

УДК 621.436, 629.424, 621.45

**Метод повышения топливной экономичности тепловозного дизеля  
в условиях эксплуатации**

Марков В.А., Барченко Ф.Б., Епишин А.Ю., Лобода С.С.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

**Method of Improving the Fuel Efficiency of a Locomotive Diesel  
in Operation**

Markov V.A., Barchenko F.B., Epishin A.Yu., Loboda S.S.

*Moscow State Technical University named after N.E. Bauman*

*Предложен метод улучшения топливной экономичности дизель-генераторной установки тепловоза, заключающийся в оптимизации тепловозной характеристики. Предложена методика расчета этой характеристики. Проведены расчеты оптимизированной тепловозной характеристики тепловозного дизель-генератора. Формирование этой характеристики обеспечивает снижение расхода топлива дизель-генераторной установки тепловоза в условиях ее реальной эксплуатации.*

*A method of improving the fuel efficiency of a diesel generator set of the locomotive, which optimizes locomotive characteristics is suggested. The methods of calculating these characteristics is suggested. The calculations of optimized locomotive characteristics of the diesel generator set are conducted. The realization of this characteristic ensures reducing the fuel consumption of the diesel generator set of the locomotive under the condition of its real operation.*

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

**Key words:** locomotive, diesel generator set, diesel engine, fuel efficiency, locomotive characteristic

## ВВЕДЕНИЕ

Формирование оптимизированных характеристик дизель-генераторных установок тепловозов обеспечивает работу дизелей на оптимальных режимах, и, как следствие, повышение показателей топливной экономичности и снижение выбросов токсичных компонентов отработавших газов (ОГ) дизелей [1, 2]. На тепловозах с электрической передачей применяют ступенчатое изменение частоты вращения при полном использовании наибольшего крутящего момента [3, 4]. С этой целью формируется тепловозная характеристика, определяющая закон изменения нагрузки (эффективной мощности  $N_e$ ) при смене скоростного режима работы (угловой скорости  $\omega_d$  или частоты вращения коленчатого вала  $n$ ) дизельного двигателя. При этом дозирующий орган, определяющий подачу топлива (дозирующая 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 тепловозной характеристикой (рис. 1). Для дизелей, устанавливаемых на тепловозы с электрической передачей, у которых нагрузочным агрегатом является тяговый генератор, тепловозная характеристика одновременно является и генераторной характеристикой. Форма этой характеристики зависит от настройки системы возбуждения тягового генератора. В условиях реальной эксплуатации тепловозный дизель работает только на режимах, соответствующих отдельным точкам тепловозной характеристики, которые определяются положениями рукоятки контроллера машиниста. Перевод дизеля с одного режима на другой осуществляется машинистом путем перевода контроллера из одного положения в другое, что приводит к изменению предварительной деформации пружины регулятора ТНВД. Таким образом, мощность дизеля в составе тепловозного дизель-генератора ниже ее значений, соответствующих ВСХ автотракторных дизелей (см. рис. 1).

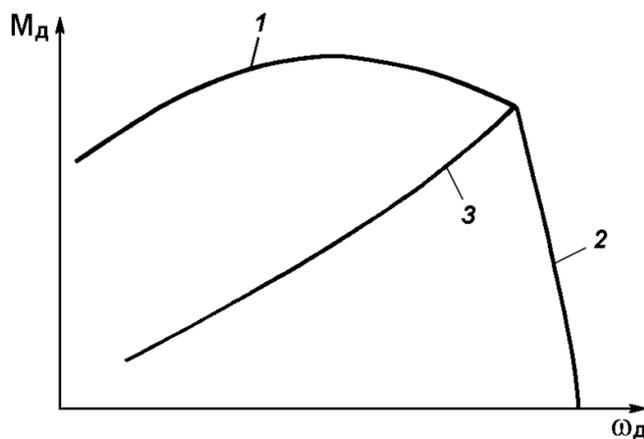


Рис. 1. Статические характеристики крутящего момента двигателя  $M_d$ : 1 – ВСХ автотракторных дизелей; 2 – их предельная регуляторная характеристика; 3 – генераторная (тепловозная) характеристика тепловозных дизелей

Показателями, предопределяющими потребительские качества и конкурентоспособность тепловозов и, как следствие, эффективность их эксплуатации, остаются показатели топливной экономичности. Определяющее влияние на топливную экономичность дизельных двигателей в условиях реальной эксплуатации дизель-генераторной установки тепловоза оказывают распределение режимов работы дизель-генератора, форма тепловозной характеристики и положение контроллера машиниста, определяющее скоростной и нагрузочный режим двигателя. Следует отметить многорежимность работы тепловозных дизелей [5, 6]. Частая смена скоростного и нагрузочного режимов особенно характерна для двигателей маневровых тепловозов. Но и в двигателях магистральных тепловозов наблюдаются постоянные с интервалом 1-6 мин изменения режимов, даже при движении поезда по сравнительно несложному участку пути [5]. Так, по данным работы [7] дизель-генераторная установка типа 21-29ДГ магистрального тепловоза работает в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов (рис. 2). При этом, наибольшее время тепловозный дизель работает на режимах, соответствующих 10, 12 и 13 позициям контроллера машиниста.

Как отмечено выше, топливная экономичность тепловозного дизеля в значительной степени зависит от положения контроллера машиниста, т.е. от соответствующего ему скоростного и нагрузочного режима работы двигателя. Это подтверждается приведенными на рис. 3 характеристиками удельного эффективного расхода топлива дизельных двигателей дизель-генераторов

типов 21-26ДГ, 1А-9ДГ и 18-9ДГ тепловозов 2ТЭ2116, 2ТЭ25К(А) и 2ТЭ116УП [8, 9]. При этом необходимо 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.

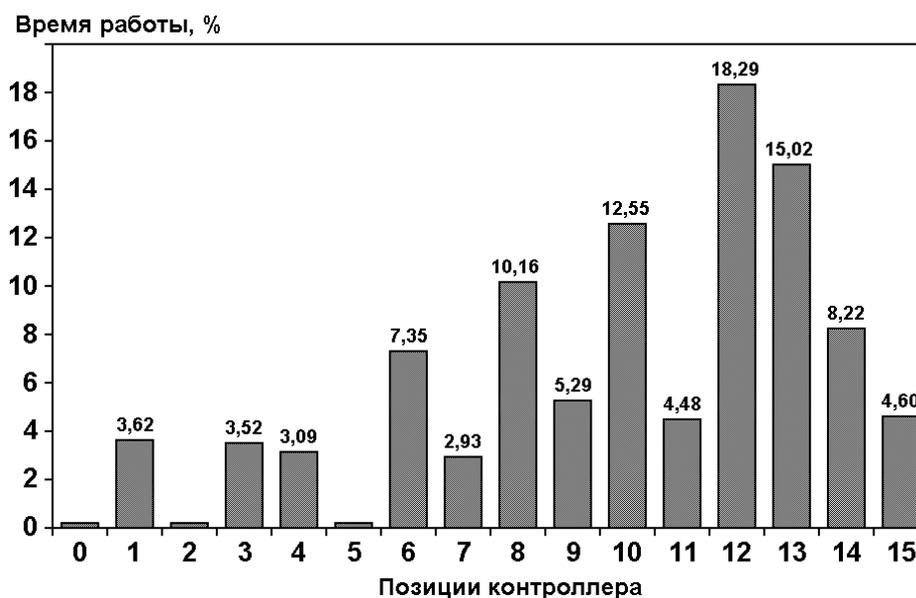


Рис. 2. Распределение времени работы тепловозного дизель-генератора на режимах, соответствующих различным позициям контроллера машиниста

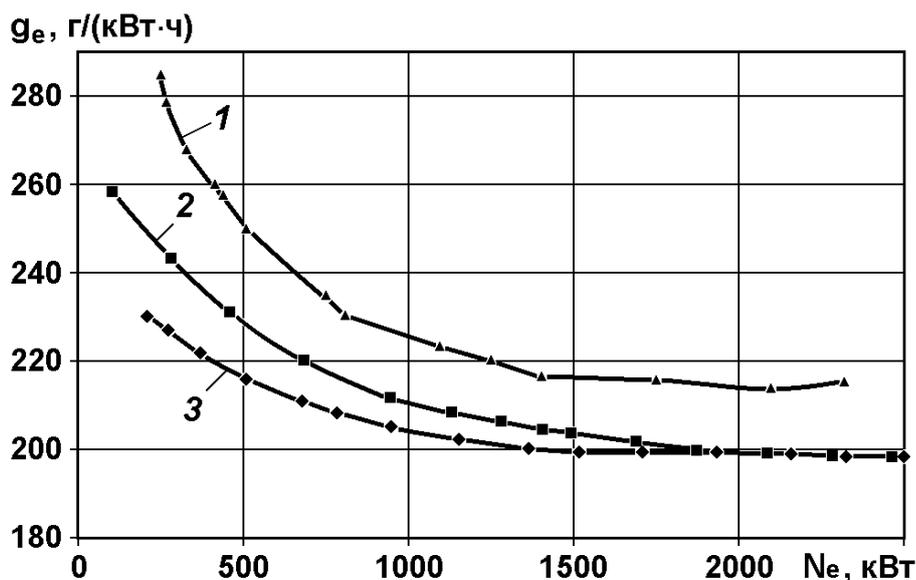


Рис. 3. Зависимость удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от нагрузки (эффективной мощности  $N_e$ ) на режимах тепловозной характеристики тепловозных дизель-генераторов: 1 – 1А-9ДГ; 2 – 18-9ДГ; 3 – 21-26ДГ

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЗНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Тепловозная характеристика, т.е. форма характеристики  $N_e = f(\omega_d)$  или  $N_e = f(n)$  в значительной степени влияет на топливную экономичность тепловозных дизель-генераторов [8, 9]. Такая характеристика для каждого двигателя является индивидуальной и определяется на основании результатов испытаний. На установившихся и переходных режимах работы тепловозного дизель-генератора система регулирования должна обеспечивать изменение мощности по выбранной тепловозной характеристике. При создании тепловоза 2ТЭ25К, оснащенного дизель-генератором 21-26ДГ с дизелем типа Д49 (16 ЧН 26/26) Коломенским тепловозостроительным заводом предложена штатная тепловозная характеристика, показанная на рис. 4 [10, 11].

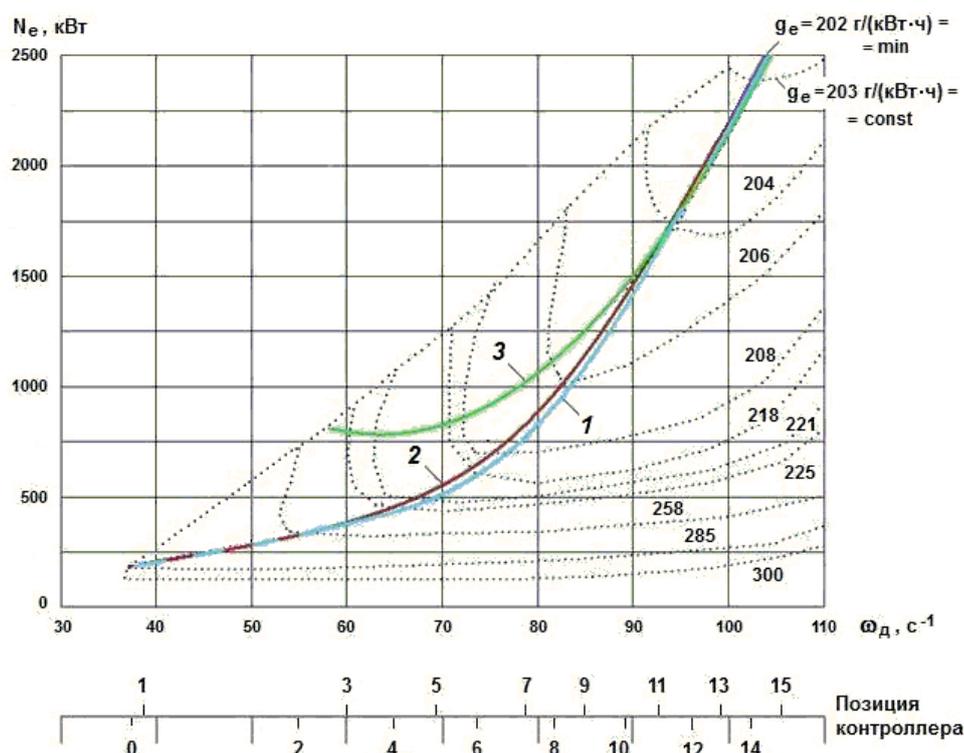


Рис. 4. Многопараметровая характеристика дизель-генератора 21-26ДГ тепловоза 2ТЭ25К: 1 – штатная (заводская) тепловозная характеристика; 2 – рассчитанная по предлагаемой методике тепловозная характеристика; 3 – рассчитанная по методике работ [10, 11] тепловозная характеристика

Существует ряд методик определения целесообразной формы тепловозной характеристики – кривой  $N_e = f(n)$  [6, 9, 12, 13]. Одна из последних методик определения оптимальной по топливной экономичности кривой  $N_e = f(n)$  предложена М.Н. Кирьяковым [10, 11]. 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 эта характеристика будет отличаться.

В данной работе предлагается несколько иной подход к выбору оптимизированной по топливной экономичности тепловозной характеристики  $N_e = f(\omega_d)$  или  $N_e = f(n)$ . При этом исследован дизель типа Д49 (12 ЧН 26/26) дизель-генератора 21-26ДГ магистрального тепловоза 2ТЭ25К [14]. Многопараметровая характеристика дизель-генератора 21-26ДГ показана на рис. 4 [9].

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

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

Предлагаемая методика оптимизации формы тепловозной характеристики  $N_e = f(\omega_d)$  заключается в пошаговом определении точек этой характеристики. При этом базовой точкой является точка с наименьшим удельным эффективным расходом топлива  $g_e = 202 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ , см. рис. 4. В этой исходной точке тепловозной характеристики определяется направление, в котором удельный эффективный расход топлива  $g_e$  получает наименьшее приращение. Это 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 тепловозной характеристики. На последующих шагах расчета аналогичным образом определяются и другие точки тепловозной характеристики. При движении по тепловозной характеристике на каждом шаге расчета достигается минимальный рост расхода топлива. В результате такого расчета получена тепловозная характеристика 2 на рис. 4, которая аппроксимирована следующим выражением

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

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

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

Оценка эксплуатационной топливной экономичности дизеля типа Д49 дизель-генератора 21-26ДГ тепловоза 2ТЭ25К проведена с использованием распределения времени работы тепловозного дизель-генератора на режимах, соответствующих различным позициям контроллера машиниста, представ-

ленного на рис. 2. В этом случае эксплуатационная (интегральная) топливная экономичность на 16-ти рассматриваемых режимах может быть охарактеризована условным (средним) удельным эффективным расходом топлива  $g_{e \text{ усл}}$ , определенным с использованием следующей зависимости

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

где  $G_{Ti}$  – часовой расход топлива на  $i$ -том режиме;  $K_i$  - весовые коэффициенты, отражающие долю времени каждого режима;  $\sum(N_{ei} \cdot K_i)$  – условная средняя мощность дизеля на рассматриваемых режимах. При реализации штатной (заводской) тепловозной характеристики указанный условный удельный эффективный расход топлива  $g_{e \text{ усл}}$  оказался равным 210,5 г/(кВт·ч), а при формировании рассчитанной по предлагаемой методике тепловозной характеристики он снизился до 210,0 г/(кВт·ч). В этом случае несколько повышаются давления и температуры ОГ в выпускном коллекторе исследуемого дизеля на режимах тепловозной характеристики, однако максимальное увеличение температуры ОГ не превышает 25 К. Это подтверждается данными, приведенными в таблице.

Таблица. Давления и температуры ОГ в выпускном коллекторе дизеля на режимах тепловозной характеристики дизель-генератора 21-26ДГ

Частота вращения коленчатого вала двигателя, рад/с	Давление ОГ, МПа		Температура ОГ, К	
	Штатная характеристика	Опытная характеристика	Штатная характеристика	Опытная характеристика
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

Для оценки топливной экономичности дизеля при формировании различных тепловозных характеристик проведены расчетные исследования, направленные на определение тепловозной характеристики, оптимизированной в соответствии с методикой, описанной в работах [10, 11]. Как отмечено

выше, автором этих работ предложено аппроксимировать характеристику удельного эффективного расхода топлива, проходящую через точку с наилучшей топливной экономичностью, функции  $g_e = f(N_e)$  в виде

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

где коэффициенты  $a_0, a_1, a_2$  для каждого значения  $i$  частоты вращения коленчатого вала дизеля  $n$  определяются с помощью метода наименьших квадратов с использованием выражения функционала  $\Phi$

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

Полученная таким образом тепловозная характеристика имеет форму кривой, описываемой уравнением второго порядка вида

$$(N_e - N_{e0}) = k_1(\omega_d - \omega_{d0}) + k_2(\omega_d - \omega_{d0})^2$$

и проходящей через базовую точку (параметры дизеля в этой точке имеют индекс «0») с наименьшим удельным эффективным расходом топлива  $g_e = 202$  г/(кВт·ч), см. рис. 4 ( $k_1$  и  $k_2$  – константы). Рассчитанная по этой методике тепловозная характеристика 3 на рис. 4 описывается выражением

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

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

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработан метод оптимизации тепловозной характеристики по топливной экономичности дизель-генераторной установки тепловоза, базирующийся на ее пошаговом расчете и обеспечении минимального роста расхода топлива на каждом шаге расчета.
- Проведенные расчеты позволили получить оптимизированную тепловозную характеристику тепловозного дизель-генератора, реализация которой позволила снизить эксплуатационный удельный расход топлива при обеспечении приемлемых показателей тепловой напряженности деталей дизеля.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гапанович В.А. *Энергоэффективность – путь к снижению затрат и к экологической безопасности*. Железнодорожный транспорт, 2014, № 8, с. 22-25.
- [2] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для ВУЗов*. Москва, Изд-во «Легион-Автодата», 2005. 344 с.
- [3] Рудая К.И., Логинова Е.Ю. *Тепловозы. Электрическое оборудование и схемы. Устройство и ремонт*. Москва, Транспорт, 1991. 304с.
- [4] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. и др. *Двигатели внутреннего сгорания: Энциклопедия. Машиностроение. Том IV/ Под ред. А.А. Александрова, Н.А. Иващенко*. Москва: Машиностроение, 2013. 784 с.
- [5] Патрахальцев Н.Н. *Неустановившиеся режимы работы двигателей внутреннего сгорания*. Москва: Изд-во Российского университета дружбы народов, 2009. 380 с.
- [6] 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.

- [7] Нестрахов А.С., Егунов П.М. *Повышение топливной экономичности тепловозов*. Москва: Транспорт, 1991. 128 с.
- [8] Коссов Е.Е., Фурман В.В. *Совершенствование качества переходного процесса при смене режима работы дизель-генератора тепловоза*. Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 2. С. 27-30.
- [9] Коссов Е.Е., Сухопаров С.И. *Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов*. Москва: Изд-во «Интекст», 1999. 184 с.
- [10] Кирьяков М.Н. *Расчет оптимальной тепловозной характеристики дизеля*. Транспорт Урала. 2011. № 2. С. 71-74.
- [11] Кирьяков М.Н. *Оптимизация тепловозной характеристики дизеля для микропроцессорных систем управления электропередачей тепловоза*. Известия Транссиба. 2012. № 1. С. 12-19.
- [12] 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.
- [13] Володин А.И. *Локомотивные энергетические установки*. Москва: ИПК «Желдориздат», 2002. 718 с.
- [14] Никитин Е.А., Ширяев В.М., Быков В.Г. и др. *Тепловозные дизели типа Д49* / Под ред. Е.А. Никитина. Москва: Транспорт, 1982. 255 с.