

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.2:629.424.1:621.316

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-1-3>

Использование электрических накопителей для повышения тяговых свойств автономных локомотивов



Григорий КУЗНЕЦОВ



Елена ЛОГИНОВА



Константин КУДЕЛИН

Григорий Юрьевич Кузнецов ¹, Елена Юрьевна Логинова ², Константин Витальевич Куделин ³

^{1, 2, 3} Российский университет транспорта, Москва, Россия.

³ ОАО «РЖД», Москва, Россия.

³ ORCID 0000-0002-3321-1176; РИНЦ SPIN-код: 8033-3805.

✉ ³ konstantin-97@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

На основании анализа зарубежного опыта разработки автономных локомотивов с гибридной энергетической установкой обоснована возможность повышения эффективности работы тепловозов за счет использования электрических накопителей энергии.

Предложена принципиальная схема энергетической системы тепловоза, источником энергии в которой наряду с дизелем является тяговая аккумуляторная батарея с импульсным прерывателем постоянного напряжения. Разработан алгоритм управления тяговым приводом тепловоза с гибридной энергетической установкой, обеспечивающий повышение тяговой силы локомотива на тяжелых участках профиля. Модернизация энергетической системы тепловоза путем применения гибридной энергетической установки рассмотрена применительно к тепловозу 2ТЭ116. С использованием уравнений энергетического баланса тяго-

вого электродвигателя разработана математическая модель работы тягового привода тепловоза с питанием от гибридного источника энергии через управляемый прерыватель напряжения. Методами численного моделирования в программных средах MatLab и LabView выполнен расчет тяговой характеристики тепловоза 2ТЭ116 со штатной энергетической установкой и гибридной энергетической установкой. Показано, что во всем диапазоне рабочих скоростей движения тепловоз с гибридной энергетической установкой позволяет получить силу тяги на 15 % выше, чем тепловоз со штатной энергетической системой. Расчеты обосновали, что повышение тяговых свойств модернизированного тепловоза 2ТЭ116 дает возможность на 15 % повысить расчетный вес состава, а соответственно и эффективность использования локомотива как тяговой единицы на сети железных дорог.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, электрические накопители энергии, гибридная энергетическая установка, повышение эксплуатационных характеристик магистрального тепловоза.

Для цитирования: Кузнецов Г. Ю., Логинова Е. Ю., Куделин К. В. Использование электрических накопителей для повышения тяговых свойств автономных локомотивов // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 1 (110). С. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-1-3>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях роста объемов перевозок железнодорожным транспортом формируются потребности в максимальном использовании провозной способности подвижного состава. Это в полной мере относится к развитию железнодорожного транспорта в России и ОАО «РЖД»¹ [1; 2].

В рамках технического развития конструкторскими отделами и инженерными центрами постоянно поднимаются вопросы по изготовлению современных, более мощных локомотивов, которые реализуют более высокие тяговые усилия и способны перевозить большее количество грузов.

Одним из способов повышения тяговой эффективности локомотивов является улучшение их конструкции посредством модернизации, которая заключается в применении более современных технических устройств.

В настоящее время получает распространение тяговый подвижной состав с гибридными источниками энергии. В Германии эксплуатируются гибридный маневровый локомотив Prima H3 производства компании Alstom с литиевыми тяговыми аккумуляторами, массой 67 тонн, силой тяги при трогании 225 кН, мощностью 700 кВт [3]. В России машиностроительным холдингом АО «Трансмашхолдинг» был спроектирован и представлен на Международном железнодорожном салоне пространства 1520 «PRO//Движение. Экспо» гибридный автономный маневровый локомотив с мощностью тяговых накопителей энергии в 240 кВт². В Швейцарии в настоящее время ведутся работы по производству

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 год. [Электронный ресурс]: <https://mintrans.gov.ru/file/473193>. Доступ 17.09.2023.

² Маневровый гибридный тепловоз ТЭМ5Х. [Электронный ресурс]: <https://sitmag.ru/article/25569/manevrovyy-gibridniy-teplovoz-tem5h-gibridniy-avtonomniy-lokomotiv-obrel-plot>. Доступ 02.10.2023.

двухрежимного локомотива новой серии 93 с использованием литий-титанат-оксидных аккумуляторов, с питанием от контактной сети переменного тока 25 кВ частотой 50 Гц, с мощностью самого локомотива 1300 кВт [4].

Целью исследования является применение накопителей энергии на автономном подвижном составе путем внесения изменений в штатную конструкцию классического тепловоза 2ТЭ116 с передачей переменного-постоянного тока.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследуемый тепловоз 2ТЭ116 представляет собой локомотив, который в качестве первичного источника энергии использует дизельный двигатель внутреннего сгорания (Д). Его функциональная электромеханическая схема представлена на рис. 1. Дизельный двигатель применяется на локомотивах по причине высокой надежности и более высокой развиваемой мощности [5]. Двигатель преобразует химическую энергию топлива в механическую энергию вращения коленчатого вала. Механическая энергия преобразуется в электрическую посредством вращения ротора (Р) синхронного генератора (ТСГ), который преобразует механическую энергию вращения в электрическую энергию переменного тока. Пособием использования выпрямительной установки (ВП) переменный ток преобразуется в постоянный [6] и подается на тяговые электродвигатели локомотива (ТЭД). Тяговые электродвигатели локомотива представляют собой электрическую машину, которая преобразует электрическую энергию в механическую энергию вращения. В целях реализации большой величины вращающего момента для трогания с места локомотива применяется тяговый зубчатый редуктор (ЗР), который увеличивает момент, но уменьшает частоту вращения. В дальнейшем вращение с большой величиной момента передается на колесную пару локомотива и приводят ее в движение.

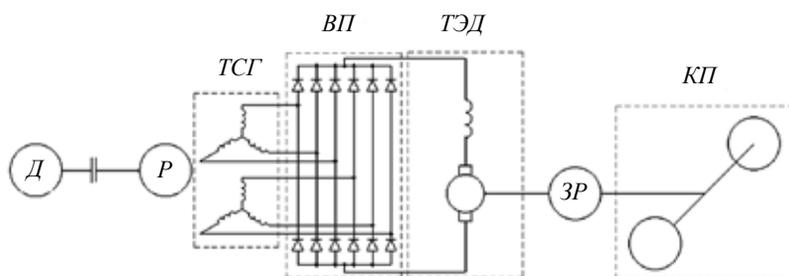


Рис. 1. Функциональная электромеханическая схема традиционного тепловоза 2ТЭ116 [выполнена авторами].



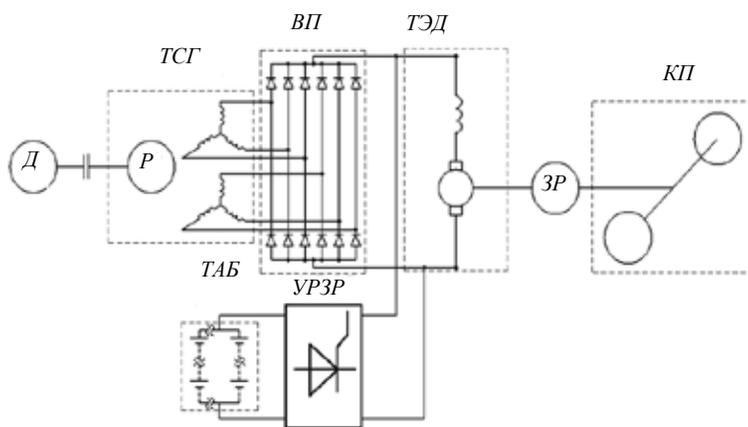


Рис. 2. Функциональная электромеханическая схема гибридного тепловоза 2ТЭ116 [выполнена авторами].

Функциональная электромеханическая схема гибридного тепловоза 2ТЭ116 представлена на рис. 2.

Изменение конструкции локомотива для превращения его в гибридный заключается в установке дополнительного накопителя энергии, частным случаем которого является тяговая аккумуляторная батарея (ТАБ). В конструкции локомотива ТАБ служит для реализации электродинамического рекуперативного торможения, а также для придания дополнительной мощности локомотиву на тяжелых участках пути для прохождения расчетных подъемов. Также тяговая аккумуляторная батарея может заменить собой штатную тяговую аккумуляторную батарею и обеспечивать запуск дизельного двигателя внутреннего сгорания, питание бортовой сети и питание вспомогательных нужд локомотива. Для регулирования зарядно-разрядных токов тяговой аккумуляторной батареи необходима установка устройства регулирования заряда-разряда (УРЗР), которое представляет собой двухсторонний импульсный прерыватель постоянного напряжения. Таким образом, данное устройство будет контролировать максимально допустимые для тяговой аккумуляторной батареи зарядно-разрядные токи.

Функциональное применение тяговой электрической батареи заключается в реализации ее на тяжелых участках пути посредством параллельного ее подключения с тяговым синхронным генератором к тяговым электродвигателям.

Сила тяги локомотива с электрической передачей зависит от механического момента на тяговом электродвигателе, радиуса колес

колесной пары локомотива и передаточного отношения тягового зубчатого редуктора, Н:

$$F_k = \frac{n_{oc} \cdot M_k \cdot i}{R_k}, \quad (1)$$

где n_{oc} – количество моторных осей локомотива, шт;

M_k – момент, создаваемый тяговым электродвигателем, Нм;

i – передаточное число тягового зубчатого редуктора;

R_k – радиус колесной пары локомотива, м.

Количество осей, радиус колесных пар локомотива и передаточное число тягового зубчатого редуктора являются конструктивными параметрами локомотива, которые не могут изменяться в процессе его работы. Таким образом, значение силы тяги локомотива можно увеличить посредством увеличения момента на тяговых электродвигателях.

Известно³, что момент электрического двигателя постоянного тока последовательного возбуждения определяется зависимостью, Нм:

$$M_k = c_m \cdot I_y \cdot \Phi_v = c_m \cdot I_y \cdot I_v = c_m \cdot I_y^2, \quad (2)$$

где c_m – конструктивная постоянная электродвигателя;

I_y – ток, протекающий по обмотке якоря, А;

I_v – ток, протекающий по обмотке возбуждения, А;

Φ_v – магнитный поток обмотки возбуждения, Вб.

³ Проскуряков В. С., Соболев С. В. Расчет электрических машин: Учеб. пособие. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск. Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 112 с. [Электронный ресурс]: https://portal.tpu.ru/SHARED/v/VOV/uchebnaya_rabota/Tab1/Tab/UP1.pdf. Доступ 02.10.2023.

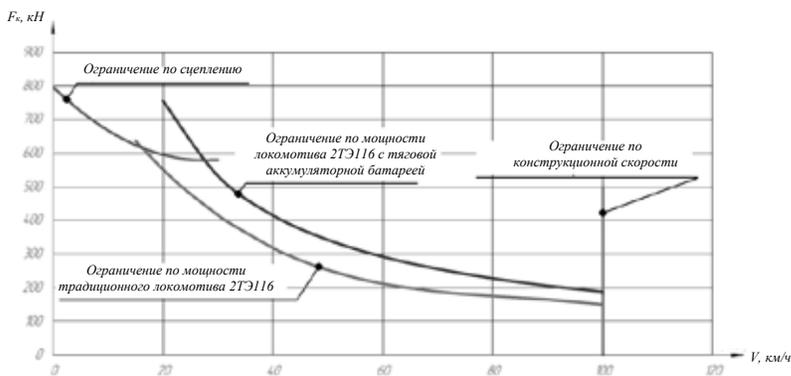


Рис. 3. Сравнение тяговых характеристик традиционного и гибридного тепловозов 2ТЭ116 [выполнено авторами].

Таким образом можно сделать вывод о том, что момент тягового электродвигателя прямо пропорционален квадрату значения тока обмотки якоря тягового электродвигателя.

Современные тяговые аккумуляторные батареи, такие как батарея LT-LFP770Р производства ООО «Лиотех», допускают номинальный разряд, равный значению номинальной емкости аккумуляторной батареи c_n , равный 770 А⁴.

Применительно к тепловозу 2ТЭ116 возможно последовательно установить n -ное количество ячеек тяговой аккумуляторной батареи с номинальной емкостью 770 Ач, которые будут работать на шести параллельно включенных тяговых электродвигателях тепловоза. Таким образом, максимальное допускаемое значение силы тока от тяговой аккумуляторной батареи на каждом электродвигателе будет составлять, А:

$$I_{ТЭД}^{ТАБ} = \frac{I_{ТАБ}}{n_{ТЭД}} = \frac{770}{6} = 128,3 \text{ А}, \quad (3)$$

где $I_{ТАБ}$ — значение разрядного тока тяговой аккумуляторной батареи, А;

$n_{ТЭД}$ — количество тяговых электродвигателей на секции локомотива, шт.

Сила тока на каждом тяговом электродвигателе рассчитывается, исходя из характеристики тягового синхронного генератора, которая может быть получена из Правил тяговых расчетов для поездной работы (ПТР)⁵.

⁴ Руководство по эксплуатации аккумуляторов литий-ионных серий LFP-P с номинальной емкостью 200 А·ч, 240 А·ч, 300 А·ч, 380 А·ч, 700 А·ч, 770 А·ч LT.38294932.3482.003–2016РЭ, 2016. – 25 л.

⁵ Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Некрасов О. А., Лисицын А. Л., Стромский П. П., Боровиков А. П., Чукова Т. С. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт. – 1985. – 287 с. [Электронный ресурс]: <https://djuvonline/file/syjaetzWQPjhN>. Доступ 02.10.2023.

Соответственно, сила тока от тягового синхронного генератора будет определяться как, А:

$$I_{ТЭД}^{ТСГ} = \frac{I_{ТСГ}}{n_{ТЭД}}, \quad (4)$$

где $I_{ТСГ}$ — значение тока тягового синхронного генератора, А.

Таким образом, итоговое значение на тяговом электродвигателе локомотива определяется зависимостью, А:

$$I_{ТЭД} = I_{ТЭД}^{ТСГ} + I_{ТЭД}^{ТАБ}. \quad (5)$$

Используя уравнения (1–5), зная конструктивные параметры тепловоза 2ТЭ116, тягового синхронного генератора ГС-501А и тягового электродвигателя ЭД-118А, возможно рассчитать тяговую характеристику тепловоза 2ТЭ116 с тяговой аккумуляторной батареей.

Сравнение тяговых характеристик традиционного и гибридного тепловозов 2ТЭ116 представлено на рис. 3. Ограничение по сцеплению тепловоза невозможно повысить увеличением момента тяговых электродвигателей, поскольку это приведет к боксованию колесных пар и не принесет полезной работы [7]. Ограничение по конструктивной скорости определяется, исходя из условий допустимого воздействия локомотива на путь, ходовых свойств локомотива, возможности схода его с рельсов и прочности его составных деталей и узлов. Из соображений требований к безопасности движения данное ограничение не может быть изменено. Из проведенных расчетов видно, что применение тяговой аккумуляторной батареи позволяет повысить значение силы тяги тепловоза на 25–35 % на продолжительных режимах работы.

Из Правил тяговых расчетов⁵ следует, что выбор расчетной массы состава поезда про-



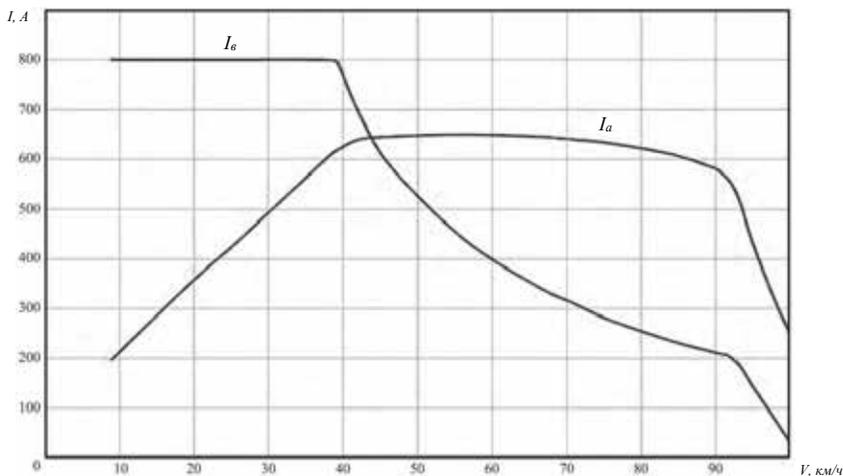


Рис. 4. Зависимости тока якоря и тока возбуждения тягового электродвигателя ЭД-118А тепловоза 2ТЭ116 [выполнено авторами].

изводится на основании следующей зависимости, т:

$$Q = \frac{F_{кр} - (w'_0 + i_p) \cdot P}{w'_0 + i_p}, \quad (6)$$

где $F_{кр}$ – значение силы тяги локомотива при расчетной скорости, Н;

w'_0 – сопротивление движению локомотива в режиме тяги, Н;

w''_0 – сопротивление движению состава поезда (вагонов) в режиме тяги, Н;

P – сцепная масса локомотива, т;

i_p – расчетный подъем, %.

Из зависимости (6) видно, что основным положительно влияющим на перевозимую массу состава поезда фактором является расчетная сила тяги локомотива. В соответствии с ПТР расчетная сила тяги локомотива 2ТЭ116 при расчетной скорости $v_p = 24,2$ км/ч составляет 50600 кгс (496 кН). Воспользовавшись зависимостью силы тяги от скорости движения гибридного тепловоза 2ТЭ116, увидим, что расчетная скорость теперь соблюдается на ограничении по сцеплению. Таким образом, расчетное значение силы тяги на ограничении по сцеплению составляет 58200 кгс (571 кН). На основании данного расчета можно сделать вывод о том, что фактическая перевозимая масса состава поезда при применении тяговой аккумуляторной батареи на тепловозе может быть увеличена примерно на 15 %.

Одним из преимуществ применения тяговой аккумуляторной батареи является возможность рекуперации электрической энергии в накопитель энергии. В настоящее время на тепловозах реализована возможность электродинамического, реостатного торможе-

ния, которое подразумевает преобразование полученной электрической энергии при торможении в тепло.

Токи рекуперации могут быть предварительно оценены, исходя из действующей зависимости тока якоря тягового электродвигателя ЭД-118А тепловоза 2ТЭ116, которая представлена на рис. 4.

Из графика видно, что пиковое значение токов якоря наблюдается при скоростях движения в 40–80 км/ч и составляет 650 А. Таким образом, тяговая аккумуляторная батарея должна быть рассчитана на получение пиковых токов от шести тяговых электродвигателей в размере 3900 А. Однако руководством по эксплуатации величина зарядного тока ограничена в 2310 А. В данном случае может быть реализовано техническое решение по частичному переводу трех тяговых электродвигателей первой тележки в режим рекуперативного торможения, а оставшихся трех электродвигателей второй тележки – в режим реостатного торможения с подключением к тормозному резистору. В любом случае эффективность рекуперационного торможения с передачей энергии в тяговый накопитель энергии будет определяться действующим профилем пути и количеством включений режима реостатного торможения для остановки состава поезда либо поддержания определенной скорости движения.

ВЫВОДЫ

Анализ возможности применения тяговой аккумуляторной батареи на маги-

стральных локомотивах показал, что применение тяговой аккумуляторной батареи позволит:

1) увеличить касательную силу тяги на локомотиве за счет увеличения момента на тяговых электродвигателях, что позволит увеличить возможный перевозимый вес состава поезда примерно на 15 %;

2) реализовать рекуперацию электрической энергии на автономном подвижном составе, что повысит энергетическую эффективность и в конечном счете увеличит объем перевозимых грузов.

Предложена принципиальная схема и математическая модель электропривода тепловоза с гибридной энергетической установкой, состоящей из дизеля и тяговых аккумуляторов.

Таким образом, численные исследования тепловоза с гибридной энергетической установкой показали, что его эффективность как тяговой единицы возрастает на 15 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Soluyanov, Y. I., Fedotov, A. I., Akhmetshin, A. R. Application of intelligent electricity metering systems for timely adjustment of standard values for electrical loads calculation. Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021: 3, Moscow, Moscow, 2021, 9388018. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388018.

2. Еременко М. Н., Доможирова А. Д., Упырь Р. Ю. Организация планирования диспетчерской работы на участках с подталкивающим движением // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 164–169. EDN: JBGLHJ.

3. Альтернативные технологии тяги для маневровых локомотивов // Железные дороги мира. [Электронный ресурс]: <https://zdmira.com/articles/alternativnyye-tehnologii-tyagi-dlya-manevrovyykh-lokomotivov>. Доступ 02.10.2023.

4. Гибридный локомотив компании Stadler для Великобритании // Железные дороги мира. [Электронный ресурс]: <https://zdmira.com/news/gibridnyj-lokomotiv-kompanii-stadler-dlya-velikobritanii-prokhorodit-ispytaniya>. Доступ 02.10.2023.

5. Mohr, M., Peters, J. F., Baumann, M., Weil, M. Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes. Journal of Industrial Ecology, 2020, pp. 1310–1322. DOI: 10.1111/jiec.13021.

6. Hamzi, I., El Bakkali, M., Aghoutane, M., Touhami, N. A. Conversion Efficiency Study of the Bridge

Rectifier at 2.4GHz. Procedia Manufacturing, 2020, Vol. 46, pp. 771–776. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.003.

7. Грищенко А. В., Грачев В. В., Базилевский Ф. Ю., Курилкин Д. Н. Оценка влияния процессов боксования колесных пар тепловозов на их энергетическую эффективность в эксплуатации // БРНИ. – 2014. – № 4 (13). – С. 51–60. EDN: TMAMRT.

8. Буйносов А. П., Дурандин М. Г., Тутьнин О. И. Перспективы использования накопителей электрической энергии на моторвагонном подвижном составе // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (48). – С. 35–45. EDN: TWNLKL. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-4-35-45.

9. Голиков И. Ю. Анализ и разработка системы электроснабжения объектов магистрального трубопровода с использованием ВИЭ и гибридным накопителем электрической энергии // Современные проблемы развития Европейского Севера: Материалы Всероссийской научно-практ. конференции, Ухта, 25–27 мая 2022 года. – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2022. – С. 8–11. EDN: PKOTAR.

10. Никитин В. В., Середа Е. Г., Трифионов Б. А. Принципы использования сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии для повышения экономичности силовой установки автономного транспортного средства с электрической передачей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 1–2. – С. 62–70. EDN: LPCNRL.

11. Титова Т. С., Евстафьев А. М., Никитин В. В. Применение накопителей энергии для повышения энергетической эффективности тягового подвижного состава // Электротехника. – 2018. – № 10. – С. 21–25. EDN: VAKSSW.

12. Валинский О. С., Евстафьев А. М., Никитин В. В., Теличенко С. А. Структурные и схемные решения для транспортных гибридных силовых электроэнергетических установок // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. – № 5. – С. 7–10. EDN: NRQWPA.

13. Вальцев Н. В., Барбин Н. М. Сравнительный анализ применения электрохимических аккумуляторов разных типов в качестве накопителей энергии // Электротехника. – 2023. – № 6. – С. 53–62. EDN: XQNLPI. DOI: 10.53891/00135860_2023_5_53.

14. Буйносов А. П., Дурандин М. Г., Тутьнин О. И. Анализ применения гибридного источника питания в системе тягового электропривода электропоезда // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 3 (99). – С. 12–18. EDN: GNKANК.

15. Павелчик М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии / Дисс... докт. техн. наук. – М.: МИИТ, 2000. – 451 с. EDN: ZKVKOT.

16. Штанг А. А. Повышение эффективности электро-транспортных систем на основе использования накопителей энергии / Дисс... канд. техн. наук. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 233 с. EDN: NOCHWV.

17. Титова Т. С., Евстафьев А. М., Изварин М. Ю., Сычугов А. Н. Перспективы развития тягового подвижного состава // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 6 (79). – С. 40–44. EDN: YSWXNR. ●

Информация об авторах:

Кузнецов Григорий Юрьевич – аспирант кафедры электропоездов и локомотивов Российского университета транспорта, Москва, Россия, kuznetsov_gy@mail.ru.

Логинова Елена Юрьевна – доктор технических наук, профессор кафедры электропоездов и локомотивов Российского университета транспорта, Москва, Россия, ejy-loginova@mail.ru.

Куделин Константин Витальевич – аспирант кафедры электропоездов и локомотивов Российского университета транспорта, Москва, Россия; машинист, ОАО «РЖД», Москва, Россия, konstantin-97@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 04.05.2023, актуализирована 18.12.2023, одобрена после рецензирования 26.12.2023, принята к публикации 28.12.2023.

