



МАРКОВ

Владимир Анатольевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

MARKOV

Vladimir Anatolevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ФУРМАН

Виктор Владимирович
(ООО
«ППП«Дизельавтоматика»)

FURMAN

Viktor Vladimirovich
(Saratov, Russian Federation,
«Dizelavtomatika»)



АКИМОВ

Виктор Сергеевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

AKIMOV

Viktor Sergeevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

Система топливоподачи с электронным управлением тепловозного дизеля

В.А. Марков, В.В. Фурман, В.С. Акимов

Удовлетворение современных требований к показателям топливной экономичности и токсичности отработавших газов тепловозных дизелей возможно лишь при использовании электронных систем автоматического управления параметрами двигателя. Вместе с тем такие системы управления пока не нашли широкого применения в отечественных тепловозных дизелях. В статье описана электронная система автоматического управления топливоподачей тепловозного дизеля типа Д50 (6 ЧН 31,8/33), разработанная ППП «Дизельавтоматика» (г. Саратов). Основным элементом этой системы являются электроуправляемые дозирующие клапаны, размещенные в надплунжерных полостях насосных секций топливного насоса высокого давления. Представлены результаты расчетных исследований системы топливоподачи с электронным управлением. Получены зависимости продолжительности открытия дозирующего клапана от частоты вращения кулачкового вала при различных требуемых массовых цикловых подачах топлива. Результаты расчетных исследований использованы при совершенствовании и доводке разработанной системы топливоподачи.

Ключевые слова: дизельный двигатель, система управления топливоподачей, дозирующий клапан.

Fuel Supply system with electronically control of diesel locomotive engine

V.A. Markov, V.V. Furman, V.S. Akimov

Meeting the current requirements for fuel economy and exhaust gases toxicity characteristics of locomotive-type diesel engines is possible only when using electronic systems of automatic control of engine parameters. However, said control systems are not yet widely used in locomotive-type diesel engines of domestic production. The paper describes the electronic system of fuel supply automatic control of locomotive-type diesel engine as D50 produced by «Dieselavtomatika» (Saratov city). The main elements of this system are the electronically controlled metering valves placed in the cavities of the plunger pump sections of high pressure fuel pump. Dependencies of the duration of metering valve opening on camshaft frequencies are obtained. The results of computational studies are used to improve and fine-tuning of the developed fuel supply system.

Keywords: diesel engine, fuel control system, metering valves.

Современный этап развития двигателестроения характеризуется увеличением потребления нефтяных топлив, повышением мировых цен на нефтепродукты и ухудшением экологической обстановки, что обусловлено ростом числа различных транспортных средств [1]. На территории Российской Федерации при их эксплуатации ежегодно сжигается около 110...115 млн т моторного топлива (автомобильного бензина — 35...40 млн т, дизельного топлива — 55...60 млн т, авиационного керосина — 10...15 млн т) [2]. С отработавшими газами (ОГ) в атмосферу выбрасывается около 30 млн т вредных веществ, в том числе до 15 млн т монооксида углерода СО, 12 млн т оксидов азота NO_x, 2 млн т несгоревших углеводородов СН_x, 1 млн т сажи (углерода С). При этом одним из главных потребителей моторных топлив остается железнодорожный транспорт, потребляющий около 11% всех моторных топлив, сжигаемых в различных транспортных средствах. На долю железнодорожного транспорта приходится 6,3% всех вредных веществ, поступающих в атмосферу, которые выделяют наземный, водный и воздушный транспорт (табл. 1) [2]. Причем среднесуточное потребление дизельного топлива одним маневровым тепловозом составляет около 240 кг, а магистральным — около 500 кг [3].

Таблица 1

Потребление моторных топлив и вредные выбросы основных видов транспорта

Вид транспорта	Установленная мощность, %	Потребление топлива		Выбросы в атмосферу	
		%	млн т	%	млн т
Автомобильный	50,0	56,5	65,0	71,3	21,7
Железнодорожный	16,0	11,0	12,6	6,3	1,9
Речной флот	8,0	5,9	6,8	2,6	0,8
Строительно-дорожные машины	4,0	1,9	2,2	1,3	0,4
Сельскохозяйственные и лесопромышленные машины	20,0	23,5	27,0	17,8	5,4
Авиация	2,0	1,2	1,4	0,7	0,2
Всего	100,0	100,0	115,0	100,0	30,4

Работа тепловозных дизелей характеризуется частыми и резкими изменениями скоростных и нагрузочных режимов [4, 5], особенно двигателей маневровых тепловозов. Двигатели магистральных тепловозов также функционируют с постоянным изменением режимов каждые 1...6 мин даже при движении поезда по сравнительно несложному участку пути [6]. Такая смена режимов работы дизельных двигателей тепловозов снижает качество их рабочих процессов, поскольку современные дизели представляют собой комбинированную установку, в состав которой входят несколько разнородных систем, взаимодействующих между собой в процессе работы: системы топливоподачи, воздухообеспечения, охлаждения и др. При разработке такой комбинированной установки индивидуальные характеристики перечисленных систем удается согласовать лишь на каком-то одном режиме (чаще номинальном). На других режимах эта согласованность нарушается, что приводит к ухудшению качества рабочих процессов дизеля и, как следствие, к снижению его экономических и экологических показателей. Обеспечить согласование характеристик систем дизеля в процессе работы при смене режимов и изменении условий эксплуатации возможно путем использования различных систем автоматического регулирования и управления (САР и САУ). Ряд проведенных исследований показывает, что внедрение микропроцессорных САР и САУ позволяет существенно улучшить показатели топливной экономичности и токсичности ОГ [7–9]. В частности, замена штатного гидромеханического регулятора частоты вращения электронным регулятором, воздействующим на дозирующую рейку топливного насоса высокого давления (ТНВД), позволяет снизить эксплуатационный расход топлива на 8...12% за счет снижения неравномерности частоты вращения.

Еще большая эффективность по топливной экономичности достигается при установке на дизельные двигатели систем электронного управления впрыскиванием топлива. Это объясняется более точным дозированием топлива, установкой оптимальных углов опережения впрыскивания топлива (УОВТ) в зависимости от частоты вращения и нагрузки, а также сни-

жением минимально-устойчивой частоты вращения дизеля.

Данный факт подтвержден при испытаниях электронной системы управления топливоподачей типа ЭСУВТ.01 тепловозного дизеля типа Д50, разработанной производственно-промышленным предприятием ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов). Эта электронная система управления топливоподачей включает насосную секцию ТНВД с плунжером 3 (рис. 1), приводимым в действие от кулачка кулачкового вала ТНВД [10]. При движении плунжера вверх топливо вытесняется в надплунжерную полость 12, в которой установлен клапан 6. При нахождении клапана 6 в крайнем левом положении надплунжерная полость 12 сообщена с линией 5 низкого давления ТНВД. Электронно-управляемый клапан 6 соединен с якорем 10 электромагнита 11. В требуемый момент времени на электромагнит 11 подается управляющий сигнал от электронного блока управ-

ления САУ и якорь 10 притягивается к электромагниту. При этом клапан 6 смещается вправо и своей кромкой 7 разобьет надплунжерную полость 12 с линией 5 низкого давления ТНВД. Затем топливо под высоким давлением вытесняется в штуцер 8 ТНВД. Использование клапана 6 для регулирования фаз начала и окончания подачи топлива позволяет гибко управлять процессом топливоподачи. В частности, при этом появляется возможность реализации сложных законов регулирования УОВТ в соответствии с изменениями скоростного и нагрузочного режимов работы.

Предложенная схема ТНВД использована при создании опытной электронной системы управления топливоподачей для дизелей типа Д50 (6 ЧН 31,8/33) производства ОАО «Пензадизельмаш» (Пензенский дизельный завод). Это среднеоборотный дизель мощностью $N_e = 730 \dots 880$ кВт (1 000...1 200 л. с.) для дизель-генераторных установок, железнодорожного и водного транспорта. Дизель типа Д50,

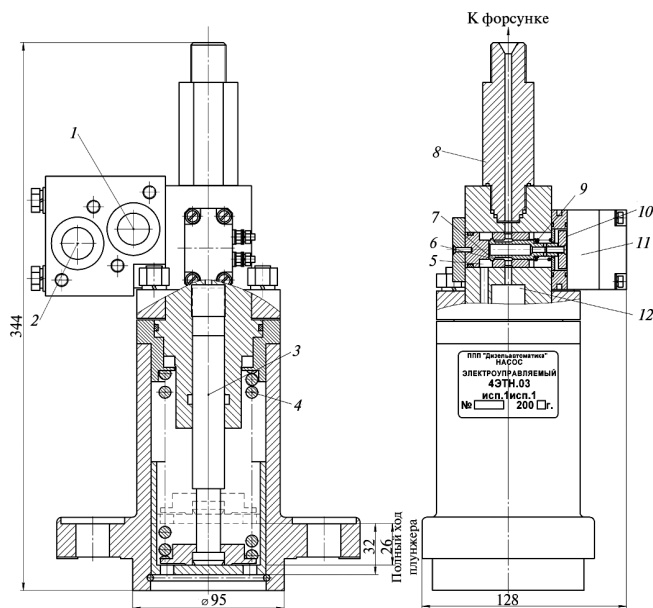


Рис. 1. Конструктивная схема ТНВД с электромагнитным клапаном управления подачей топлива:

- 1 — подвод топлива; 2 — отвод топлива;
- 3 — плунжер; 4 — пружина плунжера; 5 — линия низкого давления ТНВД; 6 — клапан; 7 — кромка клапана; 8 — штуцер ТНВД; 9 — возвратная пружина; 10 — якорь; 11 — электромагнит;
- 12 — надплунжерная полость

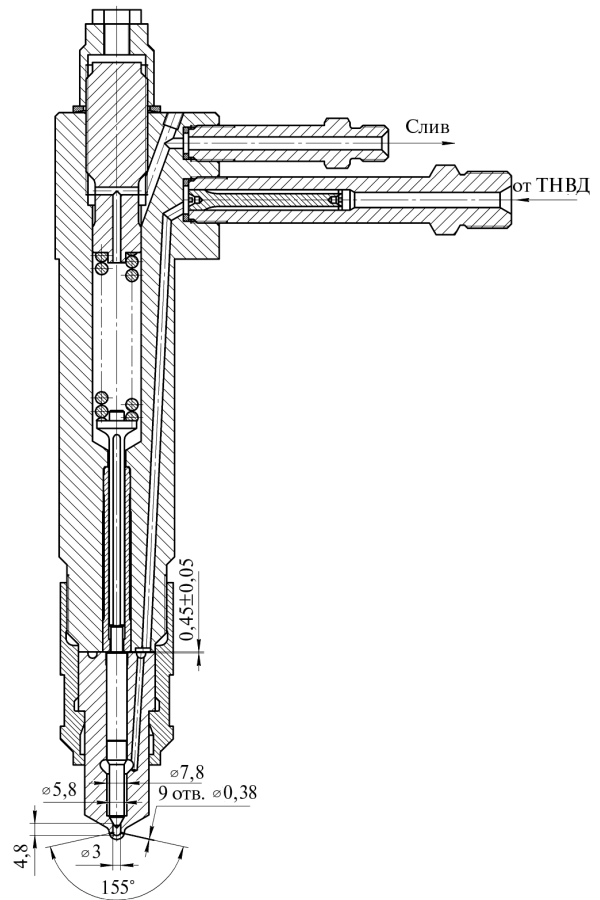


Рис. 2. Конструктивная схема многосопловой закрытой форсунки системы топливоподачи дизеля

нашедший широкое применение в дизель-генераторах маневровых, магистральных и промышленных тепловозов, оснащен неразделенной камерой сгорания в поршне типа Гессельмана диаметром $d_{к.с} = 256$ мм. В нем реализуется объемное смесеобразование.

В дизеле Д50 используется топливная аппаратура (ТА) разделенного типа, содержащая ТНВД, топливопроводы высокого давления и форсунки. Насосная секция ТНВД базового дизеля выполнена с плунжерами диаметром $d_{пл} = 20$ мм и полным ходом $h_{пл} = 26$ мм. В базовой системе топливоподачи ТНВД соединен с форсунками топливопроводами высокого давления. Длина нагнетательного топливопровода $L = 1650$ мм, его внутренний диаметр $d_{вн} = 3,5$ мм. В исследуемой системе топливоподачи применены многосопловые закрытые форсунки (рис. 2). Распылитель форсунки имеет девять распыливающих отверстий ($i_p = 9$) диаметром $d_p = 0,38$ мм. Угол конуса иглы форсунки $\gamma_{и} = 60^\circ$, ее ход $h_{и} = (0,45 \pm 0,05)$ мм, давление топлива в начале подъема иглы форсунки $p_{ф0} = 27,5$ МПа.

Для определения зависимости времени открытия дозирующего клапана и геометрической продолжительности подачи от частоты вращения кулачкового вала ТНВД и требуемой массовой цикловой подачи топлива были проведены моделирование и численные эксперименты с использованием программного комплекса «Впрыск», разработанного профессором Л.В. Греховым в МГТУ им. Н.Э. Баумана [7]. Примеры полученных расчетных закона движения затвора клапана, зависимости скорости плунжера от угла поворота вала ТНВД и диаграмм изменения давления впрыскивания топлива по углу поворота кулачкового вала представлены на рис. 3 и 4 [11].

По результатам проведенных расчетных исследований получены зависимости времени τ открытия дозирующего клапана и геометрической продолжительности подачи ϕ от частоты вращения кулачкового вала ТНВД $n_{т.н}$ и требуемой массовой цикловой подачи $g_{ц}$ топлива (табл. 2, рис. 5, 6). Полученные данные свидетельствуют о том, что продолжительность открытия дозирующего клапана изменяется от $\tau = 1,40$ мс при $n_{т.н} = 375$ мин⁻¹



Рис. 3. Закон движения затвора клапана и зависимость скорости плунжера от угла поворота вала ТНВД:

a — закон движения затвора клапана ($H_{кл}$);
b — скорость плунжера ($W_{пл}$)

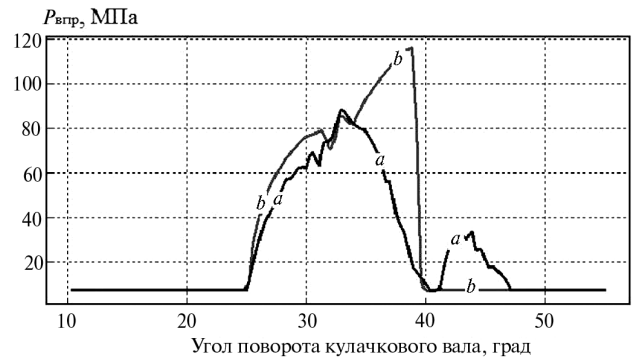


Рис. 4. Диаграмма изменения давления впрыскивания топлива по углу поворота кулачкового вала:

a — штатная система топливоподачи без электронного управления; *b* — электронная система ЭСУВТ.01

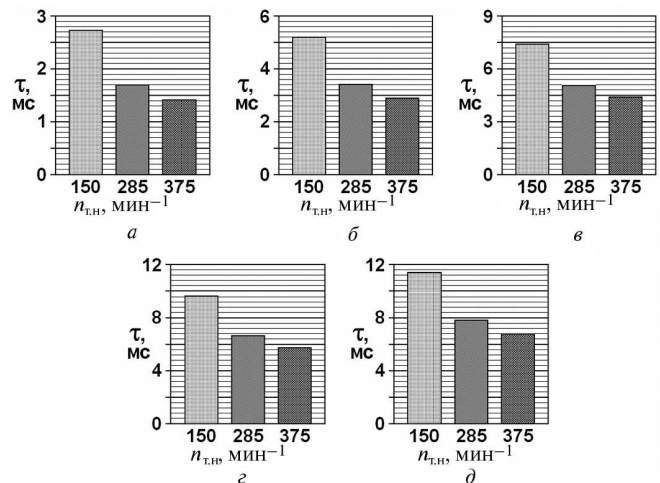


Рис. 5. Зависимость продолжительности открытия дозирующего клапана τ от частоты вращения кулачкового вала ТНВД $n_{т.н}$ при различных требуемых массовых цикловых подачах топлива:

a — $g_{ц} = 0,15$ г; *б* — $g_{ц} = 0,50$ г; *в* — $g_{ц} = 0,85$ г; *д* — $g_{ц} = 1,2$ г;

и $g_{ц} = 0,15$ г до $\tau = 11,38$ мс при $n_{т.н} = 150$ мин⁻¹ и $g_{ц} = 1,5$ г.

Таблица 2

Зависимость времени открытия дозирующего клапана и геометрической продолжительности подачи от частоты вращения кулачкового вала ТНВД и требуемой массовой цикловой подачи топлива

Параметры топливоподачи	Массовая цикловая подача топлива, г				
	0,15	0,50	0,85	1,20	1,50
$n_{т.н} = 150$ мин ⁻¹ (по двигателю $n = 300$ мин ⁻¹)					
Время открытия клапана τ , мс	2,71	5,20	7,43	9,61	11,38
Продолжительность подачи ϕ , град, поворота кулачкового вала	2,44	4,68	6,69	8,65	10,24
$n_{т.н} = 285$ мин ⁻¹ (по двигателю $n = 570$ мин ⁻¹)					
Время открытия клапана τ , мс	1,68	3,42	5,10	6,61	7,85
Продолжительность подачи ϕ , град, поворота кулачкового вала	2,88	5,85	8,72	11,30	13,42
$n_{т.н} = 375$ мин ⁻¹ (по двигателю $n = 750$ мин ⁻¹)					
Время открытия клапана τ , мс	1,40	2,90	4,41	5,74	6,79
Продолжительность подачи ϕ , град, поворота кулачкового вала	3,16	6,53	9,92	12,91	15,28

В соответствии с принятой схемой в ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов) изготовлены опытные секции ТНВД с электроуправляемыми клапанами, оснащенные системой управления ЭСУВТ.01. Результаты испытаний этой системы управления приведены в работе [10]. Они подтвердили работоспособность этой системы управления топливоподачей ЭСУВТ.01. Отмечено, что САУ дизеля Д50 с системой управления ЭСУВТ.01 характеризуется лучшими статическими и динамическими качествами и позволяет целенаправленно управлять УОВТ, что существенно улучшает показатели топливной экономичности и токсичности ОГ (в первую очередь — по выбросам оксидов азота NO_x и монооксида углерода CO).

Результаты стендовых испытаний электронной системы ЭСУВТ.01 на дизель-генераторе 1-ПДГ4Д, на котором ранее был установлен электронный регулятор частоты вращения ЭРЧМ30Т4-01, показали что:

- установка оптимальных УОВТ в зависимости от частоты вращения коленчатого вала дизеля позволила сократить удельный расход

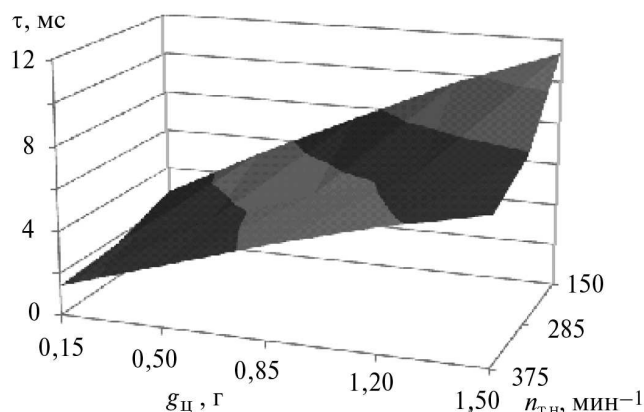


Рис. 6. Зависимость продолжительности открытия дозирующего клапана τ от частоты вращения кулачкового вала ТНВД $n_{т.н}$ и требуемой массовой цикловой подачи топлива $g_{ц}$

топлива на 1,7...14,4% в зависимости от позиции контроллера;

- снижение минимально-устойчивой частоты вращения дизеля до $n = 240$ мин⁻¹ на нулевой позиции контроллера позволило уменьшить часовой расход топлива на 34,3%, не ухудшая при этом показатели токсичности ОГ.

Аналогичные системы управления подачей топлива для дизелей разработаны ведущими двигателестроительными фирмами — Bosch, Caterpillar, Cummins, Detroit Diesel Allison и др. [12–15]. Испытания и длительная эксплуатация таких систем подтвердили их эффективность при снижении расхода топлива и улучшении показателей токсичности ОГ.

Литература

1. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
2. Новиков Л.А. Технологии снижения вредных выбросов тепловозов // Двигателестроение. 1997. № 1–2. С. 49–51.
3. Григорович Д.Н. Применение биотоплива на железнодорожном транспорте // Транспорт на альтернативном топливе. 2010. № 1. С. 59–65.
4. Двигатели внутреннего сгорания. Тепловозные дизели и газотурбинные установки / А.Э. Симсон, А.З. Хомич, А.А. Куриц и др. М.: Транспорт, 1980. 384 с.
5. 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.
6. Патрахальцев Н.Н. Неустановившиеся режимы работы двигателей внутреннего сгорания. М.: изд-во Российского университета дружбы народов, 2009. 380 с.
7. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Системы топливоподачи и управления дизелей. М.: Изд-во «Легион-Автотата», 2005. 344 с.

8. Луков Н.М. Автоматические системы управления и регулирования тепловозов. М.: Изд-во МИИТ, 1983. 144 с.

9. Пинский Ф.И., Давтян Р.И., Черняк Б.Я. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания. М.: Изд-во «Легион—Автodata», 2001. 136 с.

10. Марков В.А., Фурман В.В., Миронов В.А. Экспериментальные исследования электронной системы управления топливopодачей тепловозного дизеля // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 1. С. 38—48.

11. Расчетные исследования электронной системы управления топливopодачей дизеля / Л.В. Грехов, В.А. Марков, В.С. Акимов и др. // Грузовик. 2012. № 11. С. 21—27.

12. Bosch: Системы управления дизельными двигателями: Пер. с немецкого. М.: изд-во «За рулем», 2004. 480 с.

13. Gould L.A., Richeson W.E., Erickson F.L. Electronic Valve Timing // Automotive Engineering. 1991. Vol. 99. 4. P. 19—24.

14. Moncelle M.E., Fortune G.C. Caterpillar 3406 PEEC // SAE Technical Paper Series. 1985. №850173. P. 1—15.

15. Ueki S., Miura A. Effect of Difference of High Pressure Fuel Injection Systems on Exhaust Emissions from HDDI Diesel Engine // JSAE Review. 1999. Vol. 20. № 4. P. 555—557.

References

1. Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. *Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizelei* [Exhaust emissions of diesel engines]. Moscow, MSTU named after N. E. Bauman publ., 2002. 376 p.

2. Novikov L.A. *Tekhnologii snizheniia vrednykh vybrosov teplovozoov* [Technology to reduce emissions of diesel locomotives]. *Dvigatelistroenie* [Engine Building]. 1997, no. 1—2, pp. 49—51.

3. Grigorovich D.N. *Primenenie biotopliva na zheleznodorozhnom transporte* [Application of the biofuels on a railway transport]. *Transport na al'ternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport]. 2010, no. 1, pp. 59—65.

4. Simson A.E., Khomich A.Z., Kurits A.A. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia. Teplovoznnye dizeli i gazoturbinnnye ustanovki* [Internal combustion engines. Locomotive diesel engines and gas turbines]. Moscow, Transport publ., 1980. 384 p.

5. Kossov E.E., Shapran E.N., Furman V.V. *Sovershenstvovanie rezhimov raboty silovykh energeticheskikh sistem teplovozoov*

[Improving the operation modes of power energy systems of diesel locomotives]. Lugansk, Vostochnoukrainskii natsional'nyi universitet im. V. Dalia publ., 2006. 280 p.

6. Patrakhal'tsev N.N. *Neustanovivshiesia rezhimy raboty dvigatelei vnutrennego sgoraniia* [Transient operating conditions of internal combustion engines]. Moscow, Peoples' Friendship University of Russia publ., 2009. 380 p.

7. Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Sistemy toplivopodachi i upravleniia dizelei* [Fuel system and engine control]. Moscow, Legion—Avtodata publ., 2005. 344 p.

8. Lukov N.M. *Avtomaticheskie sistemy upravleniia i regulirovaniia teplovozoov* [Automatic control and regulation of locomotives]. Moscow, MIIT publ., 1983. 144 p.

9. Pinskiy F.I., Davtian R.I., Cherniak B.Ia. *Mikroprotsessornye sistemy upravleniia avtomobil'nymi dvigateliami vnutrennego sgoraniia* [Microprocessor control automotive internal combustion engines]. Moscow, Legion—Avtodata publ., 2001. 136 p.

10. Markov V.A., Furman V.V., Mironov V.A. *Eksperimental'nye issledovaniia elektronnoi sistemy upravleniia toplivopodachei teplovoznogo dizelia* [Experimental research of an electronic fuel supply control system of a locomotive diesel engine]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2012, no. 1, pp. 38—48.

11. Grekhov L.V., Markov V.A., Akimov V.S., Chzhao Ts., Furman V.V. *Raschetnye issledovaniia elektronnoi sistemy upravleniia toplivopodachei dizelia* [Calculation analysis of electronic system for controlling fuel supply in diesel engine]. *Gruzovik* [Truck]. 2012, no. 11, pp. 21—27.

12. Bosch: *Sistemy upravleniia dizel'nymi dvigateliami* [Bosch: Diesel Engine Management Systems]. Moscow, Za rulem publ., 2004. 480 p.

13. Gould L.A., Richeson W.E., Erickson F.L. Electronic Valve Timing. *Automotive Engineering*. 1991, vol. 99. 4, pp. 19—24.

14. Moncelle M.E., Fortune G.C. Caterpillar 3406 PEEC. *SAE Technical Paper Series*. 1985, no. 850173, pp. 1—15.

15. Ueki S., Miura A. Effect of Difference of High Pressure Fuel Injection Systems on Exhaust Emissions from HDDI Diesel Engine. *JSAE Review*. 1999, vol. 20, no. 4, pp. 555—557.

Статья поступила в редакцию 25.04.2013

Информация об авторах

МАРКОВ Владимир Анатольевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: markov@power.bmstu.ru).

ФУРМАН Виктор Владимирович (Саратов) — кандидат технических наук, ведущий конструктор проектно-производственного предприятия «Дизельавтоматика» (410017, Саратов, Чернышевского ул., 109, e-mail: 1205blp@mail.com).

АКИМОВ Виктор Сергеевич (Москва) — аспирант кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: dizavt@overta.ru).

Information about the authors

MARKOV Vladimir Anatolievich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Thermal Physics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: markov@power.bmstu.ru).

FURMAN Viktor Vladimirovich (Saratov) — Cand. Sc. (Eng.), Leading Designer of Design and Production Enterprise «Dizelavtomatika» (Chernyshevsky str., 109, 410017, Saratov, Russian Federation, e-mail: 1205blp@mail.com).

AKIMOV Viktor Sergeevich (Moscow) — Post-Graduate of «Thermal Physics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: dizavt@overta.ru).