

УДК 621.436, 629.424, 621.45

DOI 10.18698/0536-1044-2017-1-55-62

Метод повышения топливной экономичности дизель-генераторной установки тепловоза в условиях эксплуатации

В.А. Марков¹, А.Ю. Епишин², С.С. Лобода³

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² Российская открытая академия транспорта (МИИТ), 127994, Москва, Российская Федерация, Часовая ул., д. 22/2

³ ООО «ВАЙТЕКС», 143966, Реутов, Московская обл., Российская Федерация, ул. Гагарина, д. 35

The Method of Improving Fuel Efficiency of a Diesel Generator Set of the Locomotive in Operation

V.A. Markov¹, A.U. Epishin², S.S. Loboda³

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² Russian Open Transport Academy, 127994, Moscow, Russian Federation, Chasovaya St., Bldg. 22/2

³ OOO VAITEKS, 143966, Reutov, Moscow region, Russian Federation, Gagarin St., Bldg. 35



e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru, auep2014@yandex.ru, st-loboda@yandex.ru



Актуальность статьи обусловлена необходимостью улучшения показателей топливной экономичности силовых установок маневровых тепловозов, работающих в условиях частой смены скоростного и нагрузочного режимов. При этом преобладают режимы с частичной частотой вращения коленчатого вала тепловозного дизеля и неполной нагрузкой. Показатели топливной экономичности остаются основными параметрами, характеризующими эффективность работы тепловозного дизеля. Предложен метод улучшения топливной экономичности дизель-генераторной установки тепловоза, заключающийся в оптимизации тепловозной характеристики. Разработана методика расчета такой характеристики. Как правило, тепловозную характеристику определяют эмпирическим путем. Предложенная методика позволяет более обоснованно выбрать форму этой характеристики. Проведены расчеты оптимизированной тепловозной характеристики тепловозного дизель-генератора 21-26ДГ тепловоза 2ТЭ25К. Формирование такой характеристики позволяет снизить расход топлива дизель-генераторной установки тепловоза в условиях эксплуатации при обеспечении приемлемых показателей тепловой напряженности деталей дизельного двигателя.

Ключевые слова: тепловоз, дизель-генераторная установка, дизельный двигатель, топливная экономичность, тепловозная характеристика.



This paper is necessitated by the need to improve fuel efficiency indicators of power units in shunting diesel locomotives that work under frequently changing speed and load conditions. The conditions with partial rotation frequency of the diesel crankshaft and partial load usually prevail. Fuel efficiency indicators remain the main parameters that characterize locomotive diesel efficiency. The method of improving fuel efficiency of a generator for a diesel locomotive, which optimizes the locomotive characteristic is proposed. Calculation techniques are developed. As a rule, the locomotive characteristic is determined empirically. The proposed method allows an informed selection of the form of this characteristic. The calculations of the optimized locomotive characteristic of the diesel generator 21-26DG for the locomotive 2TE25K are performed. The realization of this characteristic helps to reduce fuel

consumption of the diesel generator set of the locomotive under operating conditions, while ensuring acceptable thermal stress indicators of the diesel engine parts.

Keywords: locomotive, diesel generator set, diesel engine, fuel efficiency, locomotive characteristic.

Железнодорожный транспорт является крупнейшим потребителем энергоресурсов. На тягу поездов тепловозы расходуют около 3 млн т топлива в год, что составляет ~10 % его производства в России. В целом по сети железных дорог России затраты на топливно-энергетические ресурсы достигают примерно 11 % общеотраслевых эксплуатационных расходов, или около 60 млрд руб., из которых на тягу поездов расходуется 72 % [1, 2]. Согласно «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877р, и распоряжению президента ОАО «РЖД» от 11 февраля 2008 г. № 269р, одним из направлений снижения расходов на топливно-энергетические ресурсы принято совершенствование тягово-энергетических характеристик тепловозов. Формирование оптимизированных характеристик дизель-генераторных установок тепловозов обеспечивает работу дизелей в оптимальных режимах, и, как следствие, повышение показателей топливной экономичности и снижение выбросов токсичных компонентов отработавших газов (ОГ) дизелей [3–6].

Цель работы — повышение топливной экономичности дизель-генераторной установки тепловоза в условиях эксплуатации путем формирования оптимизированных характеристик силовых установок.

На тепловозах с электрической передачей применяют ступенчатое изменение частоты вращения при полном использовании наибольшего крутящего момента [7, 8]. С этой целью формируется тепловозная характеристика

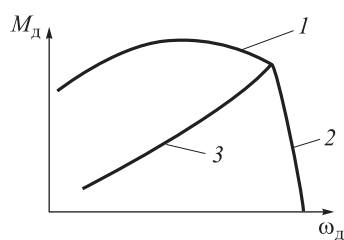


Рис. 1. Статические характеристики крутящего момента двигателя M_d : 1 — ВСХ автотракторных дизелей; 2 — их предельная регуляторная характеристика; 3 — генераторная (тепловозная) характеристика тепловозных дизелей

(ТХ), определяющая закон изменения нагрузки (эффективной мощности N_e) при смене скоростного режима работы (угловой скорости ω_d или частоты вращения коленчатого вала n) дизельного двигателя. При этом определяющий подачу топлива дозирующий орган (рейка топливного насоса высокого давления — ТНВД) не фиксируется в определенном положении, как у автотракторных двигателей при формировании внешней скоростной характеристики (ВСХ), а изменяет свое положение в соответствии с выбранной ТХ (рис. 1). Для дизелей, устанавливаемых на тепловозы с электрической передачей, у которых нагрузочным агрегатом служит тяговый генератор, ТХ одновременно будет и генераторной характеристикой, а ее форма зависит от настройки системы возбуждения тягового генератора. В условиях эксплуатации тепловозный дизельный двигатель работает только при режимах, соответствующих отдельным точкам ТХ, которые определяются положением рукоятки контроллера машиниста. Режим работы дизельного двигателя изменяет машинист путем перевода контроллера из одного положения в другое, что приводит к изменению предварительной деформации (затяжки) регулятора ТНВД. Таким образом, мощность дизеля в составе тепловозного дизель-генератора ниже ее значений, соответствующих ВСХ автотракторных дизелей (см. рис. 1).

Показатели топливной экономичности определяют потребительские качества, конкурентоспособность тепловозов и, как следствие, эффективность их эксплуатации. Основное влияние на топливную экономичность дизельных двигателей в условиях эксплуатации дизель-генераторной установки тепловоза оказывают распределение режимов работы дизель-генератора, форма ТХ и положение контроллера машиниста, определяющее скоростной и нагрузочный режимы двигателя. Следует отметить многорежимность работы тепловозных дизельных двигателей [9–11]. Частая смена скоростного и нагрузочного режимов особенно характерна для двигателей маневровых тепловозов. Но и в двигателях магистральных тепловозов наблюдаются постоянные изменения режимов (с интервалом 1...6 мин) даже при дви-

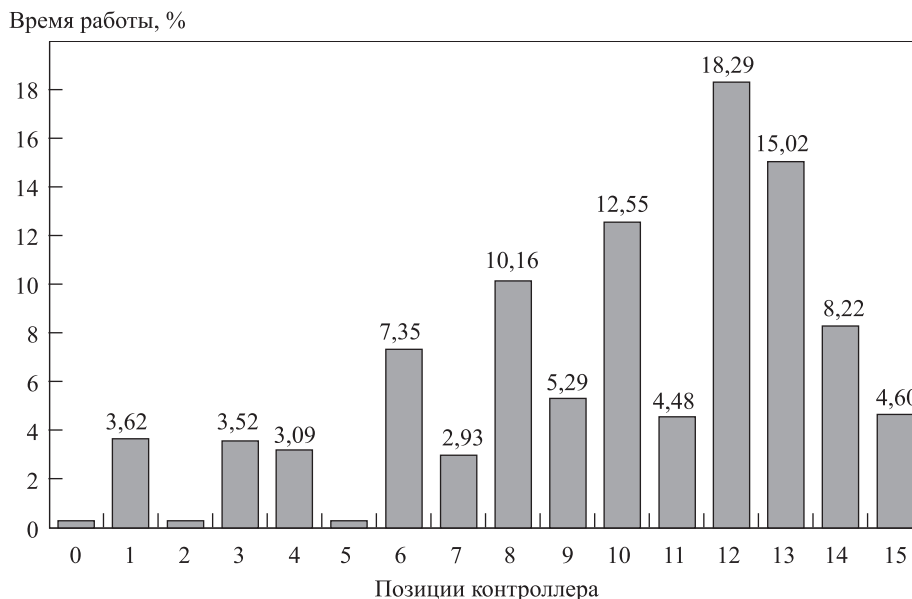


Рис. 2. Распределение времени работы тепловозного дизель-генератора в режимах, соответствующих различным позициям контроллера машиниста

жении поезда по сравнительно несложному участку пути [9]. Так, по данным работы [12] дизель-генераторная установка 21-29ДГ магистрального тепловоза функционирует в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов (рис. 2). При этом наибольшее время тепловозный дизельный двигатель работает в режимах, соответствующих 10, 12 и 13 позициям контроллера машиниста.

Как отмечено ранее, топливная экономичность тепловозного дизеля в значительной степени зависит от положения контроллера машиниста, т. е. от соответствующего ему скоростного и нагрузочного режимов работы двигателя. Это подтверждается приведенными на рис. 3 характеристиками удельного эффективного расхода топлива дизельных двигателей дизель-генераторов 21-26ДГ, 1А-9ДГ и 18-9ДГ тепловозов 2ТЭ2116, 2ТЭ25К(А) и 2ТЭ116УП [13, 14]. При этом следует отметить, что для достижения наилучшей эксплуатационной топливной экономичности двигателя необходимо обеспечить минимальный удельный эффективный расход топлива не только в режиме полной мощности, но и в режимах с частичной нагрузкой, соответствующих промежуточным позициям контроллера машиниста.

ТХ 3 (см. рис. 1), т. е. выбранная форма характеристики $N_e = f(\omega_n)$ или $N_e = f(n)$ в значительной степени влияет на топливную экономичность тепловозных дизель-генераторов [13-15]. Такая характеристика для каждого двигате-

ля является индивидуальной и определяется на основании результатов экспериментальных исследований. В установившихся и переходных режимах работы тепловозного дизель-генератора система регулирования должна обеспечивать изменение мощности по выбранной ТХ. При создании тепловоза 2ТЭ25К, оснащенного дизель-генератором 21-26ДГ с дизельным двигателем типа Д49 (16 ЧН 26/26), Коломенским тепловозостроительным заводом совместно с Брянским машиностроительным заводом предложена штатная ТХ, показанная на рис. 4.

Существует ряд методик определения целесообразной формы ТХ — кривой $N_e = f(n)$ — на основании данных испытаний тепловозного

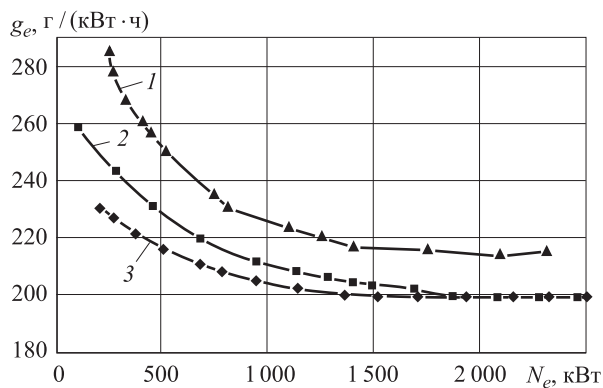


Рис. 3. Зависимость удельного эффективного расхода топлива g_e от эффективной мощности N_e при работе в режимах ТХ тепловозных дизель-генераторов:
1 — 1А-9ДГ; 2 — 18-9ДГ; 3 — 21-26ДГ

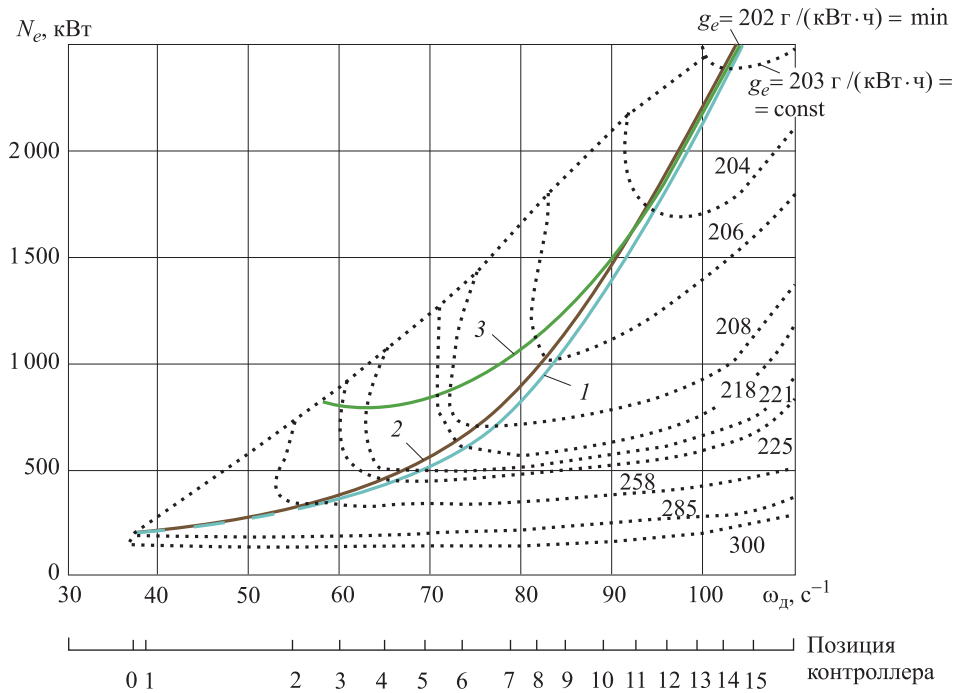


Рис. 4. Многопараметровая характеристика дизель-генератора 21-26ДГ тепловоза 2ТЭ25К: 1 — штатная (заводская) ТХ; 2 — ТХ, рассчитанная по предлагаемой методике; 3 — ТХ, рассчитанная по методике работ [2, 16]

дизель-генератора [1, 11, 14, 17, 18]. Одна из последних методик определения оптимальной по топливной экономичности кривой $N_e = f(n)$ предложена М.Н. Кирьяковым [2, 16]. Она заключается в составлении таблиц, отражающих зависимость удельного эффективного расхода топлива g_e от эффективной мощности N_e тепловозного дизеля, и выборе с использованием метода наименьших квадратов и указанной таблицы некоторой аппроксимирующей функции $g_e = f(N_e)$, соответствующей минимальному расходу топлива $g_{e \min}$. При этом выбирается некоторая опорная точка, через которую должна проходить выбранная характеристика $g_e = f(N_e)$. В результате полученная характеристика $g_e = f(N_e)$ оказывается не универсальной — при выборе разных опорных точек будет неодинаковой.

В данной работе предлагается несколько иной подход к выбору оптимизированной по топливной экономичности ТХ $N_e = f(\omega_d)$ или $N_e = f(n)$. При этом исследован дизельный двигатель Д49 дизель-генератора 21-26ДГ магистрального тепловоза 2ТЭ25К (дизель типа 12 ЧН 26/26 производства Коломенского тепловозостроительного завода) [19]. Многопараметровая характеристика дизель-генератора 21-26ДГ приведена на рис. 4 [14, 15].

При определении оптимизированной по топливной экономичности ТХ $N_e = f(\omega_d)$ сначала был подготовлен массив данных по удельному эффективному расходу топлива g_e , эффективной мощности N_e и угловой скорости вращения коленчатого вала ω_d с использованием многопараметровой характеристики дизельного двигателя Д49 (см. рис. 4). Затем была построена регрессионная модель зависимости g_e от N_e и ω_d . При этом экспериментальные данные рис. 4 были аппроксимированы полиномиальными зависимостями с помощью метода наименьших квадратов в программном комплексе MathCAD [20]. В результате получена зависимость $g_e = f(\omega_d, N_e)$ в виде

$$\begin{aligned}
 g_e = & 59,428\omega_d - 9,631 \cdot 10^{-16}N_e^5 - 1,582\omega_d^2 + \\
 & + 0,021\omega_d^3 - 0,000147\omega_d^4 + 4,043 \cdot 10^{-7}\omega_d^5 - \\
 & - N_e^3(-5,841 \cdot 10^{-9}\omega_d + 2,072 \cdot 10^{-11}\omega_d^2 + \\
 & + 5,4 \cdot 10^{-7}) - N_e^4(2,665 \cdot 10^{-13}\omega_d - 5,455 \cdot 10^{-11}) + \\
 & + N_e(-0,113\omega_d + 0,00174\omega_d^2 - 0,00001129\omega_d^3 + \\
 & + 2,606 \cdot 10^{-8}\omega_d^4 + 2,134) + \\
 & + N_e^2(0,000001107\omega_d - 1,059 \cdot 10^{-7}\omega_d^2 + \\
 & + 5,645 \cdot 10^{-10}\omega_d^3 + 0,0007699) - 569,597.
 \end{aligned}$$

Предлагаемая методика оптимизации формы ТХ $N_e = f(\omega_d)$ заключается в пошаговом определении точек ТХ. Базовой точкой (см. рис. 4) является та, где отмечен наименьший удельный эффективный расход топлива $g_e = 202 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$. В этой исходной точке ТХ определяется направление, в котором удельный эффективный расход топлива g_e получает наименьшее приращение. Направление характеризуется равенством

$$\frac{\partial g_e}{\partial \omega_d} + \frac{\partial g_e}{\partial N_e} = \min.$$

В полученном направлении на расстоянии $\Delta\omega_d = 1 \text{ с}^{-1}$ от базовой точки находится вторая точка ТХ. На последующих шагах расчета аналогичным образом определяются и другие точки ТХ. При движении по ТХ на каждом шаге расчета достигается минимальный рост расхода топлива. В результате такого расчета получена ТХ 2 (см. рис. 4), которая аппроксимирована выражением

$$N_e = 1,026\omega_d^2 - 135\omega_d + 5458.$$

Эта характеристика проходит примерно через вершины эллипсовидных характеристик на рис. 4 (изолиний удельного расхода g_e) и достаточно близка к штатной (заводской) ТХ 1, которая описывается следующей полиномиальной зависимостью:

$$N_e = 1,018\omega_d^2 - 119\omega_d + 3860.$$

Оценка эксплуатационной топливной экономичности дизельного двигателя Д49 дизель-генератора 21-26ДГ тепловоза 2ТЭ25К проведена с использованием распределения времени работы тепловозного дизель-генератора в режимах, соответствующих различным позициям контроллера машиниста, представленного на рис. 2. В этом случае эксплуатационная (интегральная) топливная экономичность для 16 рассматриваемых режимов может быть охарактеризована условным (средним) удельным эффективным расходом топлива $g_{e \text{ усл}}$, определенным с использованием зависимости

$$g_{e \text{ усл}} = \frac{\sum_{i=1}^{16} (G_{T_i} K_i)}{\sum_{i=1}^{16} (N_{e_i} K_i)},$$

где G_{T_i} — часовой расход топлива на i -м режиме; K_i — весовые коэффициенты, отражающие долю времени каждого режима; $\sum (N_{e_i} K_i)$ —

Значения давления и температуры ОГ в выпускном коллекторе дизельного двигателя при работе в режимах ТХ дизель-генератора 21-26ДГ

Частота вращения коленчатого вала двигателя, рад/с	Давление ОГ, МПа	Температура ОГ, К
36,6	0,118/0,117	481/482
54,4	0,124/0,127	497/512
83,7	0,195/0,197	627/639
104,7	0,253/0,254	779/781

Примечание. В числителе дроби указаны значения для штатной характеристики, в знаменателе — для опытной.

условная средняя мощность дизеля на рассматриваемых режимах.

При реализации штатной (заводской) ТХ условный удельный эффективный расход топлива $g_{e \text{ усл}} = 210,5 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, а при формировании рассчитанной по предлагаемой методике ТХ он снизился до $210,0 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$. В этом случае несколько повышаются давление и температура ОГ в выпускном коллекторе исследуемого дизеля при работе в режимах ТХ, однако максимальное увеличение температуры ОГ не превышает 25 К, что подтверждается данными, приведенными в таблице.

Для оценки топливной экономичности рассматриваемого тепловозного дизеля при формировании различных ТХ проведены расчетные исследования, направленные на определение ТХ, оптимизированной в соответствии с методикой, описанной в работах [2, 16]. Как отмечено ранее, автором этих работ предложено аппроксимировать характеристику удельного эффективного расхода топлива $g_e = f(N_e)$, проходящую через точку с наилучшей топливной экономичностью, в виде

$$g_e = a_0 + a_1 N_e + a_2 N_e^2,$$

где a_0, a_1, a_2 — коэффициенты для каждого значения i -й частоты вращения коленчатого вала дизеля n , определяемые с помощью метода наименьших квадратов и выражения для функционала

$$\Phi = \sum_{i=1}^{16} [g_{e_i} - a_0 - a_1 N_{e_i} - a_2 N_{e_i}^2]^2 \Rightarrow \min.$$

Полученная ТХ имеет форму кривой, описываемой уравнением второго порядка

$$(N_e - N_{e_0}) = k_1 (\omega_d - \omega_{d_0}) + k_2 (\omega_d - \omega_{d_0})^2$$

и проходящей через базовую точку (параметры двигателя в этой точке имеют индекс «о») с наименьшим удельным эффективным расходом топлива (см. рис. 4) $g_e = 202 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$. Здесь k_1 и k_2 — константы.

Рассчитанная с использованием данной методики ТХ 3 описывается выражением

$$N_e = 1,020\omega_d^2 - 119\omega_d + 3886.$$

Формирование такой характеристики в дизельном двигателе Д49 дизель-генератора 21-26ДГ тепловоза 2ТЭ25К обеспечивает условный удельный эффективный расход топлива $g_{e \text{ усл}} = 208,8 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$. Это несколько ниже расхода топлива $g_{e \text{ усл}} = 210,0 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ в случае реализации ТХ 2 (см. рис. 4), полученной по методике, предложенной авторами настоящей статьи. Однако при формировании ТХ 3 возможно снижение ресурса дизеля, связанное с более высокой теплонапряженностью деталей дизельного двигателя. В этом случае повышение температур ОГ достигает 150 К, что недопустимо.

Выводы

1. Предложенный метод повышения топливной экономичности дизель-генераторной

установки тепловоза заключается в выборе оптимальной формы ТХ, обеспечивающей минимальный расход топлива силовой установки в условиях эксплуатации.

2. Разработан метод оптимизации ТХ по топливной экономичности дизель-генераторной установки тепловоза, базирующийся на ее пошаговом расчете и обеспечении минимального роста расхода топлива на каждом шаге.

3. Проведенные расчетные исследования позволили получить оптимизированную ТХ тепловозного дизель-генератора, реализация которой снижает эксплуатационный удельный расход топлива при обеспечении приемлемых показателей тепловой напряженности деталей дизельного двигателя.

4. Изложенная методика определения ТХ тепловозного дизель-генератора позволяет оптимизировать статические характеристики дизеля как отдельного элемента тепловозной силовой установки без моделирования других ее устройств и элементов передачи мощности с учетом показателей топливной экономичности дизельного двигателя, теплонапряженности его основных деталей и реального распределения времени работы тепловозного дизель-генератора на различных режимах.

Литература

- [1] Володин А.И., Сергеев С.В., Кирьяков М.Н. Применение микропроцессорных систем управления электропередачей тепловозов для реализации оптимальных режимов работы дизелей. *Известия Транссиба*, 2012, № 3, с. 18–23.
- [2] Кирьяков М.Н. Расчет оптимальной тепловозной характеристики дизеля. *Транспорт Урала*, 2011, № 2, с. 71–74.
- [3] Симак Р.С. Повышение энергоэффективности ОАО «РЖД» в контексте энергетической стратегии России. *Вестник ВНИИЖТ*, 2014, № 6, с. 21–25.
- [4] Мугинштейн Л.А., Молчанов А.И., Попов К.М. Совершенствование системы учета и контроля расхода топлива маневровых тепловозов. *Вестник ВНИИЖТ*, 2010, № 1, с. 8–18.
- [5] Гапанович В.А. Энергоэффективность — путь к снижению затрат и к экологической безопасности. *Железнодорожный транспорт*, 2014, № 8, с. 22–25.
- [6] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Топливная аппаратура и системы управления дизелей*. Москва, Изд-во Легион-Автодата, 2005. 344 с.
- [7] Рудая К.И., Логинова Е.Ю. *Тепловозы. Электрическое оборудование и схемы. Устройство и ремонт*. Москва, Транспорт, 1991. 304 с.
- [8] Александров А.А., Иващенко Н.А., ред. *Машиностроение. Энциклопедия. Том IV. Двигатели внутреннего сгорания*. Москва, Машиностроение, 2013. 784 с.
- [9] Патрахальцев Н.Н. *Неустановившиеся режимы работы двигателей внутреннего сгорания*. Москва, Изд-во РУДН, 2009. 380 с.
- [10] Симсон А.Э., Хомич А.З., Куриц А.А. *Тепловозные двигатели внутреннего сгорания*. Москва, Транспорт, 1987. 536 с.
- [11] Коссов Е.Е., Шапран Е.Н., Фурман В.В. *Совершенствование режимов работы силовых энергетических систем тепловозов*. Луганск, Изд-во Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, 2006. 280 с.

- [12] Нестрахов А.С., Егунов П.М. *Повышение топливной экономичности тепловозов*. Москва, Транспорт, 1991. 128 с.
- [13] Коссов Е.Е., Фурман В.В. Совершенствование качества переходного процесса при смене режима работы дизель-генератора тепловоза. *Вестник ВНИИЖТ*, 2012, № 2, с. 27–30.
- [14] Коссов Е.Е., Сухопаров С.И. *Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов*. Москва, Интекст, 1999. 184 с.
- [15] Фурман В.В. Метод расчета ограничительной характеристики топливopодачи тепловозного дизель-генератора. *Грузовик*, 2014, № 12, с. 16–18.
- [16] Володин А.И., Кирьяков М.Н. Оптимизация тепловозной характеристики дизеля для микропроцессорных систем управления электропередачей тепловоза. *Известия Транссиба*, 2012, № 1, с. 12–19.
- [17] Володин А.И. *Моделирование на ЭВМ работы тепловозных дизелей*. Москва, Транспорт, 1985. 216 с.
- [18] Володин А.И. *Локомотивные энергетические установки*. Москва, Желдориздат, 2002. 718 с.
- [19] Никитин Е.А., ред. *Тепловозные дизели типа Д49*. Москва, Транспорт, 1982. 255 с.
- [20] Макаров Е.Г. *Инженерные расчеты в MathCAD: учебный курс*. Санкт-Петербург, Питер, 2005. 448 с.

References

- [1] Volodin A.I., Sergeev S.V., Kir'iaikov M.N. Primenenie mikroprotsessornykh sistem upravleniia elektroperedachei teplovozov dlia realizatsii optimal'nykh rezhimov raboty dizelei [Application of microprocessor control systems electro transmission of locomotives for the realization of optimal modes of operation of diesel engines]. *Izvestiia Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies]. 2012, no. 3, pp. 18–23.
- [2] Kir'iaikov M.N. Raschet optimal'noi teplovoznnoi kharakteristiki dizelia [Calculation of the optimum characteristic for diesel engine]. *Transport Urala* [Ural trucks]. 2011, no. 2, pp. 71–74.
- [3] Simak R.S. Povyschenie energoeffektivnosti OAO «RZhD» v kontekste energeticheskoi strategii Rossii [Energy Efficiency Improvement of JSC RZD in in the context of the Energy Strategy of Russia]. *Vestnik VNIIZhT* [Railway research institute bulletin]. 2014, no. 6, pp. 21–25.
- [4] Muginshtein L.A., Molchanov A.I., Popov K.M. Sovershenstvovanie sistemy ucheta i kontrolya raskhoda topliva manevrovnykh teplovozov [Improving system of accounting and checking fuel consumption of shunting diesel locomotives]. *Vestnik VNIIZhT* [Railway research institute bulletin]. 2010, no. 1, pp. 8–18.
- [5] Gapanovich V.A. Energoeffektivnost' — put' k snizheniiu zatrat i k ekologicheskoi bezopasnosti [Energy efficiency — a way to reduce costs and environmental safety]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport]. 2014, no. 8, pp. 22–25.
- [6] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Toplivnaia apparatura i sistemy upravleniia dizelei* [Fuel equipment and diesel control system]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2005. 344 p.
- [7] Rudaia K.I., Loginova E.Iu. *Teplovozy. Elektricheskoe oborudovanie i skhemy. Ustroistvo i remont* [Diesel locomotives. Electrical equipment and circuits. Installation and repair]. Moscow, Transport publ., 1991. 304 p.
- [8] *Mashinostroenie. Entsiklopediia. Tom 4. Dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Mechanical Engineering. Encyclopedia. Volume 4. Internal combustion engines]. Ed. Aleksandrov A.A., Ivashchenko N.A. Moscow, Mashinostroenie publ., 2013. 784 s.
- [9] Patrakhaltsev N.N. *Neustanovivshiesia rezhimy raboty dvigatelei vnutrennego sgoraniia* [Unsteady operating conditions of the internal combustion engine]. Moscow, RUDN publ., 2009. 380 p.
- [10] Simson A.E., Khomich A.Z., Kurits A.A. *Teplovozye dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Diesel internal combustion engines]. Moscow, Transport publ., 1987. 536 p.
- [11] Kossov E.E., Shapran E.N., Furman V.V. *Sovershenstvovanie rezhimov raboty silovykh energeticheskikh sistem teplovozov* [Improved modes of power energy systems of diesel locomotives]. Lugansk, Vostochnoukrainskii natsional'nyi universitet im. V. Dalia publ., 2006. 280 p.

- [12] Nestrakhov A.S., Egunov P.M. *Povyshenie toplivnoi ekonomichnosti teplovozov* [Increasing fuel efficiency of diesel locomotives]. Moscow, Transport publ., 1991. 128 p.
- [13] Kossov E.E., Furman V.V. Sovershenstvovanie kachestva perekhodnogo protsessa pri smene rezhima raboty dizel'-generatora teplovoza [Improving quality of transient process while changing operation mode of locomotive diesel-generator]. *Vestnik VNIIZhT* [Railway research institute bulletin]. 2012, no. 2, pp. 27–30.
- [14] Kossov E.E., Sukhoparov S.I. *Optimizatsiia rezhimov raboty teplovoznnykh dizel'-generatorov* [Optimization of operating modes of diesel generators]. Moscow, Intekst publ., 1999. 184 p.
- [15] Furman V.V. Metod rascheta ogranichitel'noi kharakteristiki toplivopodachi teplovoznogo dizel'-generatora [Methods of Calculating Fuel Supply Limitation Characteristics for Transport Generator]. *Gruzovik* [Truck: Transportation Complex and Special Technique]. 2014, no. 12, pp. 16–18.
- [16] Volodin A.I., Kir'iakov M.N. Optimizatsiia teplovoznnoi kharakteristiki dizelia dlia mikroprotsessornykh sistem upravleniia elektroperedachei teplovoza [Optimization of the diesel characteristic of the diesel engine for microprocessor control systems electricity transmission of diesel locomotives]. *Izvestiia Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies]. 2012, no. 1, pp. 12–19.
- [17] Volodin A.I. *Modelirovanie na EVM raboty teplovoznnykh dizelei* [Computer modeling of diesel engines work]. Moscow, Transport publ., 1985. 216 p.
- [18] Volodin A.I. *Lokomotivnye energeticheskie ustanovki* [Locomotive power plants]. Moscow, Zheldorizdat publ., 2002. 718 p.
- [19] *Teplovoznnye dizeli tipa D49* [Diesel engines of type D49]. Ed. Nikitin E.A. Moscow, Transport publ., 1982. 255 p.
- [20] Makarov E.G. *Inzhenernye raschety v MathCAD: uchebnyi kurs* [Engineering calculations in MathCAD: training course]. St. Petersburg, Piter publ., 2005. 448 p.

Статья поступила в редакцию 26.09.2016

Информация об авторах

МАРКОВ Владимир Анатольевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru).

ЕПИШИН Алексей Юрьевич (Москва) — старший преподаватель кафедры «Нетяговый подвижной состав». Российская открытая академия транспорта (МИИТ) (127994, Москва, Российская Федерация, Часовая ул., д. 22/2, e-mail: auep2014@yandex.ru).

ЛОБОДА Станислав Сергеевич (Реутов) — инженер. ООО «ВАЙТЕКС» (143966, Реутов, Московская обл., Российская Федерация, ул. Гагарина, д. 35, e-mail: st-loboda@yandex.ru).

Information about the authors

MARKOV Vladimir Anatolievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department of Piston Engines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru).

EPISHIN Aleksey Yurievich (Moscow) — Senior Lecturer, Department of Unpowered Rolling Stock. Russian Open Transport Academy (МИИТ) (127994, Moscow, Russian Federation, Chasovaya St., Bldg. 22/2, e-mail: auep2014@yandex.ru).

LOBODA Stanislav Sergeevich (Reutov) — Engineer. ООО ВАЙТЕКС (143966, Reutov, Moscow region, Russian Federation, Gagarin St., Bldg. 35, e-mail: st-loboda@yandex.ru).