakhadze T. Z., Romanchenko N. V., Zarif’yan A. A. et al. Primenenie gibridnykh tekhnologiy na elektropodvizhnom sostave [Application of hybrid technologies on electric rolling stock]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State University of Railway Engineering]. 2019, Iss. 4(49), pp. 111–114. (In Russian)

6. Andryushchenko A. A., Babkov Yu. V. et al. *Asinkhronnyy tyagovyy privod lokomotivov* [Asynchronous traction drive of locomotives]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2013, 413 p. (In Russian)

7. Yakushev A. Ya., Nazirkhonov T. M., Vikulov I. P. et al. Opredelenie osnovnykh parametrov asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya [Definition of the main parameters of an asynchronous traction electric motor]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2019, Iss. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-osnovnyh-parametrov-asinhronnogo-tyagovogo-elektrodvigatelya>. (In Russian)

8. Ballois Le S., Talakhadze T., Vido L. et al. An experimental setup to study a hybrid drive train for a shunting locomotive. 11th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EV-ER2016), April 6–8, 2016, Monte-Carlo (Monaco). Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. DOI: 10.1109/EVER.2016.7476355.

9. Kolpakhchyan P. G., Shaikhiev A. R., Kochin A. E. et al. The determination of the asynchronous traction motor characteristics of locomotive. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2017, vol. 15, Iss. 2, pp. 130–135.

10. Kolpakhchyan P., Zarifian A., Andruschenko A. Systems approach to the analysis of electromechanical processes in the asynchronous traction drive of an electric locomotive. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2017, vol. 87, pp. 67–134. DOI: 10.1007/978-3-319-51502-1_3.

Received: January 05, 2025

Accepted: February 16, 2025

Author’s information:

Vladimir A. SHARYAKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; v_a_shar@mail.ru

Kirill V. MARKOV — Senior Lecturer; markov@pgups.ru

Stanislav A. TELICHENKO — Senior Lecturer; telichenko@pgups.ru