

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.436:62-531.9

doi: 10.15507/2658-4123.033.202302.192-206

Оригинальная статья



Оперативный контроль мощностных показателей дизельных двигателей с топливной системой типа Common Rail

Ф. Р. Сафин¹, Р. М. Баширов¹, А. В. Неговора¹✉,
С. К. Корабельников², Н. В. Раков³

¹ Башкирский государственный аграрный университет
(г. Уфа, Российская Федерация)

² Академия транспортных технологий
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

³ Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет (г. Саранск,
Российская Федерация)

✉ negira@rambler.ru

Аннотация

Введение. Для условий эксплуатации автотракторной техники особый интерес представляют оперативные методы контроля мощностных показателей двигателей с целью непрерывного диагностирования их технического состояния. Методы характеризуются механическим КПД, определяемым в условиях ремонтных мастерских с использованием сложных тормозных устройств.

Цель статьи. Представить результаты исследования по разработке оперативного метода определения механического КПД дизельных двигателей с аккумуляторными электронно-управляемыми системами топливоподачи.

Материалы и методы. Башкирским ГАУ предложен и успешно апробирован оперативный метод оценки технического состояния дизельных двигателей с топливной аппаратурой непосредственного действия по механическому КПД, при котором он определяется по показателям работы их топливной аппаратуры, отрегулированной с использованием самого дизеля в качестве регулировочного стенда. В дальнейшем исследована возможность применения данного метода в дизельных двигателях с аккумуляторными топливными системами.

Результаты исследования. На точность определения механического КПД дизельных двигателей, электронно-управляемых топливными системами аккумуляторного типа, могут повлиять особенности их работы – корректирование цикловых подач электронным блоком управления двигателем в зависимости от технического состояния цилиндров и высокое давление впрыскивания топлива. Для проверки этой гипотезы проводились исследования на четырехцилиндровом двигателе D4EA 2,0 автомобиля HYUNDAI TUSCON с аккумуляторной топливной системой типа Common Rail.

© Сафин Ф. Р., Баширов Р. М., Неговора А. В., Корабельников С. К., Раков Н. В., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Система топливоподачи двигателя была дополнена электронным блоком, встроенным между форсункой и штатным блоком управления двигателем, который осуществлял разрыв линии передачи управляющего сигнала к форсунке по заданному алгоритму без перехода штатного блока в аварийный режим. Установлено, что предложенным методом можно успешно определять техническое состояние двигателя в целом, а также его отдельных цилиндров (чередую отключенные и работающие цилиндры).

Обсуждение и заключение. Предложенный оперативный метод определения механического КПД успешно может использоваться для дизельных двигателей с аккумуляторными электронно-управляемыми системами топливоподачи. При этом увеличение цикловой подачи электронным блоком управления системой топливоподачи двигателем снижает величину механического КПД незначительно, и оно может учитываться лишь в особых случаях.

Ключевые слова: диагностирование оперативное, двигатель дизельный, система топливоподающая, показатели мощностные, КПД механический

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают благодарность руководителю центра по ремонту топливной аппаратуры Bosch Diesel Service ООО «Башдизель» за предоставленные образцы электроуправляемых форсунок и оборудование для испытания, а также анонимным рецензентам за указанные замечания к статье, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования: Оперативный контроль мощностных показателей дизельных двигателей с топливной системой типа Common Rail / Ф. Р. Сафин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 192–206. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.192-206>

Original article

Operational Control of Power Indicators of Diesel Engines with Common Rail Fuel System

F. R. Safin^a, R. M. Bashirov^a, A. V. Negovora^a ,

S. K. Korabelnikov^b, N. V. Rakov^c

^a Bashkir State Agrarian University (Ufa, Russian Federation)

^b Academy of Transport Technologies

(Saint Petersburg, Russian Federation)

^c National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

 negira@rambler.ru

Abstract

Introduction. Operational methods to monitor the power indicators of engines for continuous diagnosis of their technical condition are of particular interest for creating optimal operating conditions of motor and tractor machinery. The methods are characterized by the mechanical efficiency, determined in the conditions of repair shops with the use of complex braking devices.

Aim of the Article. To present the results of research on the development of an operational method for determining the mechanical efficiency of diesel engines with battery-operated electronically controlled fuel supply systems.

Materials and Methods. The Bashkir State Agrarian University proposed and successfully tested an operational method for assessing the technical condition of diesel engines with direct-acting fuel equipment on their mechanical efficiency, which is determined by the performance of their fuel equipment adjusted using the diesel itself as an adjusting stand.

The possibility of using the proposed method for diesel engines with storage fuel systems was investigated.

Results. The accuracy of determining the mechanical efficiency of diesel engines by electronically controlled fuel systems of battery type can be affected by the features of their work – the correction of cyclic feeds by the electronic engine control unit depending on the technical condition of the cylinders and high fuel injection pressure. To test this hypothesis, there were carried out studies on a four-cylinder D4EA 2.0 engine of a Hyundai Tuscon car with a Common Rail type storage fuel system. The engine fuel supply system was supplemented with an electronic unit integrated between the injector and the standard engine control unit, which interrupted the transmission line of the control signal to the injector according to a given algorithm without the standard unit transition to emergency mode. It has been found that the proposed method can successfully determine the technical condition of the engine as a whole and of its individual cylinders (alternating disabled and working cylinders).

Discussion and Conclusion. The proposed operational method for determining the mechanical efficiency can be successfully used for diesel engines with accumulator electronically controlled fuel supply systems. At the same time, an increase in the cyclic supply by the electronic control unit of the engine fuel supply system reduces the mechanical efficiency slightly, and it can be taken into account only in special cases.

Keywords: operational diagnostics, diesel engine, fuel supply system, power indicators, mechanical efficiency

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: The authors wish to thank the head of the Bosch Diesel Service LLC Bashdiesel center for providing samples of electrically controlled injectors and equipment for testing. The authors express their gratitude to the anonymous reviewers.

For citation: Safin F.R., Bashirov R.M., Negovora A.V., Korabelnikov S.K., Rakov N.V. Operational Control of Power Indicators of Diesel Engines with Common Rail Fuel System. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):192–206. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.192-206>

Введение

К настоящему времени около половины себестоимости продукции растениеводства в АПК приходится на энергозатраты при ее производстве и дальнейшем транспортировании. В сельскохозяйственном производстве основным источником энергии стали дизельные двигатели (далее дизели), устанавливаемые на автомобили, тракторы, комбайны и многие стационарные агрегаты. По топливной экономичности, надежности, экологичности они существенно превосходят бензиновые двигатели [1–4]. Проблема снижения энергоемкости сельскохозяйственного производства может решаться дальнейшим повышением работоспособности и топливной экономичности дизелей.

Количество потребляемого дизелями топлива зависит от их технического

состояния, ухудшающегося по мере эксплуатации. Это состояние диагностируется и восстанавливается при техническом обслуживании и ремонте [5–7]. Техническое состояние дизелей диагностируют по результатам их испытаний в условиях мастерских с использованием сложных тормозных стендов. Обусловленная этим необходимостью выполнения большого объема демонтажных, транспортных и монтажных работ затрудняет своевременное восстановление их технического состояния.

В процессе эксплуатации не могут применяться сложные тормозные устройства. Их диагностируют с использованием трудно и субъективно определяемых косвенных параметров технического состояния – мощности и расхода топлива. Дизели, «показавшиеся» по этим параметрам изношенными, направляются

на ремонт, а уже в мастерских выявляется, что многие из них и не нуждаются в нем – восстанавливаются регулировкой их отдельных механизмов и систем, причем в большинстве случаев их топливной аппаратуры (ТА). Однако из-за отсутствия применимых в условиях эксплуатации простых регулировочных стенов ТА приходится снимать с дизеля и везти в мастерские, что существенно повышает сроки и стоимость ремонта, вследствие чего на практике данная операция проводится крайне редко.

Обзор литературы

На основе анализа работ И. И. Габитова, Л. В. Грехова, А. В. Гриценко, С. Н. Деянина, Н. С. Ждановского, С. Н. Кривцова, В. М. Михлина, С. Н. Ольшевского, Б. Н. Файнлейба и промышленных образцов заводов НЗТА, ЯЗТА, Robert Bosch, Denso, Delphi выявлен ряд эффективных методов определения технического состояния ТА и в целом дизелей.

Авторами установлено, что существующие методы, средства и технологии точной оперативной оценки технического состояния дизелей и их ТА не получили широкого использования. Это связано с тем, что детально не проанализирована зависимость технического состояния дизелей от особенностей функционирования их топливных систем.

Применимый в условиях эксплуатации успешным оказался предложенный Башкирским ГАУ метод оперативного диагностирования и регулирования ТА, заключающийся в использовании самого дизеля в качестве регулировочного стенда при его работе без нагрузки на номинальной частоте вращения с пропуском впрысков топлива в отдельные цилиндры для обеспечения номинальной цикловой подачи топлива в других цилиндрах [2]. Особенностью метода [8; 9] является возможность по результатам регулирования ТА определить механический КПД дизеля, представляющий собой отношение эффективной мощности к индикаторной,

который можно определить по одному из следующих выражений:

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_e}{N_e + N_m} = \frac{N_i - N_m}{N_i}, \quad (1)$$

где $N_{i(e,m)}$ – мощности индикаторная (i), эффективная (e) и механических потерь (m).

Механический КПД показывает, какая доля вырабатываемой дизелем индикаторной мощности используется для совершения полезной работы. У современных четырехтактных дизелей механический КПД доходит до 0,70–0,88 (0,70–0,80 в дизелях без наддува и 0,78–0,88 – с наддувом) [2]. Зависит он не только от внутренних механических потерь (N_m), но и от внутренних тепловых (N_i) потерь энергии дизеля. Отсюда следует, что для повышения точности определения механического КПД дизелей следует предварительно тщательно отрегулировать все его системы и механизмы, особенно топливную систему, работа которой наиболее явно влияет на индикаторную мощность. При этом выбор типа системы топливоподачи (непосредственного или аккумуляторного) по-своему влияет на выбор того или иного метода диагностирования [10–15].

Материалы и методы

Разработанный в Башкирском ГАУ метод оперативной оценки механического КПД двигателя внутреннего сгорания успешно прошел испытания на дизелях с ТА непосредственного действия [16; 17]. Особенностью метода является то, что механический КПД определяется как отношение количества впрысков пропущенных на холостом ходу и полных впрысков на номинальном режиме работы дизеля

$$\eta_m = \frac{\chi - \gamma}{\chi} = \frac{z}{\chi}, \quad (2)$$

где γ и z и χ – числа впрысков, реализованных ($\gamma = \chi - z$) и пропущенных на

холостом ходу и полных впрысков на номинальном режиме работы дизеля.

Из приведенного выражения получается, что механический КПД вычисляется по расходам топлива. Это оказывается возможным благодаря тому, что в предложенном методе реализована возможность работы двигателя без нагрузки с имитацией номинального режима работы, т. е. максимальной подачи топлива в часть цилиндров. Количество впрысков на номинальном режиме работы дизеля определяется расчетно, а на холостом ходу – экспериментально. Техническое состояние дизеля тем лучше, чем меньше количество впрысков на холостом ходу.

Для определения количества работающих цилиндров дизеля на холостом ходу предложено следующее выражение:

$$i_{ppx} = (1 - \eta_m) \cdot i, \quad (3)$$

где i – общее число цилиндров дизеля; i_{ppx} – число работающих цилиндров для обеспечения номинальной частоты вращения без нагрузки.

Для четырехтактных дизелей и встречающихся на практике значений механического КПД (0,70–0,88) по выражению (3) можно определить количество цилиндров, необходимое для обеспечения номинальной частоты вращения без нагрузки. Расчетные данные приведены в таблице 1.

Как видно, количество работающих цилиндров не является целым

числом – в данном случае целые числа соответствуют цилиндрам, работающим без пропуска впрысков, а доли – части впрысков цилиндра, работающего с пропуском впрысков. Получается, что независимо от количества цилиндров у двигателя с частичным пропуском впрысков работает только один, т. е. устройством пропуска впрысков устанавливается только на одну секцию ТА. Само устройство представляет из себя электронно управляемый перепускной клапан, встраиваемый в топливопровод высокого давления, выполненный на основе клапанного узла фирмы Denso [18].

Необходимая для регулирования ТА номинальная частота вращения обеспечивается пропуском впрысков в работающие цилиндры. Секции ТА неработающих цилиндров регулируются при работе их с впрыском топлива в камеру с противодавлением, аналогичным цилиндровому при впрыске топлива. После этого отрегулированные секции ТА устанавливаются на свои места, а секции работавших цилиндров снимаются для регулирования и операции повторяются. Определенный по выражению (2) механический КПД при первом этапе характеризует техническое состояние дизеля до регулировки ТА, а при втором – его состояние после регулировки. Разница между ними показывает влияние регулировки ТА на показатели работы дизеля.

Таблица 1

Table 1

Зависимость числа работающих цилиндров i_{ppx} четырехтактных дизелей от их общего количества i и механического КПД η_m
Dependence of the number of operating cylinders i_{ppx} of four-stroke diesel engines on their total number i and mechanical efficiency η_m

Механический КПД η_m / Mechanical efficiency η_m	Число цилиндров / Number of cylinders					
	общее i / general i	1	2	4	6	8
0,70	работающих без нагрузки i_{ppx} / working at idling i_{ppx}	0,30	0,60	1,20	1,80	2,40
0,88		0,12	0,24	0,48	0,72	0,96

Доказано, что точность определения механического КПД возрастает при регулировании ТА с впрыскиванием топлива в камеру с противодавлением (КПВ), меняющимся аналогично таковому в цилиндре дизеля [19–21].

Результаты исследования

В дизелях с аккумуляторной электронно управляемой ТА функцию устройства пропуска впрысков можно возложить на электронный блок управления (ЭБУ) ТА дизеля. При этом на точность определения механического КПД двигателя могут повлиять следующие особенности ЭБУ:

– параметры топливоподачи, в частности цикловые подачи топлива, корректируются по техническому состоянию цилиндров, определяемому по сигналам датчика мгновенной частоты вращения коленчатого вала [22; 23];

– давление впрыскивания топлива существенно выше, чем у ТА непосредственного действия, и влияние противодействия будет незначительно, как следствие, специальная КПВ может не применяться.

Для проверки этих гипотез были проведены исследования на четырехцилиндровом дизеле D4EA 2,0 автомобиля Hyundai Tuscon с аккумуляторной ТА типа Common Rail (фирмы Bosch). Номинальная мощность дизеля 110,3 кВт (при частоте вращения 3800 мин⁻¹), степень сжатия – 17,7, диаметр цилиндра и ход поршня – 83 мм и 92 мм соответственно.

Система топливоподачи опытного дизеля была дополнена электронным блоком 11 (рис. 1), встроенным между форсункой и штатным ЭБУ 12. Основным элементом его является контроллер STM32F407G-DISC1, пропускающий впрыски, разрывом линии передачи сигналов ЭБУ к форсунке.

Алгоритм программы управления дополнительного электронного блока пропуска впрысков приведен на рисунке 2 [24].

Максимально возможная корректировочная доза цикловой подачи топлива, принятой для исследований ТА фирмы Bosch, равна 4 мм³/цикл. Для определения откорректированных значений цикловой подачи использовался диагностический сканер 20 (рис. 1) марки Bosch KTS 540. В ходе экспериментов выявилось, что данный сканер может определять параметры топливоподачи только до частоты вращения 1450 мин⁻¹ коленчатого вала (табл. 2); при большей частоте он не успевает считывать и обновлять информацию. С учетом этого дальнейшие исследования проводились без диагностического сканера.

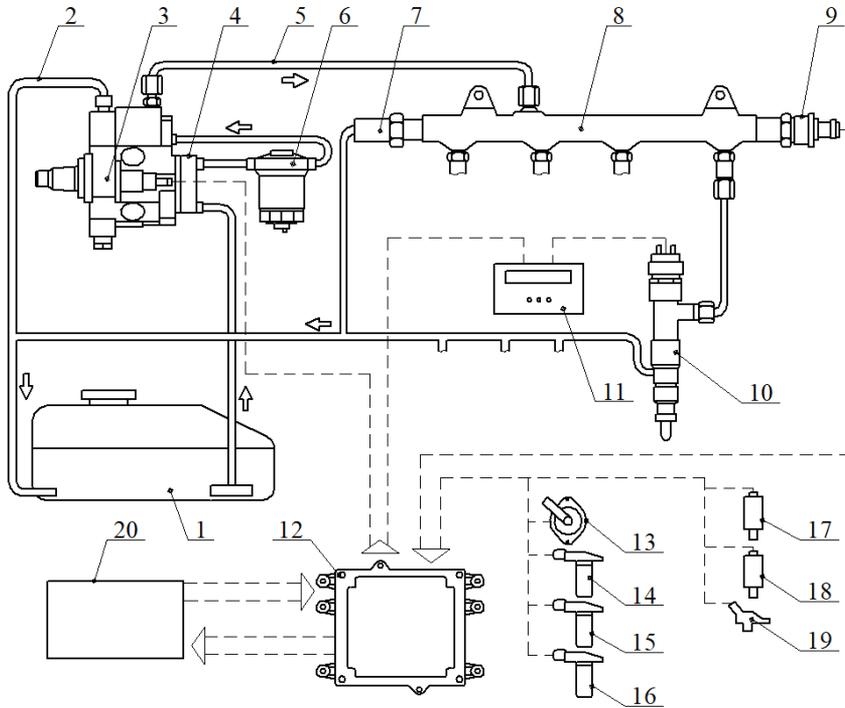
Количество пропускаемых впрысков на холостом ходу определялось при номинальной частоте вращения и полной подаче топлива. Дизель запускался и прогревался при работе на всех цилиндрах (рис. 3). После прогрева три цилиндра отключались (отключением управляющего кабеля форсунок), а номинальная частота вращения устанавливалась пропуском впрысков топлива (через блок 1).

На рисунке 4 условными осциллограммами изображен процесс работы секции ТА с пропуском четырех впрысков из пяти.

Номинальная частота вращения на холостом ходу достигалась при работе на одном цилиндре с 475 пропусками впрысков в него и полным отключением трех цилиндров. Механический КПД при этом составил

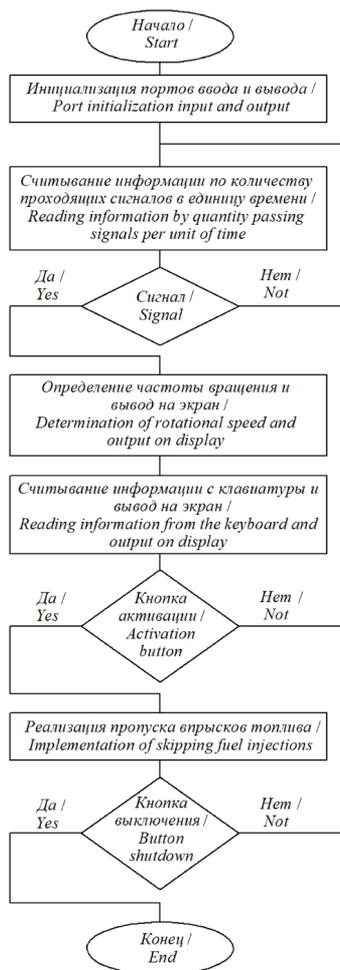
$$\eta_{м} = (1\,900 \cdot 3 + 475) / 7\,600 = 0,813.$$

Влияние корректировки цикловой подачи на механический КПД определялось расчетным путем по часовому расходу топлива при работе дизеля на холостом ходу с номинальными частотой вращения и цикловой подачей топлива. Часовой расход топлива составил $G_{чхх} = 4,4$ кг/ч.



Р и с. 1. Опытная система топливоподдачи типа Common Rail: 1 и 6 – топливный бак и фильтр; 2 и 5 – линии низкого и высокого давления; 3 – топливный насос высокого давления; 4 – насос подкачки; 7 – ограничитель давления; 8 – топливная рамба; 9 и 19 – датчики давления топлива и наддува воздуха; 10 – электронно управляемая форсунка; 11 – электронный блок пропуска впрысков топлива; 12 – ЭБУ; 13, 14 и 15 – датчики положения педали подачи топлива и коленчатого и распределительного валов дизеля; 16, 17 и 18 – датчики скорости и температуры топлива и охлаждающей жидкости; 20 – диагностический сканер

Fig. 1. Experimental Common Rail type fuel supply system: 1 and 6 – fuel tank and filter; 2 and 5 – lines of low and high pressure; 3 – high pressure fuel pump; 4 – boost pump; 7 – pressure limiter; 8 – fuel rail; 9 and 19 – fuel pressure and boost air pressure sensors; 10 – electronically controlled nozzle; 11 – electronic block for skipping fuel injections; 12 – ECU; 13, 14 and 15 – sensors for the position of the fuel supply pedal and the crankshaft and camshaft of the diesel engine; 16, 17 and 18 – speed and temperature sensors for fuel and coolant; 20 – diagnostic scanner



Р и с. 2. Алгоритм программы управления блока пропуска впрысков
 Fig. 2. Algorithm of the control program of the injection skip

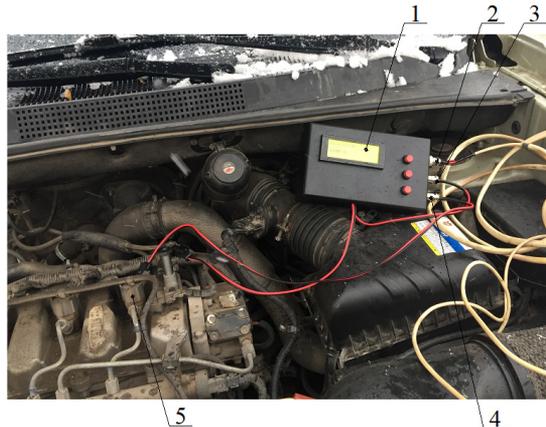
Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Корректировочные значения цикловых подач при различной частоте вращения коленчатого вала

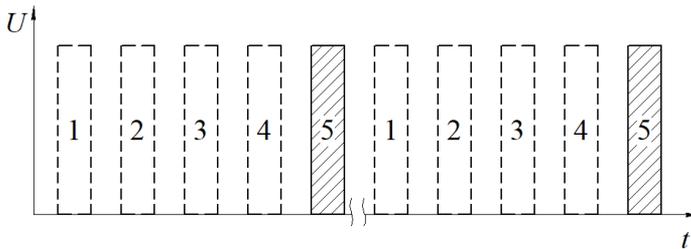
Correction values of cyclic supply at different crankshaft speeds

Номер цилиндра / Cylinder number	Корректирующий объем топлива, мм ³ /цикл при частоте вращения / Corrective fuel volume, mm ³ /cycle at rotational speed		
	720 мин ⁻¹ (холостой ход) / 720 min ⁻¹ (idling)	1000 мин ⁻¹ / 1000 min ⁻¹	1450 мин ⁻¹ / 1450 min ⁻¹
1	0,07	-0,21	-0,26
2	-0,60	-0,52	-0,59
3	0,26	0,52	0,55
4	0,29	-0,23	-0,20



Р и с. 3. Вид дизеля с установленным в него электронным блоком для диагностики его технического состояния и топливной системы: 1 – электронный блок; 2, 3 и 4 – разъемы питания, входного и выходного сигналов; 5 – электроуправляемая форсунка, работающая с пропуском впрысков топлива

F i g. 3. Type of diesel engine with an electronic unit installed in it for diagnosing its technical condition and fuel system: 1 – electronic unit; 2, 3 and 4 – connectors for power supply, input and output signals; 5 – electrically controlled nozzle, working with skipping fuel injections



Р и с. 4. Условные осциллограммы сигналов, направляемых ЭБУ к форсунке и не пропущенных встроенным электронным блоком (не заштрихованные столбики) и пропущенных (сплошные заштрихованные): 1–5 – порядковые номера впрысков

F i g. 4. Conditional oscillograms of signals sent by the ECU to the injector and not passed by the built-in electronic unit (unshaded bars) and missed (solid shaded): 1–5 – sequence numbers of injections

Этому расходу соответствует откорректированная цикловая подача

$$g_{ц.н} = \frac{G_{чхх}}{60 \cdot \gamma \cdot \rho} \cdot 10^9 = \frac{4,4}{60 \cdot (1900 - 475) \cdot 830} \cdot 10^9 = 62,0 \text{ мм}^3/\text{цикл}, \quad (7)$$

где ρ – плотность топлива, кг/м³.

Поскольку некорректированная величина цикловой подачи была меньше на 4 мм³/цикл, т. е. составляла 58 мм³/цикл, то количество реализованных впрысков при работе без корректировки оказалось бы

$$\gamma = \frac{G_{чхх}}{60 \cdot g_{ц.н} \cdot \rho} \cdot 10^9 = \frac{4,4}{60 \cdot 58 \cdot 830} \cdot 10^9 = 1523.$$

При этом количество пропущенных впрысков было бы $z = \chi - \gamma =$

= 7 600 – 1 523=6 077, а механический КПД составил бы $\eta_m = 6\,077/7\,600 = 0,800$.

Получается, что при определении механического КПД без учета коррективировки цикловой подачи погрешность составила

$$\Delta = \frac{0,813 - 0,800}{0,813} \cdot 100 = 1,6 \%$$

Это указывает на то, что механический КПД, в принципе, может

определяться и без учета коррекции, вносимой ЭБУ.

Эксплуатационные показатели работы ТА и дизелей, определенные по итогам регулирования ТА предложенным методом, приведены в таблице 3.

Экспериментально было установлено, что предложенным методом можно определять также техническое состояние отдельных цилиндров, чередуя отключенные и работающие цилиндры.

Таблица 3

Table 3

Эксплуатационные параметры работы электронно управляемой аккумуляторной ТА и дизелей

Operating parameters of electronically controlled storage fuel equipment and diesel engines

№	Наименование параметра / Parameter name	Обозначение / Designation	Единица измерения / Unit of measurement	Выражение (метод) для определения / Expression (method) to define	Результаты испытаний / Test results
Итоги регулирования ТА / Results of regulation of fuel equipment					
Количество впрысков / Number of shots:					
1	на номинальном режиме / in nominal mode	χ		$n \cdot i \cdot \tau$ (расчетный или экспериментальный) / $n \cdot i \cdot \tau$ (calculated or experimental)	7 600
	на холостом ходу / at idle	γ		(экспериментальный) / (experimental)	1 425
	пропущенных на холостом ходу / missed at idle	z		$\chi - \gamma$	6 175
Эксплуатационные параметры работы дизелей / Operating parameters of diesel engines					
2	Часовая производительность ТА (подача топлива) / Hourly productivity of fuel equipment (fuel supply)	G_u	кг/ч	$60 \cdot g_u^* \cdot \chi \cdot \rho^*$	23,47
3	Мощность, соответствующая часовой подаче топлива / Power corresponding to the hourly fuel supply	N_T	кВт	$708,6 \cdot g_u \cdot \chi \cdot \rho$	277,1
4	Механический КПД / Mechanical efficiency	η_m		z/χ	0,813

Примечание: * $g_u - \text{м}^3$; $\rho - \text{кг/м}^3$.
Note: * $g_u - \text{m}^3$; $\rho - \text{kg/m}^3$.

Обсуждение и заключение

Предложенный оперативный метод определения механического КПД для дизелей с топливной аппаратурой непосредственного действия успешно может применяться и для диагностики дизелей с аккумуляторными электронно управляемыми системами топливоподачи с тем отличием, что в данном случае не требуется использования

камер с противодавлением, а функция устройства пропуска впрысков возлагается на разработанный блок, пропускающий впрыски разрывом сигнальной линии от ЭБУ к форсунке. Практикуемая при этих системах корректировка (увеличение) цикловой подачи по мере износа дизеля незначительно снижает механический КПД и может не учитываться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габитов И. И., Неговора А. В. Совершенствование средств технического сервиса автотракторной и мобильной сельскохозяйственной техники // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 117. С. 62–66. EDN: [TFDLLP](#)
2. Сафин Ф. Р. Совершенствование технической эксплуатации тракторных дизелей. Уфа : Башкирская энциклопедия, 2021. 184 с. EDN: [WDLBWB](#)
3. Арженовский А. Г., Чичилов И. И. Совершенствование методики и средств диагностирования дизельных двигателей. Зерноград : Азово-Черноморский инженерный ин-т ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2017. 175 с. URI: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009610300> (дата обращения: 14.02.2023).
4. Власов В. М., Жанказиев С. В., Круглов С. М. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей. М. : Изд. центр «Академия», 2013. 432 с. URI: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008889845> (дата обращения: 14.02.2023).
5. Justification for Widening the Control Parameters Limits of Diesel Fuel Injectors during Repair / I. Gabitov [et al.] // International Review of Automatic Control. 2022. Vol. 15, issue. 2. P. 70–89. <https://doi.org/10.15866/ireaco.v15i2.21630>
6. Method and Technology for Continuous Control of Performance and Operating Quality of Automotive and Combine Machinery / I. Gabitov [et al.] // International Review of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 14, issue 3. P. 160–168. <https://doi.org/10.15866/ireme.v14i3.18731>
7. Diesel Fuel Filtration Problems with Modern Common Rail Injection Systems / M. Jovanović [et al.] // Military Technical Courier. 2017. Vol. 65, issue 4. P. 968–993. <https://doi.org/10.5937/vojtehg65-11577>
8. Способ диагностирования и регулирования дизельной топливной аппаратуры на двигателе : патент 2668589 Российская Федерация / Баширов Р. М. [и др.]. № 2018103579 ; заявл. 30.01.2018 ; опубл. 02.10.2018. Бюл. № 28. 9 с. EDN: [WSXLVG](#)
9. Баширов Р. М., Сафин Ф. Р. Сравнительный анализ методик определения механического КПД автотракторных дизелей // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (50). С. 95–103. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2019-50-2-95-103>
10. Ложкин М. Н. Расчет тепловых, газодинамических и механических параметров автотракторных двигателей : учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. 31 с. URI: <https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/351/1/Ложкин%201-22-11.pdf> (дата обращения: 14.02.2023).
11. Injection Rate Shaping with Possibilities of Conventional Design Common Rail System / L. Grekhov [et al.] // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10, issue 5. P. 3979–3986. URL: <https://www.researchgate.net/publication/304306489> (дата обращения: 14.02.2023).
12. Graham M., Crossley S., Harcombe T. Beyond Euro VI – Development of a Next Generation Fuel Injector for Commercial Vehicles // SAE Technical Papers. 2014. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1435>
13. Hardware and Software Complex and a Device for Setting Optimal Parameters of the Unit Injector Operation in Diesel Engines / I. Gabitov [et al.] // Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems. 2020. Vol. 13, issue. 2. P. 111–124. <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2020.109784>
14. Zhao J., Yue P., Grekhov L. Temperature and Frequency Dependence of Electrical Iron Effects on Electromagnetic Characteristics of High-Speed Solenoid Valve for Common Rail Injector // International

Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2019. Vol. 60, no. 2. P. 173–185. <https://doi.org/10.3233/JAE-180022>

15. Belchev S. Method for Determining the Parameters of Injection of Common Rail Injectors // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 614. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/614/1/012003>

16. Диагностирование и регулирование топливной аппаратуры дизелей в полевых условиях методикой Башкирского ГАУ / С. З. Инсафудинов [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 4. С. 165–171. EDN: QMUXKZ

17. Баширов Р. М., Сафин Ф. Р. Особенности определения механического КПД тракторных и комбайновых дизелей по методике Башкирского ГАУ // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 3 (77). С. 172–176. EDN: VUQEYO

18. Denso. Electronical Technical Service Information [Электронный ресурс]. URL: <http://www.denso-am.eu> (дата обращения: 14.02.2023).

19. Diagnostics and Regulation of Fuel Equipment of Diesels on Stands with Injection to Medium with Counter-Pressure / I. Gabitov [et al.] // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13, issue S11. P. 8782–8788. <https://doi.org/10.3923/jeasci.2018.8782.8788>

20. Баширов Р. М., Сафин Ф. Р., Инсафудинов С. З. Совершенствование методики регулирования топливной аппаратуры тракторных дизелей // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2014. № 3 (31). С. 60–64. EDN: SXXWJT

21. Инсафудинов С. З., Сафин Ф. Р. О влиянии противодавления при регулировке форсунок автотракторных дизелей // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Агрокомплекс-2014»: «Перспективы инновационного развития АПК» ч. II. Уфа : Башкирский ГАУ, 2014. С. 63–68. EDN: SFJWXR

22. Neue Messtechnik für Direkteinspritzsysteme von Diesel und Ottomotoren / R. Henzinger [et al.] // MTZ – Motortechnische Zeitschrift. 2006. Vol. 67. P. 524–529. <https://doi.org/10.1007/BF03225407>

23. Grekhov L., Mahkamov K., Kuleshov A. Optimization of Mixture Formation and Combustion in Two-Stroke OP Engine Using Innovative Diesel Spray Combustion Model and Fuel System Simulation Software // Technical Paper. 2015. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1859>

24. Оценка механического КПД дизельных двигателей с электронным управлением: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021619336 Российская Федерация / Сафин Ф. Р. [и др.]. № 2021618449 ; заявл. 31.05.2021 ; опублик. 08.06.2021. EDN: CEZWBU

Поступила 16.02.2023; одобрена после рецензирования 17.03.2023; принята к публикации 27.03.2023

Об авторах:

Сафин Филюс Раисович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и автоматизации технологических процессов Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-3278>, fils02@mail.ru

Баширов Радик Минниханович, член-корреспондент Академии наук Республики Башкортостан, доктор технических наук, профессор, Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), basharov@mail.ru

Неговора Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры мобильных энергетических и транспортных средств Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-7602>, negira@ Rambler.ru

Корабельников Сергей Кимович, доктор технических наук, доцент Академии транспортных технологий (192102, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Салова, д. 63), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-1357>, negira@ Rambler.ru

Раков Николай Виктрович, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, nikolaymgu@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Ф. Р. Сафин – анализ литературных данных; описание экспериментальных и расчетных исследований; обработка полученных результатов; апробация разработанной методики.

Р. М. Баширов – научное руководство; анализ и доработка текста.

А. В. Неговора – формирование структуры статьи; доработка начального текста; составление выводов и заключения.

С. К. Корабельников – поиск и анализ информации по теме исследования; доработка текста.

Н. В. Раков – поиск и анализ информации по теме исследования; доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Gabitov I.I., Negovora A.V. [Improving the Means of Technical Service of Autotractor and Mobile Agricultural Machinery]. *Proceedings of GOSNITI*. 2014;117:62–66. (In Russ.) EDN: [TFDLLP](#)
2. Safin F.R. [Improving the Technical Operation of Tractor Diesels: A Scientific Publication]. Ufa: Bashkir Encyclopedia; 2021. (In Russ.) EDN: [WDLBWB](#)
3. Arzhenovsky A.G., Chichilanov I. [Improvement of Methods and Means of Diagnosing Diesel Engines]. Zernograd: Azov-Black Sea Engineering Institute of the Donskoy GAU; 2017. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009610300> (accessed 14.02.2023). (In Russ.)
4. Vlasov V.M., Zhankaziev S.V., Kruglov S.M. [Maintenance and Repair of Cars]. Moscow: Publishing Center Academy; 2013. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008889845> (accessed 14.02.2023). (In Russ.)
5. Gabitov I., Negovora A., Ahmetov A., Kozeev A., Safin F., Razyapov M. Justification for Widening the Control Parameters Limits of Diesel Fuel Injectors during Repair. *International Review of Automatic Control*. 2022;15(2):70–89. <https://doi.org/10.15866/ireaco.v15i2.21630>
6. Gabitov I., Insafuddinov S., Badretdinov I., Pavlenko V., Safin F. Method and Technology for Continuous Control of Performance and Operating Quality of Automotive and Combine Machinery. *International Review of Mechanical Engineering*. 2020;14(3):160–168. <https://doi.org/10.15866/ireme.v14i3.18731>
7. Jocanović M., Karanović V., Knežević D., Orošnjak M. Diesel Fuel Filtration Problems with Modern Common Rail Injection Systems. *Military Technical Courier*. 2017;65(4):968–993. <https://doi.org/10.5937/vojtehg65-11577>
8. Bashirov R.M., Safin F.R., Magafurov R.Zh., Yulberdin R.R., Tuktarov M.F. [Method for Diagnosing and Regulating Diesel Fuel Equipment on the Engine]. Patent 2668589 Russian Federation. 2018 October 02. (In Russ.) EDN: [WSXLVG](#)
9. Bashirov R.M., Safin F.R. Comparative Analysis of Methods to Determine the Mechanical Efficiency of Car-And-Tractor Diesel Engines. *Vestnik BSAU*. 2019;(2):95–103. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2019-50-2-95-103>
10. Lozhkin M.N. [Calculation of Thermal, Gas-Dynamic and Mechanical Parameters of Automotive Engines]. Togliatti: Publishing House of TSU; 2012. Available at: <http://hdl.handle.net/123456789/351> (accessed 14.02.2023). (In Russ.)
11. Grekhov L., Dragan Yu., Denisov A., Starkov E. Injection Rate Shaping with Possibilities of Conventional Design Common Rail System. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015;10(5):3979–3986. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/304306489> (accessed 14.02.2023).

12. Graham M., Crossley S., Harcombe T. Beyond Euro VI – Development of a Next Generation Fuel Injector for Commercial Vehicles. *SAE Technical Papers*. 2014. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1435>
13. Gabitov I., Insafuddinov S., Yunusbaev N., Farhutdinov T., Sharafiev A., Abdrazakov F., et al. Hardware and Software Complex and a Device for Setting Optimal Parameters of the Unit Injector Operation in Diesel Engines. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. 2020;13(2):111–124. <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2020.109784>
14. Zhao J., Yue P., Grekhov L. Temperature and Frequency Dependence of Electrical Iron Effects on Electromagnetic Characteristics of High-Speed Solenoid Valve for Common Rail Injector. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2019;60(2):173–185. <https://doi.org/10.3233/JAE-180022>
15. Belchev S. Method for Determining the Parameters of Injection of Common Rail Injectors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;614. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/614/1/012003>
16. Insafuddinov S.Z., Safin F.R., Yulberdin R.R., Yakupova A.A. Diagnostics and Regulation of Fuel Equipment of Diesel Engines in Field Conditions by the Technique of the Bashkir State Agricultural University. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2019;(4):165–171. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: QMUXKZ
17. Bashirov R.M., Safin F.R. Features of Determining the Mechanical Efficiency of Tractor and Combine Diesel Engines According to the Method of the Bashkir State Agrarian University. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*. 2019;3(77):172–176. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: VUQEY
18. Denso. Electronical Technical Service Information. Available at: <http://www.denso-am.eu> (accessed 14.02.2023).
19. Gabitov I., Insafuddinov S., Kharisov D., et al. Diagnostics and Regulation of Fuel Equipment of Diesels on Stands with Injection to Medium with Counter-Pressure. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(S11):8782–8788. <https://doi.org/10.3923/jeasci.2018.8782.8788>
20. Bashirov R.M., Safin F.R., Insafuddinov S.Z. Improving the Method of Regulating the Fuel Equipment of Tractor Diesel Engines. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2014;3(31):60–64. (In Russ.) EDN: SXXWJT
21. Insafuddinov S.Z., Safin F.R. [On the Influence of Backpressure when Adjusting the Injectors of Autotractor Diesel Engines]. In: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Agrocoplex-2014: Prospects for the Innovative Development of the Agro-Industrial Complex. Part 2. Ufa: Bashkir State Agrarian University; 2014. p. 63–68. (In Russ.) EDN: SFJWXR
22. Henzinger R., Kammerstetter H., Radke F., Werner M. Neue Messtechnik für Direkteinspritzsysteme von Diesel und Ottomotoren. *MTZ – Motortechnische Zeitschrift*. 2006;67:524–529. (In Germ.) <https://doi.org/10.1007/BF03225407>
23. Grekhov L., Mahkamov K., Kuleshov A. Optimization of Mixture Formation and Combustion in Two-Stroke OP Engine Using Innovative Diesel Spray Combustion Model and Fuel System Simulation Software. *Technical Paper*. 2015. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1859>
24. Safin F.R., Valiev A.R., Negovora A.V., Insafuddinov S.Z., Gaysin E.M., Siraev Sh.F. [Evaluation of the Mechanical Efficiency of Diesel Engines with Electronic Control]. Certificate of State Registration of the Computer Program 2021619336 Russian Federation. No. 2021618449; app. 05/31/2021; publ. 06/08/2021. (In Russ.) EDN: CEZWBW

Submitted 16.02.2023; revised 17.03.2023; accepted 27.03.2023

About the authors:

Filyus R. Safin, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Chair of Power Supply and Automation of Technological Processes, Bashkir State Agrarian University (34 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-3278>, fils02@mail.ru

Radik M. Bashirov, Corresponding Member Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Bashkir State Agrarian University (34 50-Letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), basharov@mail.ru

Andrey V. Negovora, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Mobile Energy and Vehicles, Bashkir State Agrarian University (34 50-Letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-7602>, negira@rambler.ru

Sergey K. Korabelnikov, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Academy of Transport Technologies (63 Salova St., Saint Petersburg 192102, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-1357>, negira@rambler.ru

Nikolay V. Rakov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, nikolaymgu@yandex.ru

Authors contribution:

F. R. Safin – analysis of literature data; description of experimental and computational studies; processing the data; approbation of the developed methodology.

R. M. Bashirov – scientific guidance; analysis and revision of the text.

A. V. Negovora – forming the structure of the article; finalizing the initial text; drawing conclusions.

S. K. Korabelnikov – search and analysis of information on the topic of research; completion of the text.

N. V. Rakov – search and analysis of information on the topic of research; revision of the text.

All authors have read and approved the final manuscript.