

УДК 629.424 + 06

## Улучшение тягово-энергетических характеристик автономных локомотивов за счет применения модульного исполнения элементов тяговой системы

Т. З. Талахадзе, Н. В. Гребенников, И. В. Больших

Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

**Для цитирования:** Талахадзе Т. З., Гребенников Н. В., Больших И. В. Улучшение тягово-энергетических характеристик автономных локомотивов за счет применения модульного исполнения элементов тяговой системы // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 78-89. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-78-89

### Аннотация

**Цель:** Приоритетным направлением стратегических программ по развитию железнодорожного транспорта является проектирование и внедрение в эксплуатацию нового подвижного состава, отличающегося высокими технико-экономическими показателями. В связи с этим целью является сформулировать научно обоснованные технические решения, позволяющие сократить расходы на производство, обслуживание и ремонт тягового подвижного состава и улучшить его тягово-энергетические характеристики. **Методы:** Для решения поставленной цели применены методы: структурного анализа; статистической обработки больших массивов экспериментальных данных; имитационного компьютерного моделирования; теории локомотивной тяги. **Результаты:** Выделены приоритетные направления совершенствования тягового подвижного состава. Разработан комплекс научно обоснованных технических решений, позволяющих улучшить тягово-энергетические характеристики автономных локомотивов, которые могут позволить осуществить переход на единую платформу для тепловозов и электровозов. В результате будет достигнуто сокращение расходов на производство, обслуживание и ремонт тягового подвижного состава и улучшение тягово-энергетических характеристик локомотивов. **Практическая значимость:** Заключается в получении экономического эффекта за счет сокращения расходов на производство, обслуживание и ремонт тягового подвижного состава и расходов топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов.

**Ключевые слова:** Тяговый подвижной состав, автономный локомотив, электровоз, тепловоз, единая платформа, модульная структура, тяговая система, силовая энергетическая установка, энергетическая эффективность, компьютерное моделирование.

### Введение

Одним из ключевых направлений в деятельности ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») является повышение эффективности локомотивной тяги и перевозочного процесса в целом. На основе анализа «Стратегии развития холдинга ОАО «РЖД» на период до 2030 года» [1] и ряда других нормативных документов компании, а также государственных документов и законов [2–4] можно сделать вывод, что основной задачей развития и совершенствования железнодорожного

подвижного состава является разработка, производство и внедрение в эксплуатацию подвижного состава, обладающего высокими технико-экономическими показателями.

На основании этого можно выделить три приоритетных направления совершенствования эффективности локомотивной тяги:

- улучшение тяговых и энергетических характеристик тягового подвижного состава;
- снижение времени простоя подвижного состава при организации ремонта и технического обслуживания;
- увеличение нагрузки на ось.

Улучшение тяговых и энергетических характеристик тепловозов может быть достигнуто за счет модернизации дизель-генераторной установки путем применения новой конструкции и совершенствования ее отдельных составляющих [5, 6], а также применения поосного регулирования силы тяги и алгоритма дискретно-адаптивного управления тяговыми электрическими машинами в эксплуатации [7, 8].

Для электровозов актуальны мероприятия, касающиеся только тягового электропривода, поэтому в данной статье будет подробно рассмотрен и обоснован комплекс мероприятий, позволяющий решить задачу совершенствования эффективности локомотивной тяги применительно к автономному тяговому подвижному составу — тепловозам, в тяговую систему которых, помимо тягового электропривода, также входит силовая энергетическая установка.

## **1. Показатели энергетической эффективности основных элементов тягово-энергетической системы автономного грузового магистрального локомотива**

Как показывает анализ эксплуатации автономных локомотивов, основной проблемой является недоиспользование их доступной мощности, что связано с неравномерной загрузкой и изменяющимся рельефом местности [9], что, в свою очередь, существенно влияет на энергетическую эффективность [10, 11]. В случае автономных локомотивов это выражается как в работе силовой энергетической установки в неустановившихся режимах, так и в недоиспользовании доступной мощности тяговых электродвигателей. Для проведения исследований показателей энергетической эффективности целесообразно рассматривать наиболее распространенную тягово-энергетическую систему автономного тягового подвижного состава на примере тепловоза 2ТЭ25КМ.

Дадим краткую характеристику данного тепловоза с описанием основных параметров, необходимых для проведения исследования. Тепловоз серии 2ТЭ25КМ является двухсекционным, тяговая система каждой секции которого включает: силовую энергетическую установку — дизель-генератор 18-9ДГ,

состоящую из дизельного двигателя Д49 (16ЧН26/26) мощностью 2650 кВт и тягового генератора ГС-501АУ2; тяговый преобразователь М-ТПП-3600М-1-У2, конструкция которого позволяет реализовать управление всеми шестью тяговыми электродвигателями типа ЭДУ-133Ц, мощность каждого из которых составляет 366 кВт в номинальном режиме.

Если использовать для характеристики конструкции тягово-энергетической системы тепловоза модульный принцип, то можно выделить два основных модуля: «силовая энергоустановка», представляющий собой дизель-генераторную установку, и «тяговый электропривод», включающий тяговый преобразователь и тяговые электродвигатели.

Характеристика процесса преобразования энергии при работе тягово-энергетической системы тепловоза состоит из трех этапов и двух уровней и подробно представлена в [12]. Отметим, что для автономного тягового подвижного состава задача повышения энергетической эффективности является двухуровневой [12] — на верхнем уровне (модуль «силовая энергоустановка») и на нижнем (модуль «тяговый электропривод»). В связи с чем анализ показателей энергетической эффективности целесообразно вести по уровням (модулям) в согласовании с этапами преобразования энергии.

В модуле «силовая энергоустановка», в первичном двигателе, химическая энергия топлива преобразуется сначала в тепловую энергию, а затем в механическую энергию на валу дизельного двигателя, в этом случае потребляемую мощность тепловоза через топливный эквивалент  $P_{\text{потр}}$ , кВт определим по формуле:

$$P_{\text{потр}} = g_{ei} Q_p^H, \quad (1)$$

где  $Q_p^H$  — удельная теплота сгорания дизельного топлива;

$g_{ei}$  — расход топлива на соответствующей позиции контроллера машиниста в каждый конкретный момент работы, кг/с.

Затем в модуле «силовая энергоустановка» механическая энергия коленчатого вала дизеля преобразуется в электрическую энергию синхронного тягового генератора с двумя параллельными трехфазными обмотками, а электрическая мощность модуля «силовая энергоустановка»  $P_{\text{СЭУ}}$ , кВт будет определяться по формуле:

$$P_{\text{СЭУ}} = 2\sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{ф}} \cos \varphi, \quad (2)$$

где  $I_{\text{ф}}$  — действующие значения фазного тока, А;

$U_{\text{л}}$  — действующее значение линейного напряжения, В;

$\cos \varphi$  — коэффициент мощности: при различных значениях напряжения находится в пределах 0,79–0,96; для номинального режима составляет 0,9.

В модуле «тяговый электропривод», в тяговом преобразователе, энергия, выработанная модулем «силовая энергоустановка», преобразуется и питает каждый из шести тяговых электродвигателей отдельно, которые, в свою очередь, преобразуют ее в механическую энергию вращения колесных пар и реализуют касательную силу тяги в контакте «колесо — рельс», совершая полезную механическую работу. Полезная мощность автономного тягового подвижного состава на тягу поезда  $P_T$  будет равна:

$$P_T = \frac{F_k V}{3,6}, \quad (5)$$

где  $V$  — скорость, км/ч;  $F_k$  — касательная сила тяги, кН.

Основным показателем энергетической эффективности является коэффициент полезного действия (КПД). Исходя из структуры тяговой системы тепловоза, его мгновенное значение КПД  $\eta_{\text{АГМЛ}}$  будет определяться произведением КПД модуля «силовая энергоустановка»  $\eta_{\text{СЭУ}}$ , КПД модуля «тяговый электропривод»  $\eta_{\text{ТЭП}}$  и КПД механического тягового привода  $\eta_{\text{МЕХ}}$ :

$$\eta_{\text{АГМЛ}} = \eta_{\text{СЭУ}} \eta_{\text{ТЭП}} \eta_{\text{МЕХ}}. \quad (6)$$

КПД модуля «силовая энергоустановка» можно определить как:

$$\eta_{\text{СЭУ}} = \frac{P_{\text{СЭУ}}}{P_{\text{потр}}}. \quad (7)$$

КПД модуля «тяговый электропривод» можно определить как:

$$\eta_{\text{ТЭП}} = \frac{P_T}{P_{\text{СЭУ}}}. \quad (8)$$

Также КПД автономного грузового магистрального локомотива можно определить отношением совершенной полезной работы модулем «тяговый электропривод» на тягу поезда  $A_{\text{пол}}$ , кВт · ч к полной потребленной энергии модулем «силовая энергоустановка»  $E_{\text{потр}}$ , кВт · ч:

$$\eta_{\text{АГМЛ}} = \frac{A_{\text{пол}}}{E_{\text{потр}}}. \quad (9)$$

Совершенная полезная работа модулем «тяговый электропривод» на тягу поезда равна интегралу по времени от полезной мощности  $P_T$  (5):

$$A_{\text{пол}} = \int P_T dt. \quad (10)$$

Полная потребленная энергия модулем «силовая энергоустановка» равна интегралу по времени от потребленной мощности  $P_{\text{потр}}$  (1):

$$E_{\text{потр}} = \int P_{\text{потр}} dt. \quad (11)$$

Повышению энергетической эффективности модуля «тяговый электропривод» посвящено множество публикаций, выделим основные решения, которые позволяют решить данную задачу: переход на асинхронный тяговый привод [13], реализация поосного регулирования силы тяги и алгоритма дискретно-адаптивного управления тяговым приводом [7, 8].

Повышение энергетической эффективности модуля «силовая энергоустановка» обусловлено приведением условий ее работы в соответствие с номинальными параметрами, которые ориентированы на максимальные значения КПД [13]. Однако, как показывает опыт эксплуатации автономных локомотивов [14], данный модуль работает в переходных режимах и при частичной нагрузке, что приводит к снижению КПД с номинального значения на уровне 36–38 % до эксплуатационного значения порядка 20–25 % [15, 16].

## **2. Методы повышения энергетической эффективности тягово-энергетической системы магистральных тепловозов**

Как было показано выше, задача повышения энергетической эффективности является двухуровневой: на нижнем уровне проводится оптимизация модуля «тяговый электропривод», а на верхнем уровне — оптимизация модуля «силовая энергоустановка». Применительно к модулю «силовая энергоустановка» добиться повышения эффективности при имеющейся моноблочной структуре невозможно. Следовательно, для приведения мощности модуля «тяговый электропривод» для обеспечения требуемой силы тяги необходимо обеспечить поступление мощности при минимальном потреблении дизельного топлива, что может быть достигнуто применением нескольких дизель-генераторных установок в составе модуля «силовая энергоустановка» (от двух до четырех на секцию). В предлагаемой конструкции модуля «силовая энергоустановка» предлагается применять высокооборотные дизельные двигатели, которые имеют лучшие массогабаритные показатели по сравнению со штатным дизелем [17], а в качестве генератора использовать реактивную индукторную машину, преимуществом которой является способность поддерживать номинальное значение КПД при частичных нагрузках в процессе эксплуатации [18].

Такая конструкция модуля «силовая энергоустановка» позволяет в процессе эксплуатации регулировать значение генерируемой мощности за счет ввода в работу и вывода из нее дизельных двигателей, работающих в номинальном режиме, а не за счет работы дизельного двигателя в режимах частичной (неполной) нагрузки, которые характеризуются низкими значениями энергетической эффективности (отличными от номинального режима).

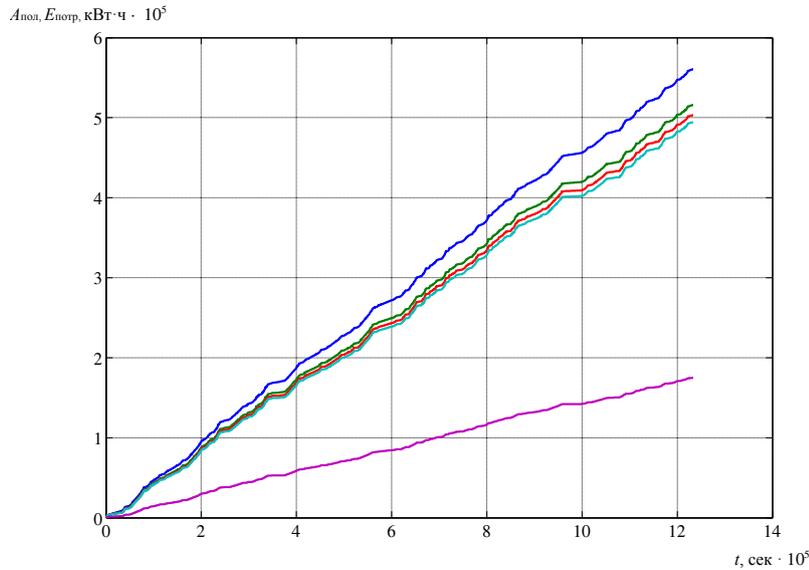
### **3. Анализ показателей энергетической эффективности тягово-энергетической системы грузовых тепловозов в эксплуатации на Южном полигоне**

Для оценки эффективности предлагаемого метода повышения энергетической эффективности выполним сопоставление показателей энергетической эффективности тепловоза серии 2ТЭ25КМ со штатной дизель-генераторной установкой в реальных условиях эксплуатации на основе данных микропроцессорной системы управления тепловозом (МПСУ-ТП) и результатов компьютерного моделирования для автономного локомотива с модульной силовой установкой на базе нескольких высокооборотных дизельных двигателей.

Опираясь на методику, описанную во втором разделе, представим результаты анализа показателей энергетической эффективности.

Для анализа были взяты данные бортового регистратора о работе тепловоза серии 2ТЭ25КМ за один месяц с составами различной массы на Южном полигоне эксплуатации. Руководствуясь данными об управляемом движении реального локомотива и компьютерной моделью тепловоза с модульной силовой энергоустановкой, выполненной в среде программных комплексов «Универсальный механизм» и SimInTech, было выполнено моделирование работы автономного локомотива с составами различной массы (рис. 1). При этом было использовано три варианта конструкции модуля «силовая энергоустановка» — с двумя, тремя и четырьмя дизелями на секцию.

Потребленная энергия по топливному эквиваленту тепловозом 2ТЭ25КМ составила  $5,604 \cdot 10^5$  кВт · ч (рисунок, синяя линия). Локомотив с модульной силовой энергоустановкой (2 дизеля на секцию) потребил  $5,158 \cdot 10^5$  кВт · ч (рис. 1, зеленая линия). Тепловоз с модульной силовой энергоустановкой (3 дизеля на секцию) потребил  $5,03 \cdot 10^5$  кВт · ч (рисунок, красная линия). Тепловоз с модульной силовой энергоустановкой (4 дизеля на секцию) потребил  $4,934 \cdot 10^5$  кВт · ч (рис. 1, салатная линия). Совершенная полезная работа (работа на тягу поезда) одинакова для тепловоза 2ТЭ25КМ и тепловоза с модульной силовой энергоустановкой и равна  $1,748 \cdot 10^5$  кВт · ч (рисунок, сиреневая линия). Эксплуатационный КПД тепловоза 2ТЭ25КМ составил 0,312. Тепловоз с модульной силовой энергоустановкой имеет КПД, равный 0,339, 0,348 и 0,354 для модулей, состоящих из двух, трех и четырех дизелей соответственно.



Сравнение энергетических показателей работы тепловоза.

Следовательно, при работе на Южном полигоне эксплуатации модульная конструкция силовой энергоустановки позволяет улучшить энергетическую эффективность локомотива, при этом стоит отметить, что конструкция модуля «силовая энергоустановка», включающая четыре дизельных двигателя, позволяет добиться наибольшего увеличения КПД.

### Заключение. Основные выводы

Представленный комплекс научно обоснованных технических решений, улучшающих тягово-энергетические характеристики автономных локомотивов, может позволить осуществить переход на единую платформу для тепловозов и электровозов. Модульный принцип построения тяговой системы локомотива позволяет сократить расходы на обслуживание и ремонт тягового подвижного состава путем уменьшения времени простоев. Применение в составе модуля «силовая энергоустановка» высокооборотных дизельных двигателей дает возможность значительно уменьшить массу силовой установки и обеспечить переход на двухосные тележки, что позволит перейти на единую платформу для тепловозов и электровозов (использование унифицированной экипажной части), исключением будут являться только колесно-моторные блоки, что даст возможность сократить расходы на производство, обслуживание и ремонт тягового подвижного состава. Предлагаемая конструкция модуля «силовая энергоустановка» с четырьмя дизельными двигателями на секцию обеспечивает улучшение энергетической эффективности локомотива в процессе эксплуатации во всем диапазоне нагрузок — на 4,2 % по сравнению с магистральными грузовыми тепловозами серии 2ТЭ25КМ, что снижает затраты на топливно-энергетические ресурсы.

## Библиографический список

1. Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» на период до 2015 года и на период до 2030 года. — М.: ОАО «РЖД», 2011. — 97 с.
2. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников и др.; под ред. В. А. Гапановича. — М.: Изд. дом МИСиС, 2012. — 620 с.
3. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ (ред. от 29 июля 2017 г.) (с изм. и доп., вступ. в силу с 26 июля 2019 г.). «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
4. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на период до 2030 года (Белая книга). — М.: ОАО «РЖД», 2015. — 128 с.
5. Зарифьян А. А. Модульная силовая энергетическая установка современного тепловоза / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе и др. // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России». Т. 1. Технические науки. — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2018. — С. 191–195.
6. Зарифьян А. А. Повышение энергетической эффективности тепловозов за счет применения модульной силовой установки / А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2018. — С. 100–104.
7. Гребенников Н. В. Метод снижения потерь электроэнергии в тяговых двигателях автономного локомотива за счет применения дискретно-адаптивного управления / Н. В. Гребенников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2023. — № 1(89). — С. 234–240. — DOI: 10.46973/0201-727X\_2023\_1\_234.
8. Зарифьян А. А. (мл.) Дискретно-адаптивное управление тяговым приводом грузового электровоза при работе с неполной нагрузкой / А. А. Зарифьян (мл.) // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 1. — С. 49–59.
9. Зарифьян А. А. Определение полезной работы, совершаемой локомотивом при тяге поезда / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 1(69). — С. 40–49.
10. Зарифьян А. А. О возможности повышения энергетической эффективности локомотивов при работе с частичной нагрузкой / Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Т. 2. Технические науки. — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т. путей сообщения 2016. — С. 74–76.
11. Зарифьян А. А. Анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности грузовых тепловозов / А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 3(71). — С. 46–53.

12. Талахадзе Т. З. Повышение энергетической эффективности магистральных тепловозов за счет перехода к модульным силовым установкам: дисс. ... канд. техн. наук / Т. З. Талахадзе. — 2019. — 164 с.
13. Андриющенко А. А. Асинхронный тяговый привод локомотивов / А. А. Андриющенко, Ю. В. Бабков и др. — М.: УМЦ ЖДТ, 2013. — 413 с.
14. Гребенников Н. В. Анализ эксплуатационного потребления топлива грузовыми тепловозами / Н. В. Гребенников, Ю. В. Сердюков, А. Н. Шульгин // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 18–21 апреля 2017 года. Т. 1. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. — С. 115–118.
15. Гребенников Н. В. Пути повышения энергетической эффективности автономного тягового подвижного состава / Н. В. Гребенников // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 4(57). — С. 19–23.
16. Гребенников Н. В. Оценка энергоэффективности тепловоза 2ТЭ25КМ в условиях Северо-Кавказской железной дороги / Н. В. Гребенников // Транспорт: наука, образование, производство: труды Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 25–27 апреля 2022 года. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2022. — С. 46–49.
17. Талахадзе Т. З. Модульная структура силовой энергетической установки грузовых тепловозов / Т. З. Талахадзе, Н. В. Романченко, А. Е. Набоков и др. // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2019): сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 23–26 апреля 2019 года. Т. 4. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. — С. 138–142.
18. Гребенников Н. В. Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в реактивных индукторных машинах с сильным взаимным влиянием фаз / Н. В. Гребенников // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2019. — Т. 16. — № 2. — С. 315–321. — DOI: 10.20295/1815-588/X-2019-2-315-321.

Дата поступления: 15.10.2023

Решение о публикации: 23.11.2023

**Контактная информация:**

ТАЛАХАДЗЕ Темур Зурабович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав»; 086temur086@gmail.com

ГРЕБЕННИКОВ Николай Вячеславович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав»; grebennikovnv@mail.ru

БОЛЬШИХ Иван Валерьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав»; ivan.bolshih@yandex.ru

# Improving the Traction and Energy Characteristics of Self-Contained Locomotives Through the Use of Modular Design of the Traction System Elements

T. Z. Talakhadze, N. V. Grebennikov, I. V. Bolshih

Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Square, Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

**For citation:** Talakhadze T. Z., Grebennikov N. V., Bolshih I. V. Improving the Traction and Energy Characteristics of Self-Contained Locomotives Through the Use of Modular Design of the Traction System Elements. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 78-89. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-78-89

## Summary

**Purpose:** The priority direction of strategic programs for the development of railway transport is the design and introduction into operation of new rolling stock, which is characterized by high technical and economic indicators. In this regard, the goal is to formulate scientifically based technical solutions to reduce the costs of production, maintenance and repair of traction rolling stock and improve its traction and energy characteristics.

**Methods:** To achieve the stated goal, the following methods have been applied: structural analysis; statistical processing of large arrays of experimental data; computer simulation; theory of locomotive traction.

**Results:** Priority directions for improving traction rolling stock have been identified. A set of scientifically based technical solutions has been developed to improve the traction and energy characteristics of self-contained locomotives, which may allow the transition to a single platform for diesel and electric locomotives. As a result, the reduction in costs for the production, maintenance and repair of traction rolling stock and an improvement in the traction and energy characteristics of locomotives will be achieved. **Practical significance:** Economic effect obtained due to reducing the costs of production, maintenance and repair of traction rolling stock and the consumption of fuel and energy resources for train traction.

**Keywords:** Traction rolling stock, self-contained locomotive, electric locomotive, diesel locomotive, single platform, modular structure, traction system, power plant, energy efficiency, computer simulation.

## References

1. *Energeticheskaya strategiya holding "RZD" na period do 2015 goda I na period do 2030 goda* [Energy strategy of the "RZD" holding for the period until 2015 and for the period until 2030]. Moscow: JSC "RZD" Publ., 2011, 97 p. (In Russian)

2. Gapanovich V. A., Avilov V. D., Arzhannikov B. A. et al.; ed. by V. A. Gapanovich. *Energoberejenie na jeleznodorojnom transporte* [Energy saving in railway transport]. Moscow: MISiS Publ., 2012, 620 p. (In Russian)

3. *Federal'nyy zakon ot 23 noyabrya 2009 g. № 261-FZ (red. ot 29 iyulya 2017 g.) (s izm. i dop., vstup. v silu s 26 iyulya 2019 g.). "Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii"* [Federal Law № 261-FZ of November 23, 2009 (as amended on July 29, 2017) (as amended and supplemented, entered into force on July 26, 2019). "On energy saving and increasing energy efficiency and on introducing amendments to certain legislative acts of the Russian Federation"]. (In Russian)

4. *Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya holdinga "RZHD" na period do 2025 goda i na period do 2030 goda (Belaya Kniga)* [Strategy for scientific and technological development of the

Russian Railways holding for the period until 2025 and for the period until 2030 (White Book)]. Moscow: JSC “RZD” Publ., 2015, 128 p. (In Russian)

5. Zarifyan A. A., Grebennikov N. V., Talakhadze T. Z. et al. Modul'naya silovaya energeticheskaya ustanovka sovremennogo teplovoza [The modular power energy installation of the modern diesel locomotive]. *Sbornik nauchnykh trudov “Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya transporta, promyshlennosti i ekonomiki Rossii”, T. 1. Tekhnicheskie nauki* [Collection of scientific papers “Current problems and prospects for the development of transport, and industry and the Russian economy”. Vol. 1. Technical sciences]. Rostov-on-Don: Rost. gos. un-t. putey soobshcheniya Publ., 2018, pp. 191–195. (In Russian)

6. Zarifyan A. A., Talakhadze T. Z. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti teplovozov za schet pri-meneniya modul'noj silovoj ustanovki [Increasing the energy efficiency of diesel locomotives by the using of a modular power plant]. *Sbornik nauchnykh trudov “Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo”* [Collection of scientific papers “Transport: science, education, production”]. Rostov-on-Don: Rost. gos. un-t. putey soobshcheniya Publ., 2018, pp. 100–104. (In Russian)

7. Grebennikov N. V. Metod snizheniya poter' elektroenergii v tyagovykh dvigatelyah avtonomnogo lokomotiva za schet primeneniya diskretno-adaptivnogo upravleniya [Method for reducing power losses in traction motors of an autonomous locomotive through the use discrete adaptive control]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications]. 2023, Iss. 1(89), pp. 234–240. DOI: 10.46973/0201-727X\_2023\_1\_234. (In Russian)

8. Zarifyan A. A. (Jr) Diskretno-adaptivnoe upravlenie tyagovym privodom gruzovogo elektrovoza pri rabote s nepolnoj nagruzkoy [Discrete and adaptive control of the traction drive of the cargo electric locomotive during the work with the underload]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications]. 2018, Iss. 1, pp. 49–59. (In Russian)

9. Zarifyan A. A., Grebennikov N. V., Talakhadze T. Z. et al. Opredelenie poleznoj raboty, sovershaemoj lokomotivom pri tyage poezda [Calculation of useful work of locomotive at the train traction]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications]. 2018, Iss. 1(69), pp. 40–49. (In Russian)

10. Grebennikov N. V., Zarifyan A. A., Talakhadze T. Z. O vozmozhnosti povysheniya energeticheskoy effektivnosti lokomoti-vov pri rabote s chastichnoj nagruzkoy [Possibility of increasing energy efficiency of locomotives working at partial load]. *Sb. nauchnykh trudov “Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo”. T. 2. Tekhnicheskie nauki* [Collection of scientific works “Transport: science, education, production”. Vol. 2. Technical sciences]. Rostov-on-Don: Rost. gos. un-t. putey soobshcheniya Publ., 2016, pp. 74–76. (In Russian)

11. Zarifyan A. A., Talakhadze T. Z. Analiz ekspluatatsionnykh pokazatelej energeticheskoy effektivnosti gruzovykh teplovozov [Analysis of energy efficiency operational indicators of freight diesel locomotives]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications]. 2018, Iss. 3 (71), pp. 46–53. (In Russian)

12. Talakhadze T. Z. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti magistral'nykh teplovozov za schet perekhoda k modul'nym silovym ustanovkam: diss. ... kand. tekhn. nauk [Increasing the energy efficiency of mainline diesel locomotives through the transition to modular power plants: diss. ...cand. tech. Sciences]. 2019, 164 p. (In Russian)

13. 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)

14. Grebennikov N. V., Serdyukov Yu. V., Shul'gin A. N. Analiz ekspluatatsionnogo potrebleniya topliva gruzovymi tep-lovozami [Analysis operational fuel consumption of freight locomotives]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Rostov-na-Donu, 18–21 aprelya 2017 goda. T. 1* [Transport: science, education, production: collection of scientific works of the International Scientific and Practical conference, Rostov-on-Don, April 18–21, 2017. Vol. 1]. Rostov-on-Don: Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Publ., 2017, pp. 115–118. (In Russian)

15. Grebennikov N. V. Puti povysheniya energeticheskoy effektivnosti avtonomnogo tyagovogo podvizhnogo sostava [Ways to improve the energy efficiency of autonomous traction rolling stock]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University]. 2021, Iss. 4(57), pp. 19–23. (In Russian)

16. Grebennikov, N. V. Ocenka energoeffektivnosti teplovoza 2TE25KM v usloviyah Severo-Kavkazskoj zheleznoj dorogi [Assessment of the energy efficiency of a diesel locomotive 2te25km in the conditions of the North-Caucasian railway]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Rostov-na-Donu, 25–27 aprelya 2022 goda* [Transport: science, education, production: proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 25–27, 2022]. Rostov-on-Don: Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Publ., 2022, pp. 46–49. (In Russian)

17. Talakhadze T. Z., Romanchenko N. V., Nabokov A. E. et al. Modul'naya struktura silovoj energeticheskoy ustanovki gruzovykh teplovozov [Modular structure of power installation of freight locomotive]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo (Transport-2019): sbornik nauchnykh trudov, Rostov-na-Donu, 23–26 aprelya 2019 goda. Tom 4* [Transport: science, education, production (Transport-2019): collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 23–26, 2019. Vol. 4]. Rostov-on-Don: Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Publ., 2019, pp. 138–142. (In Russian)

18. Grebennikov N. V. Matematicheskaya model' dlya analiza elektromagnitnykh processov v reaktivnykh induktornykh mashinah s sil'nym vzaimnym vliyaniem faz [Mathematical model for analysis of electromagnetic processes in reactive inductor machines with strong mutual influence of phases]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 315–321. DOI 10.20295/1815-588/H-2019-2-315-321. (In Russian)

Received: October 15, 2023

Accepted: November 23, 2023

#### Author's information:

Temur Z. TALAKHADZE — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Traction Rolling Stock”; 086temur086@gmail.com

Nikolay V. GREBENNIKOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Traction Rolling Stock”; grebennikovnv@mail.ru

Ivan V. BOLSHIH — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Traction Rolling Stock”; ivan.bolshih@yandex.ru