

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.4.016.2

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-1-1>

Концепция повышения энергоэффективности автономных локомотивов



Николай ГРЕБЕННИКОВ



Александр ЗАРИФЬЯН

**Николай Вячеславович Гребенников¹,
Александр Александрович Зарифьян²**

^{1,2} Ростовский государственный университет
путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия.

✉ ¹ grebennikovnv@mail.ru.

¹ РИНЦ: 3724–9891, Scopus: 56584746500,

Web of Science: A-2769–2014,

ORCID: 0000–0001–5959–2547.

² ORCID: 0000–0002–3072–8196.

АННОТАЦИЯ

Вопросам повышения энергоэффективности железнодорожного транспорта уделяется много внимания, предлагаются различные конструкции тягового подвижного состава с самыми передовыми техническими решениями, но, к сожалению, многие из них так и остаются лишь на стадии разработки или опытного образца.

Приведён анализ опыта эксплуатации существующих магистральных локомотивов с целью разработки основополагающих принципов концепции повышения энергоэффективности автономных локомотивов, направленных на создание модульной структуры локомотива, позволяющих согласовывать эксплуатационные нагрузки с режимами работы тягового оборудования, что даёт возможность обеспечить наи-

лучшие условия преобразования и передачи энергии на колёсные пары. Современные бортовые системы локомотивов регистрируют большое количество параметров, которые можно использовать как для определения энергоэффективности работы локомотива, так и для оценки новых технических решений, направленных на применение дискретно-адаптивного управления работой модульного исполнения дизель-генераторных установок и тяговых электродвигателей в условиях эксплуатации магистральных локомотивов.

Реализация предлагаемой концепции позволяет сэкономить до 20 % дизельного топлива при выполнении перевозочной работы, что подтверждено на опытном образце локомотива.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, энергоэффективность, локомотив, тепловоз, коэффициент полезного действия, модульная структура, тяговое оборудование.

Для цитирования: Гребенников Н. В., Зарифьян А. А. Концепция повышения энергоэффективности автономных локомотивов // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 1 (104). С. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-21-1-1>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергетической эффективности отраслей промышленности является важной и приоритетной задачей¹, решение которой способствует росту и развитию экономики Российской Федерации. Транспорт играет важнейшую роль при транспортировке грузов и готовой продукции между предприятиями и потребителями, при этом на долю железнодорожного транспорта приходится в нашей стране до 87 % грузооборота транспортных средств. Поэтому вопросы повышения энергоэффективности эксплуатации локомотивов всегда актуальны, что подтверждается утверждёнными энергетическими стратегиями развития холдинга «Российские железные дороги»², направленными на повышение тяговых свойств локомотивов при снижении затрат на электроэнергию и дизельное топливо в среднем на 10 %.

В настоящее время во многих странах ведутся активные работы по поиску оптимальных технических решений для создания энергоэффективных локомотивов [1; 2] с различными вариантами исполнения тягового оборудования [3]. Основные направления в этой области направлены на переход к многодизельным силовым установкам [4–8], применение асинхронного привода и накопителей энергии [9–11].

Обзор литературных источников в области опыта эксплуатации маневровых и магистральных локомотивов показал, что:

- на сегодняшний день превалирует констатация низкой энергетической эффективности маневровых и мощных современных магистральных локомотивов, особенно при работе с легковесными поездами [12; 13]. Несмотря на разработки многодизельных локомотивов с бесколлекторным тяговым приводом преимущественно выпускаются однодизельные маневровые тепловозы с передачей мощности постоянного тока и однодизельные (в секции) магистральные тепловозы с передачей мощности переменного постоянного тока;
- повышение энергоэффективности перевозочного процесса не может быть достигну-

¹ Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации.

² См., напр.: Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). – Москва: ОАО «РЖД». – 2015. – 128 с.

то только лишь за счёт создания новых мощных локомотивов, так как особое внимание стоит уделять режимам работы тягового оборудования локомотивов, что позволит привести мощностные характеристики в соответствие с условиями эксплуатации [14], а также усовершенствовать алгоритмы работы тягового и вспомогательного оборудования [15];

– существует целый ряд энергетических показателей для автономных локомотивов, которые нормируются только для полной мощности локомотива при скоростях движения от 40 до 90 % конструкционной скорости, при этом эксплуатационная эффективность оценивается только по показателю удельного расхода топлива на единицу перевозочной работы, исходя из которого трудно оценить непосредственно эффективность автономного тягового подвижного состава [16].

Целью исследования, результаты которого приведены в статье, является разработка основополагающих принципов концепции повышения энергоэффективности автономных локомотивов, направленных на создание модульной структуры локомотива, позволяющих согласовывать эксплуатационные нагрузки с режимами работы тягового оборудования для обеспечения наилучших условий преобразования и передачи энергии на колёсные пары.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ энергоэффективности тягового оборудования в условиях эксплуатации

При проведении реостатных испытаний тепловоза можно получить зависимость коэффициента полезного действия (КПД) дизель-генераторной установки от мощности или позиции контроллера машиниста (ПКМ), из которой видно, что КПД меняется достаточно в широком диапазоне, как правило, от 25 до 37 %. Используя данные, полученные для дизель-генераторной установки тепловоза 2ТЭ25К^М, определена зависимость перерасхода дизельного топлива от используемой позиции контроллера машиниста, которая представлена на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что работа дизель-генераторной установки тепловоза 2ТЭ25К^М на низких позициях контроллера машиниста приводит к существенному перерасходу дизельного топлива.





Рис. 1. Перерасход дизельного топлива в зависимости от позиции контроллера машиниста [выполнено авторами].

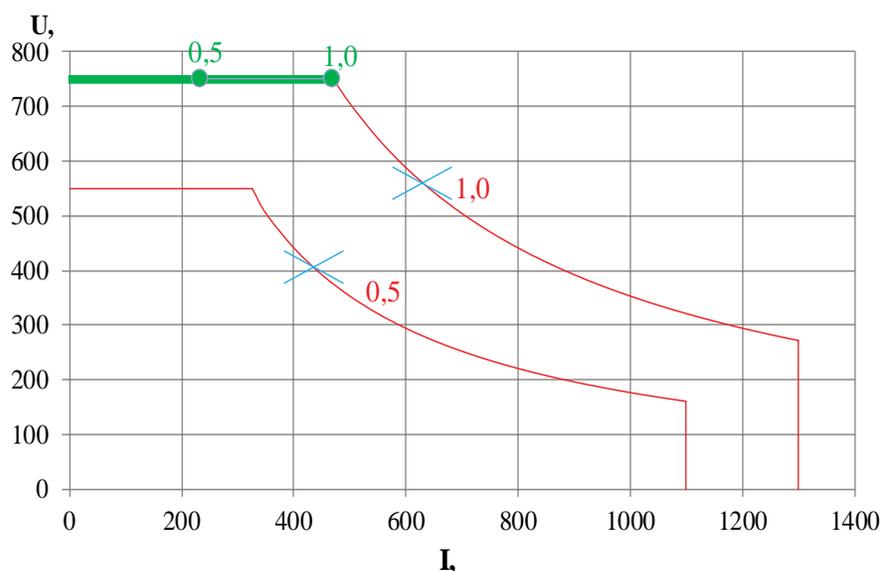


Рис. 2. Внешняя и частичная характеристики тягового генератора [выполнено авторами].

Так же причиной снижения энергоэффективности локомотива является управление электрической передачей мощности по напряжению, что приводит к увеличению токовой нагрузки тяговых электрических машин и, как следствие, к существенному увеличению доли потерь, зависящих от квадрата тока:

$$\eta_{ТЭМ} = 1 - \frac{I_{ТЭМ}^2 \cdot r + \Delta P_{\text{пост}}}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + I_{ТЭМ}^2 \cdot r + \Delta P_{\text{пост}}}, \quad (1)$$

где $I_{ТЭМ}$ – ток тяговой электрической машины;

r – приведённое сопротивление, учитывающее как омические потери, так и другие потери, зависящие от квадрата тока;

$\Delta P_{\text{пост}}$ – величина условно-постоянных потерь;

P_1 – входная мощность (для двигателя $P_1 = U \cdot I$);

P_2 – выходная мощность (для генератора $P_2 = U \cdot I$).

Из формулы (1) видно, что при применении регулирования по напряжению, изменяется подводимая мощность, но при этом потери мощности в электрической машине остаются такими же, что приводит к существенному снижению энергоэффективности тяговых электрических машин (тягового генератора и тягового двигателя). Это особенно актуально при применении классической гиперболической внешней характеристики для электрических

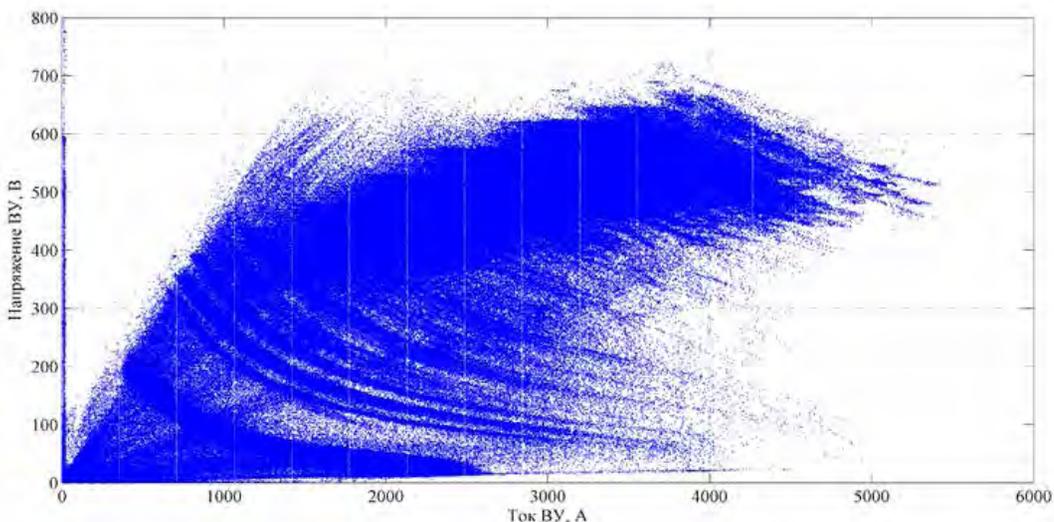


Рис. 3. Поле рабочих точек тягового генератора тепловоза ТЭП70БС [выполнено авторами].

передач постоянного или переменного тока (рис. 2). С точки зрения минимизации потерь, зависящих от квадрата тока, целесообразно применять внешнюю тяговую характеристику в виде прямой линии, при фиксированном значении напряжения, что представлено зелёной (верхним прямым отрезком на черно-белом изображении) линией на рис. 2.

Проведённый анализ данных, регистрируемых бортовыми системами тепловозов ТЭП70БС, 2ТЭ25К^М, подтвердил, что продолжительное время тяговые электрические машины работают с высокими значениями токов при низких значениях напряжений. В качестве примера можно привести поле рабочих точек тягового генератора тепловоза ТЭП70БС (рис. 3).

Проведённый анализ данных для 2ТЭ25А с электрической передачей переменного тока и асинхронным тяговым приводом показал, что каждой позиции контроллера машиниста соответствует свой уровень напряжения синхронного генератора, который поддерживается системой управления тепловоза, что представлено на рис. 4.

По результатам обработки данных выявлено, что поддержание фиксированного значения напряжения для каждой позиции позволило существенно уменьшить потери, что обеспечило повышение эксплуатационного КПД синхронного тягового генератора тепловоза 2ТЭ25А на 2,5 % по сравнению с аналогичным генератором, применяемым на тепловозе ТЭП70БС.

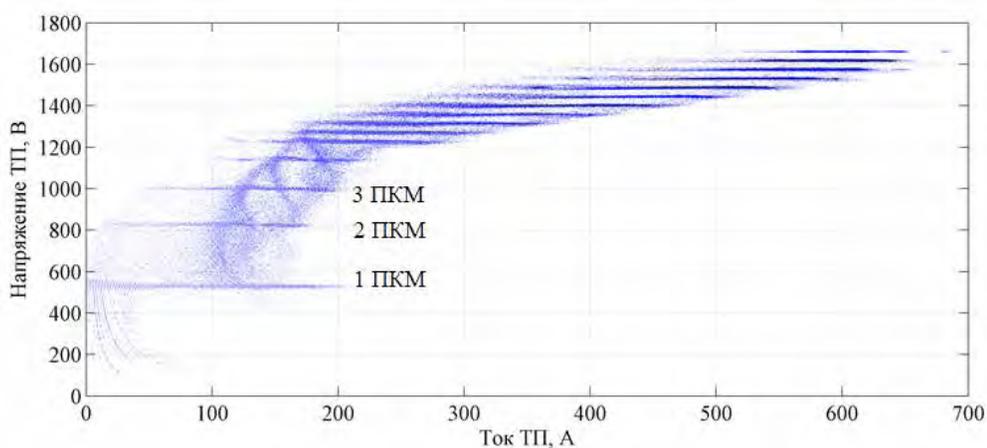


Рис. 4. Поле рабочих точек тягового генератора тепловоза 2ТЭ25А [выполнено авторами].



Проведённый анализ энергоэффективности работы тепловозов различного рода службы (грузового, пассажирского и маневрового) в условиях эксплуатации показал, что:

- большая доля времени приходится на работу дизельного двигателя на холостом ходу: 40...50 % времени независимо от рода службы;
- эксплуатационный коэффициент полезного использования мощности для маневрового тепловоза составляет 0,02;
- эксплуатационный коэффициент полезного использования мощности для магистральных тепловозов составил 0,24...0,3;
- управление передачей мощности по гиперболической характеристике увеличивает долю омических потерь во всех силовых элементах электрической передачи мощности.

Концепция повышения энергетической эффективности

Концепция повышения энергетической эффективности автономных локомотивов заключается в разработке конструкции локомотива, позволяющей оперативно осуществлять принцип масштабируемости нагрузки, то есть, способности распределённой системы легко расширять и сокращать свои ресурсы для адаптации к более тяжёлым или более лёгким нагрузкам, а использование тягового и вспомогательного оборудования локомотива должно соответствовать текущим условиям работы локомотива.

Поэтому при разработке структурных схем перспективного автономного тягового подвижного состава должны учитываться следующие основные положения концепции повышения энергетической эффективности автономных локомотивов:

- применение модульных энергетических установок, позволяющих обеспечить требуемую мощность в соответствии с текущими условиями движения. Наиболее перспективным видится применение двух (для грузового локомотива) и четырёх (для пассажирского и маневрового локомотива) энергетических установок на одной секции локомотива. Количество энергетических установок на грузовых тепловозах обусловлено количеством секций тепловоза, то есть, для двухсекционного локомотива будет четыре энергетических установки, а для трёхсекционного – шесть энергетических установок;

- применение общего звена постоянного напряжения (тока) с фиксированным значением напряжения (не менее 600 В) для всех режимов работы тягового и вспомогательного оборудования, что позволит выработать единые требования для разработки, проектирования и модульной структуры оборудования локомотива и обеспечить снижение доли потерь, зависящих от токовой нагрузки, кроме этого становится возможным использование тягового генератора в режиме стартера для запуска дизеля и модернизированной штатной аккумуляторной батареи с тяговыми аккумуляторами как накопителя энергии, для кратковременных режимов нагружения;

- питание тяговых бесколлекторных двигателей осуществляется от автономных инверторов напряжения статических преобразователей, подключённых к звену постоянного напряжения. Управление инверторами – индивидуальное с поосным регулированием момента тяговых двигателей, с возможностью полного отключения;

- применение двухуровневого дискретно-адаптивного управления [14] энергетической эффективностью автономного тягового подвижного состава при работе с неполной нагрузкой, что позволит рационально использовать доступную мощность каждого элемента тягового оборудования локомотива [17];

- питание вспомогательного оборудования должно обеспечиваться многоканальными статическими преобразователями с независимыми каналами, позволяющими индивидуально управлять каждым элементом вспомогательного оборудования, это позволит добиться упрощения и унификации преобразователей собственных нужд и снизить затраты энергии на привод вспомогательных машин и агрегатов;

- применение накопителей энергии целесообразно только после обеспечения рациональных алгоритмов прямого и обратного электромеханического преобразования энергии в тяговых электрических машинах и рационального расхода энергии на собственные нужды, что требует сначала применения вышеизложенных основных положений.

Функциональная схема энергоэффективной передачи мощности на примере тепловоза приведена на рис. 5. В соответствии с функциональной схемой энергоэффективной передачи мощности тепловоза предусмотрено общее звено постоянного напряжения, к ко-

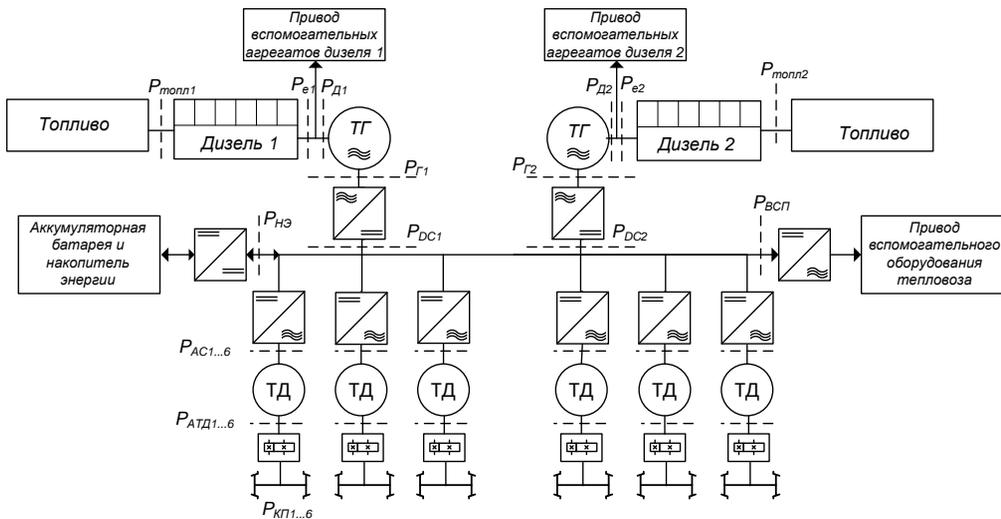


Рис. 5. Функциональная схема энергоэффективной ЭПМ [выполнено авторами].

тому подключаются все компоненты тягового оборудования, такое решение позволяет реализовать принцип модульной структуры, можно использовать две, как показано на рис. 5, или четыре энергетические установки, работающие на общее звено постоянного напряжения. Окончательный выбор количества дизель-генераторных установок обусловлен условиями профиля пути, потоком грузоперевозок и родом службы локомотива. От звена постоянного напряжения через многоканальные управляемые преобразователи собственных нужд получают питание электрические машины собственных нужд.

От звена постоянного напряжения через DC-DC преобразователь получают питание аккумуляторная батарея и цепи управления локомотивом, так же DC-DC преобразователь предназначен для преобразования напряжения при использовании накопителя энергии небольшой ёмкости для обеспечения кратковременных режимов работы с целью исключить непродолжительные запуски второй или последующей энергетической установки локомотива. Таким образом, в энергоэффективной передаче мощности локомотива должны использоваться не только современные бесколлекторные электрические машины, но и должно быть реализовано управление энергетической эффективностью тягового и вспомогательного оборудования путём многоуровневой оптимизации режимов работы оборудования (модульная энергетическая установка, тяговые двигатели, вспомогательное оборудование) в условиях реальной эксплуатации, что позволит существенно повы-

сить энергоэффективность автономного тягового подвижного состава.

Оценка применения концепции для условий эксплуатации

Рассмотрим возможность применения многодизельной силовой установки для магистральных локомотивов на сети железных дорог ОАО «РЖД», для этого проведены исследования количества и общей продолжительности поездок (разгон-движение-остановка) для магистральных локомотивов, в зависимости от максимально используемой позиции контроллера машиниста. На рис. 6 представлено семейство кривых скорости при движении тепловоза 2ТЭ25К^М с максимальной 5-й позицией контроллера машиниста. В результате выявлено 87 поездок за рассматриваемый период с максимальной продолжительностью до 1,65 часа. Общее время таких поездок составило 25,62 часа.

Анализ результатов исследований показал, что применение двухдизельной энергетической установки на магистральных локомотивах целесообразно, так как примерно в 30 % поездок грузового движения дизель-генераторная установка используется с КИМ не более 0,5, а в пассажирском – до 23 % поездок.

При возможности оперативного управления работающими дизель-генераторными установками в процессе движения доля времени, приходящаяся на режимы с КИМ не более 0,5, увеличивается до 50...60 %. На основе обработки данных произведена оцен-



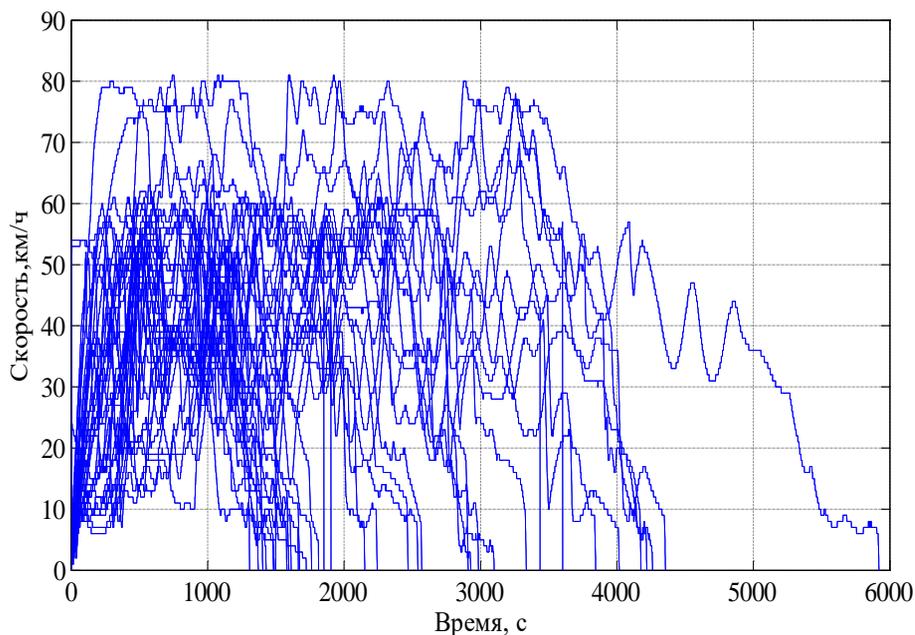


Рис. 6. Семейство кривых скорости при движении тепловоза 2ТЭ25КМ с максимальной 5-й ПКМ [выполнено авторами].

ка времени работы дизель-генераторных установок в составе модульного исполнения (результаты представлены в таблице 1), а также времени работы тяговых двигателей (ТЭД) при возможности применения системы дис-

кретно-адаптивного управления, что отражено в таблице 2.

Анализ представленных в таблицах 1 и 2 результатов показывает необходимость применения предлагаемой концепции для маги-

Таблица 1

Время работы модулей ДГУ для различного исполнения [выполнено авторами]

Вариант модульной ДГУ для одной секции тепловоза		Время работы модулей ДГУ, %		
		2ТЭ25КМ	2ТЭ25А	ТЭП70БС
Двухдизельная	1 ДГУ (0,5 Pн)	73	58	60
	2 ДГУ (1,0 Pн)	27	42	40
Трёхдизельная	1 ДГУ (0,25 Pн)	55	48	51
	2 ДГУ (0,5 Pн)	18	10	9
	3 ДГУ (1,0 Pн)	27	42	40
Четырёхдизельная	1 ДГУ (0,25 Pн)	55	48	51
	2 ДГУ (0,5 Pн)	18	10	9
	3 ДГУ (0,75 Pн)	17	19	18
	4 ДГУ (1,0 Pн)	10	23	22

Таблица 2

Время работы ТЭД [выполнено авторами]

Количество ТЭД в тяге	Время работы ТЭД, %		
	2ТЭ25КМ	2ТЭ25А	ТЭП70БС
1	41,4	22,4	30,4
2	20,8	15,9	11,8
3	12	15,9	12,5
4	8	12,2	11,4
5	16,8	19,2	29,9
6	1	14,4	4

стральных локомотивов, так как продолжительное время тяговое оборудование локомотива работает в режимах с неполной нагрузкой, что приводит к снижению энергоэффективности преобразования энергии на локомотиве.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ опыта эксплуатации магистральных тепловозов показал необходимость применения модульных конструкций тягового оборудования автономных локомотивов, что лежит в основе предложенной концепции повышения энергетической эффективности. По результатам данных бортовых регистраторов локомотивов определено время работы основного тягового оборудования и произведена оценка применения предлагаемой концепции для текущих условий эксплуатации. Получено, что возможно добиться экономии дизельного топлива до 20 %, из которых 10 % – за счёт повышения эксплуатационного КПД электрической передачи мощности и 10 % – за счёт применения модульных дизель-генераторных установок.

К настоящему времени предлагаемая концепция реализована при глубокой модернизации маневрового тепловоза ТЭМП-1т. В результате, при эксплуатации на Нижнетагильском металлургическом комбинате, экономия дизельного топлива составила до 20 % [18].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Heghmanns, A., Wilbrecht, S., Beitelshmidt, M., Geradts, K. Parameter optimization and operating strategy of a TEG system for railway vehicles. *Journal of Electronic Materials*, 2016, Vol. 45, pp. 1633–1641. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-015-4145-2> [ограниченный доступ].
2. Gautam, A., Agarwal, A. K. Experimental investigations of comparative performance, emission and combustion characteristics of a cottonseed biodiesel-fueled four-stroke locomotive diesel engine. *International Journal of Engine Research*, 2013, Vol. 14, Iss. 4, pp. 354–372. DOI: [10.1177/1468087412458215](https://doi.org/10.1177/1468087412458215) [ограниченный доступ].
3. Vitins, J. Dual-Mode and New Diesel Locomotive Developments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2012, Vol. 2289, Iss. 1, pp. 42–46. DOI: <https://doi.org/10.3141/2289-06> [ограниченный доступ].
4. Bonsen G. [et al]. Dual power locomotives for North America [*Zweikraft-Lokomotiven fuer Nordamerika*]. *Elektrische Bahnen-EB*, 2009, Vol. 107.

5. Знакомьтесь: гибридный маневровый тепловоз ТЭМ35 // *Локомотив*. – 2013. – № 11 (683). – С. 36–37.
6. Согласовано техническое задание на разработку гибридного тепловоза ТЭМ9Н «SinaraHybrid» // *Локомотив*. – 2011. – № 11 (659). – С. 42.
7. Ким С. И., Журавлёв С. Н., Федотов А. Б. Опыт эксплуатации тепловоза ЧМЭ3 с двухдизельной силовой установкой // *Локомотив*. – 2012. – № 11 (671). – С. 30–33.
8. Тишаев А. С., Зайцев А. Ю. Трёхдизельный локомотив ЧМЭ3 ЭКО: С заботой о будущем // *Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог*. – 2011. – № 4 (16). – С. 43–45.
9. Kolpahchyan, P., Zarifyan, A. (Jr). Study of the asynchronous traction drive's operating modes by computer simulation. Part 1: simulation results and analysis *Transport Problems*, 2015, Vol. 10, Iss. 2, pp. 125–136.
10. Попов И. В. Инертно-ёмкостной накопитель энергии для маневрового тепловоза // *Мир транспорта*. – 2019. – Т. 17. – № 3 (82). – С. 82–87. DOI: [10.30932/1992-3252-2019-17-3-82-87](https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-3-82-87).
11. Логинова Е. Ю., Кузнецов Г. Ю. Повышение тяговых характеристик тепловоза с гибридной энергетической установкой // *Мир транспорта*. – 2022. – Т. 20, № 3 (100). – С. 21–29. DOI: [10.30932/1992-3252-2022-20-3-3](https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-3-3).
12. Васюков Е. С., Бабков Ю. В., Перминов В. А., Белова Е. Е. Энергоэффективность тяги грузовых поездов тепловозами 2ТЭ25К «Пересвет» // *Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог*. – 2011. – № 1 (13). – С. 70–78.
13. Васюков Е. С., Бабков Ю. В., Перминов В. А., Белова Е. Е. Энергоэффективность тяги грузовых поездов тепловозами нового поколения 2ТЭ25А «Витязь» // *Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог*. – 2013. – № 3 (23). – С. 34–40.
14. Zarifyan, A., Obukhov, M. Electric Locomotives Energy Saving by the Discrete-Adaptive Traction Drive Control: Experimental Confirmation. 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021, pp. 25–30. DOI: [10.1109/UralCon52005.2021.9559475](https://doi.org/10.1109/UralCon52005.2021.9559475).
15. Пугачёв А. А., Воробьёв В. И., Михальченко Г. С., Космодамианский А. С., Самотканов А. В. Энергетические показатели качества электропривода вспомогательных систем тягового подвижного состава // *Мир транспорта и технологических машин*. – 2015. – № 1 (48) – С. 58–66.
16. Бабков Ю. В., Клименко Ю. И., Перминов В. А. Прямой и косвенный способы определения уровня энергетической эффективности тепловозов // *Железнодорожный транспорт*. – 2015. – № 3. – С. 55–60.
17. Zarifyan, A. [et al]. Increasing the Energy Efficiency of Rail Vehicles Equipped with a Multi-Motor Electrical Traction Drive. 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives, IWED 2019 Proceedings: 26, Moscow, 2019, pp. 1–6. DOI: [10.1109/IWED.2019.8664283](https://doi.org/10.1109/IWED.2019.8664283).
18. Киреев А. В., Кожемяка Н. М., Гребенников Н. В. Модернизация маневровых тепловозов ТГМ6А: повышение топливной экономичности // *Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог*. – 2022. – № 4 (60). – С. 56–61. ●

Информация об авторах:

Гребенников Николай Вячеславович – к.т.н., доцент, доцент кафедры тягового подвижного состава Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Россия, grebennikovnv@mail.ru.

Зарифьян Александр Александрович – д.т.н., профессор, профессор кафедры тягового подвижного состава Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Россия, ipr_dela@rgups.ru.

Статья поступила в редакцию 24.02.2023, одобрена после рецензирования 03.03.2023, принята к публикации 15.03.2023.

