

Научная статья
УДК 621.43.056
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-524-533>

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С СИСТЕМАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ВПРЫСКА ТОПЛИВА

Г.Н. Вотинов, Д.В. Мальцев, Д.С. Репецкий

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
г. Пермь, Россия

vgn@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4495-6859>

mdv@pstu.ru, orcid.org/0000-0001-5503-8784

repetsky@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9433-3209>

АННОТАЦИЯ

Введение. Обеспечение безотказной работы автомобильного транспорта является одной из приоритетных задач. Функционирование двигателя внутреннего сгорания, важнейшего агрегата, невозможно без корректной работы топливных форсунок. Современная электромагнитная форсунка является достаточно надежным элементом двигателя, однако может быстро выйти из строя при использовании некачественного топлива. Постоянный контроль технического состояния форсунок при помощи встроенных систем диагностики автомобиля позволит предотвратить такие негативные последствия, как перерасход топлива, образование вредных веществ в отработавших газах, ухудшение тягово-скоростных характеристик транспортного средства.

Материалы и методы. Исследования проводились методом физического моделирования, разработан лабораторный стенд, имитирующий работу топливной системы двигателя. В качестве объекта выбрана форсунка Bosch 0280 158 996, управление которой осуществлялось при помощи электронного блока на базе Arduino. Проведена серия однофакторных экспериментов, по результатам которых построена зависимость скорости падения давления от загрязненности сопла форсунки.

Результаты. Определен допустимый норматив скорости падения давления при работе электромагнитной форсунки, позволяющий однозначно определять её техническое состояние (исправна/неисправна). Предложен алгоритм проверки форсунок, а также способ его реализации на современных легковых автомобилях.

Обсуждение и заключение. Полученная зависимость качественно совпадает с результатами исследований других авторов. Существует успешный опыт внедрения подобных алгоритмов на современных автомобилях. Внедрение результатов исследования позволит своевременно выявлять неисправные (загрязненные) электромагнитные форсунки и предотвратить негативное воздействие как на детали двигателя, так и на экологию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электромагнитная форсунка, диагностика, легковой автомобиль, бензиновый двигатель внутреннего сгорания, загрязнение форсунок

Статья поступила в редакцию 30.08.2021; одобрена после рецензирования 15.11.2021; принята к публикации 29.10.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Вотинов, Г.Н., Мальцев Д.В., Репецкий Д.С. Контроль состояния электромагнитных топливных форсунок бензиновых двигателей с системами распределенного впрыска топлива // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 5(81). С. 524-533. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-524-533>

© Вотинов Г.Н., Мальцев Д.В., Репецкий Д.С., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-524-533>

MONITORING OF THE STATE OF ELECTROMAGNETIC FUEL INJECTORS OF GASOLINE ENGINES WITH DISTRIBUTED FUEL INJECTION SYSTEMS

Georgij N. Votinov, Dmitry V. Maltsev, Dmitry S. Repetsky
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
vgn@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4495-6859>
mdv@pstu.ru, orcid.org/0000-0001-5503-8784
repetsky@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9433-3209>

ABSTRACT

Introduction. Ensuring the trouble-free operation of road transport is one of the priority tasks. The functioning of the internal combustion engine, the most important unit, is impossible without the correct operation of the fuel injectors. A modern electromagnetic nozzle is a fairly reliable element of the engine, however, it can quickly fail when using low-quality fuel. Constant monitoring of the technical condition of the injectors with the help of built-in vehicle diagnostics systems will prevent such negative consequences as fuel overspending, the formation of harmful substances in the exhaust gases, deterioration of the traction and speed characteristics of the vehicle.

Materials and methods. The research was carried out by the method of physical modelling, a laboratory stand was developed that simulates the operation of the engine fuel system. As an object, the Bosch 0280 158 996 nozzle was selected, which was controlled using an Arduino-based electronic unit. A series of one-factor experiments was carried out, according to the results of which the dependence of the pressure drop rate on the contamination of the nozzle was constructed.

Results. The permissible standard of the pressure drop rate during the operation of the electromagnetic nozzle is determined, which allows unambiguously determining its technical condition (serviceable/not serviceable). An algorithm for checking injectors is proposed, as well as a method for its implementation on modern passenger cars.

Discussion and conclusion. The obtained dependence qualitatively coincides with the results of studies by other authors. There is a successful experience of implementing such algorithms on modern cars. The implementation of the research results will allow timely detection of faulty (contaminated) electromagnetic injectors and prevent negative effects on both engine parts and the environment.

KEYWORDS: electromagnetic nozzle, diagnostics, passenger car, gasoline internal combustion engine, nozzle contamination

The article was submitted 30.08.2021; approved after reviewing 15.10.2021; accepted for publication 29.10.2021.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods.

There is no conflict of interest.

For citation: Votinov G.N., Maltsev D.V., Repetsky D.S. Monitoring of the state of electromagnetic fuel injectors of gasoline engines with distributed fuel injection systems. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (5): 524-533. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-524-533>

© Votinov G.N., Maltsev D.V., Repetsky D.S., 2021



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильный транспорт играет важную роль при перевозке грузов и пассажиров. Транспортные средства с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) фактически не имеют конкуренции благодаря высоким тягово-скоростным характеристикам и достаточно большому запасу хода. Благодаря динамичному развитию электроники в последние десятилетия надежность транспортных средств неуклонно возрастает¹ [1, 2, 3, 4]. Однако естественный износ деталей, эксплуатационные загрязнения узлов и агрегатов пока еще широко распространены. Современный ДВС – это сложная мехатронная система, состоящая из механической и электронной частей. Его назначение – преобразование химической энергии топлива в механическую, поэтому одним из ключевых процессов работы ДВС является сгорание топлива. Корректность протекания этого процесса напрямую зависит от исправности электромагнитных топливных форсунок. Отказ или некорректная работа форсунок приводят к неустойчивой работе двигателя, иногда к дорогостоящему ремонту. Поэтому предупредительные меры по предотвраще-

нию отказов, такие как диагностика исправности форсунок, являются одной из актуальных задач, в том числе для повышения экономии топливно-энергетических ресурсов и уровня экологической безопасности.

По данным аналитического агентства АВТОСТАТ², количество транспортных средств в РФ за последние 10 лет увеличилось на 31%, в большей степени за счет роста числа легковых автомобилей и легкого коммерческого транспорта. По состоянию на 1 января 2021 г., парк транспортных средств составляет 60 млн ед., состав парка в процентном соотношении представлен на рисунке 1.

Все транспортные средства, за исключением прицепов и полуприцепов, оснащены ДВС. Структура парка и процентное соотношение силовых установок представлено в таблице.

Из таблицы видно, что на бензиновые силовые установки приходится почти 95% общей емкости парка. Двигатель состоит из большого количества деталей, узлов и вспомогательных систем. В рамках данного исследования представляет интерес система питания. Классификация системы питания бензиновых двигателей представлена на рисунке 2.

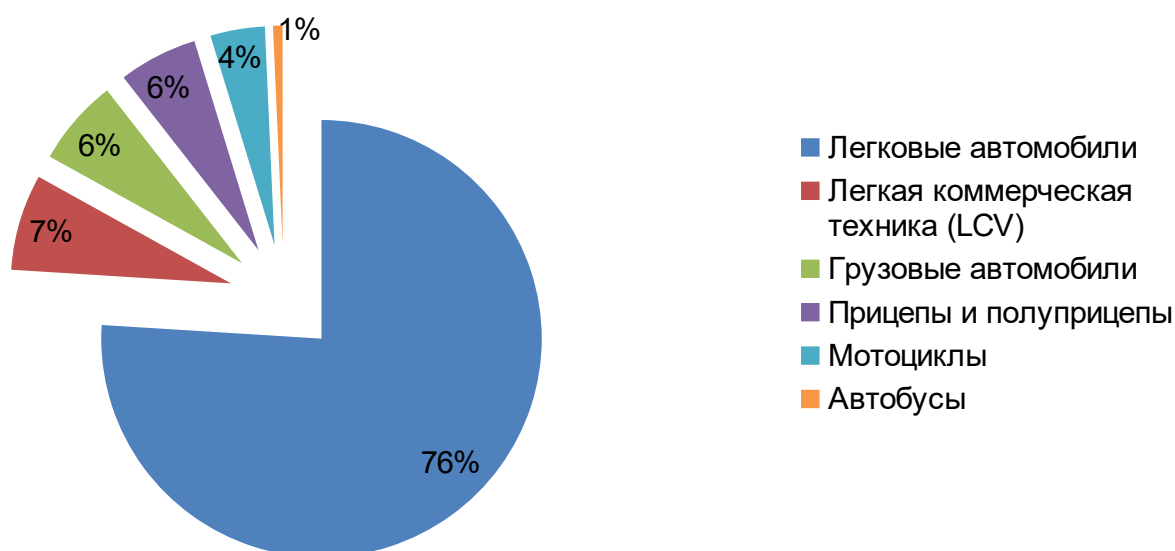


Рисунок 1 – Состав парка транспортных средств в России

Figure 1 – Vehicle fleet composition in Russia

¹ Филькин Н.М., Шаихов Р.Ф. Расчет показателей безотказности и долговечности унифицированной машины технологического электротранспорта // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции. Тюмень. 18 апреля 2019 года / Отв. ред. Н.С. Захаров. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет. 2019. С. 346–350

² Автомобильный парк: на чем ездят россияне? [Электронный ресурс] / Аналитическое агентство «Автостат»: официальный сайт. – Режим доступа: <https://www.autostat.ru/press-releases/47703/>

Таблица 1
Структура парка легковых автомобилей в РФ по типам силовой установки

Table 1
Structure of the car fleet in the Russian Federation by type of propulsion system

Тип силовой установки	Количество автомобилей, шт.	Процент от общего количества, %
Бензиновая	42 693 064	94,88
Дизельная	2 205 000	4,893
Гибридная	91 100	0,202
Электрическая	10 836	0,025
Общее	45 000 000	100

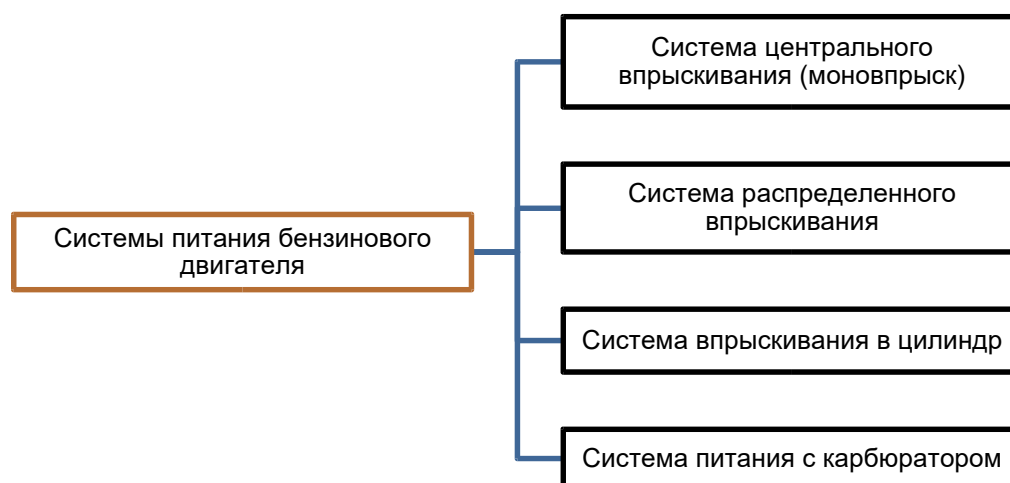


Рисунок 2 – Классификация систем питания бензинового двигателя

Figure 2 – Classification of gasoline engine feeding systems

Системы питания с карбюратором и центральным впрыском не применяются на легковых автомобилях и постепенно уходят с рынка ввиду своей малой эффективности, топливной экономичности и экологичности. Система с непосредственным впрыском, напротив, считается наиболее совершенной, однако данный вид впрыска является еще и самым сложным и дорогим в производстве и эксплуатации. Самой популярной и применяемой системой питания на территории РФ является распределенный впрыск топлива. По статистике, данный вид топливоподачи установлен на 62% всех бензиновых автомобилей. Популярность системы обусловлена ее невысокой стоимостью в производстве, эксплуатации и обслуживании. Кроме того, именно распределенный

впрыск топлива устанавливается на легковые автомобили экономкласса, самой популярной на российском автомобильном рынке ценовой категории до 1,2 млн руб.³

Таким образом, в настоящее время в России наиболее распространенным является легковой автомобиль с бензиновым ДВС с распределенным впрыском.

Первой и основной причиной неправильной работы электромагнитных форсунок являются разного рода отложения и повреждения, которые образуются вследствие использования некачественного топлива. Качество автомобильного бензина определяется ГОСТ 32513–2013. Согласно данному документу к топливу предъявляется ряд технических требований. К наиболее распространенным причинам по-

³ Какие ценовые сегменты самые популярные на российском авторынке [Электронный ресурс] / Аналитическое агентство «Автостат»: официальный сайт. – Режим доступа: <https://autostat.ru.turbopages.org/autostat.ru/s/infographics/42189/>

вреждения форсунок относятся: повышенное содержание смол, олефиновых и ароматических углеводородов, что является причиной образования отложений на соплах форсунок, а также наличие серы и сернистых соединений, что приводит к коррозии металлических деталей.

Некорректная работа электромагнитных топливных форсунок приводит к следующим последствиям: затруднению пуска ДВС, нестабильной работе ДВС на холостом ходу и в переходных режимах, пропуску воспламенений, детонации, потере мощности. В результате продолжительной работы ДВС с неисправными форсунками может произойти оплавление каталитического нейтрализатора, повреждение деталей цилиндропоршневой группы, увеличение расхода топлива, повышение токсичности отработавших газов.

Целью исследования является раннее выявление некорректной работы электромагнитных топливных форсунок за счет разработки мероприятий по организации самодиагностики их состояния электронным блоком управления ДВС.

В настоящий момент существует несколько общепризнанных методов диагностики и проверки работоспособности электромагнитных топливных форсунок. Они делятся на две основные группы по способу проведения: без демонтажа и с демонтажем. В рамках данного исследования интерес представляют способы, относящиеся к первой группе.

Наиболее перспективным методом, с точки зрения его реализации в системе самодиагностики ДВС, является контроль технического состояния форсунки по величине падения давления топлива во время впрыска [5, 6].

По результатам анализа современных исследований отечественных и зарубежных авторов в области функционирования электромагнитных форсунок установлено, что большинство работ посвящено дизельным двигателям с системой Common Rail [7, 8, 9, 10, 11, 12], дальнейшее увеличение давления впрыска требует поиска новых подходов к конструкции и управлению работой таких форсунок. Тренд на сокращение количества автомобилей с дизельными ДВС характерен не только для России, но и для большинства развитых стран мира, однако одним из перспективных направлений является использование дизеля на морских судах.

Среди исследований, посвященных бензиновым ДВС, большинство направлено на повышение экологичности их работы [13, 14].

Экологичность напрямую зависит от полноты сгорания топлива и точности его дозирования на различных режимах работы ДВС, поэтому важными аспектами является дисперсность распыла [15, 16], скорость испарения топлива [17, 18], образование топливовоздушной смеси [19, 20], форма факела [21]. Однако указанные работы не затрагивают вопросы безотказной работы форсунок, а также контроля их технического состояния.

В работе [22] представлена методика диагностирования форсунок, позволяющая определять фактический расход топлива каждой форсунки во время впрыска для более полного и чистого сгорания углеводородов, однако её практическое применение потребует использования дорогостоящего оборудования.

Таким образом, реализация метода самодиагностики электромагнитных форсунок по величине падения давления топлива во время впрыска является актуальной задачей, решение которой позволит предотвратить некорректную работу ДВС, снизить риск возникновения отказов, риск перерасхода топлива и образования вредных веществ в отработавших газах.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях на физической модели, которая представляет собой упрощенную топливную систему с распределенным впрыском, установленную на бензиновые двигатели внутреннего сгорания. Основные элементы физической модели (рисунок 3): топливный насос 4 (на рисунке место присоединения), рампа 2, форсунка 3, датчик давления 1.

Управление работой форсунки осуществлялось при помощи контроллера на базе Arduino. В качестве объекта выбрана форсунка Bosch 0280 158 996, т.к. она и её модификации являются достаточно распространенными, в том числе на отечественных автомобилях. При проведении эксперимента следующие факторы приняты как постоянные: давление в топливной рампе – 3,5 бар, длительность управляющего сигнала на открытие форсунки – 30 м/с при скважности сигнала 25%. Переменным фактором является загрязненность распылителя форсунки – площадь проходного сечения сопла. Диапазон изменения параметра составил от 0% (полностью чистый распылитель) до 100% (полностью загрязненный) с шагом 25%. Загрязненность имитировалась запайкой распылительных отверстий (рисунок 4).

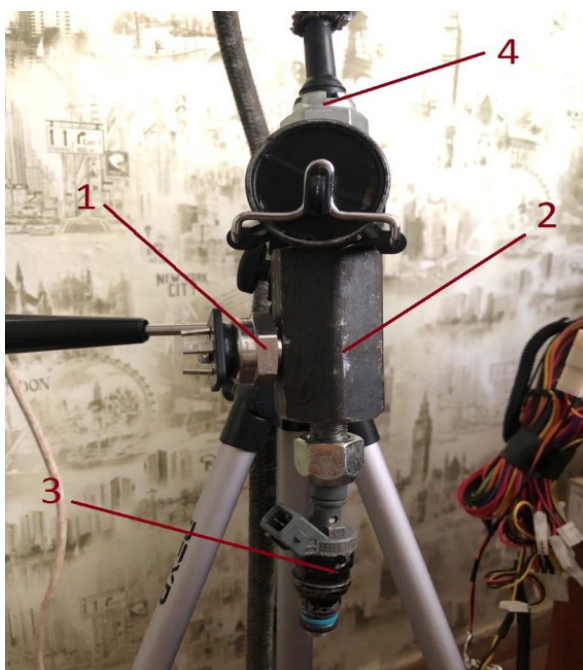


Рисунок 3 – Физическая модель топливной системы

Figure 3 – Physical model of the fuel system

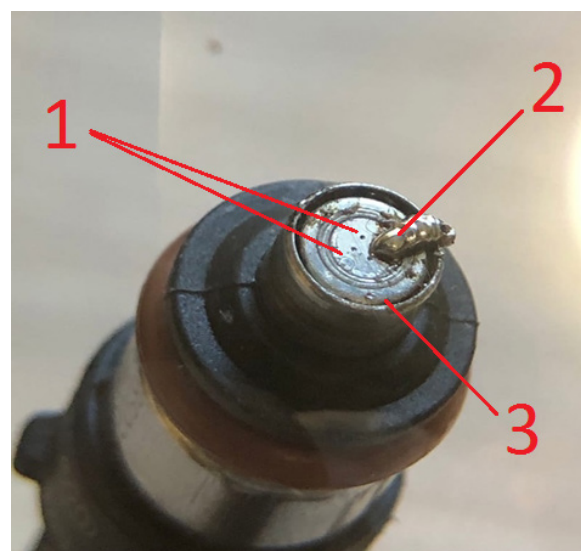


Рисунок 4 – Имитация загрязнения сопла распылителя
1 – сопла, 2 – капля припоя (имитация загрязнения),
3 – распылитель форсунки

Figure 4 – Simulating contamination of the atomiser nozzle
1 – nozzles, 2 – solder drop (simulated contamination),
3 – nozzle sprayer

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам эксперимента получено 25 графиков: 5 измерений для каждого уровня загрязненности от 0% до 100% с шагом 25%. При помощи датчика давления определено давление, соответствующее началу и завершению

впрыска топлива. Рассчитана разность давления в начале впрыска и давления в конце впрыска, т.е. перепад давления внутри форсунки, величина которого напрямую зависит от загрязненности сопла распылителя. Результаты представлены на рисунке 5.

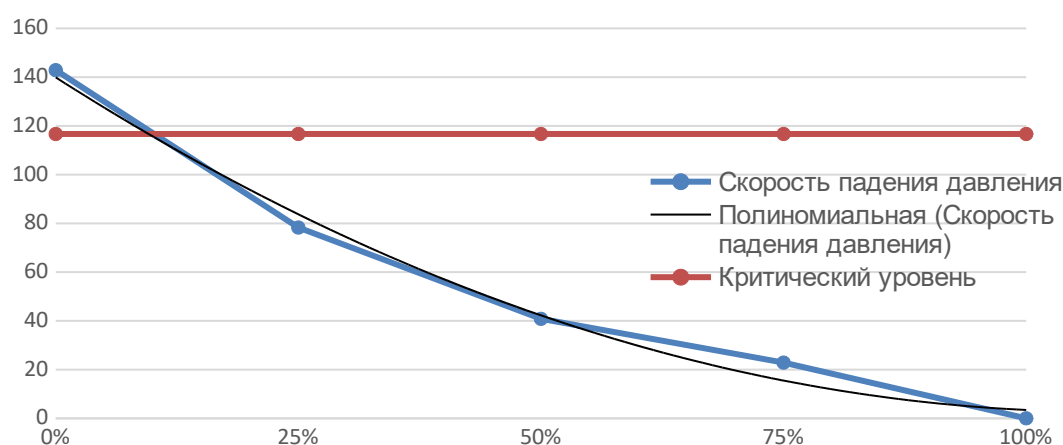


Рисунок 5 – Зависимость скорости падения давления топлива внутри форсунки от загрязненности сопла

Figure 5 – Dependence of fuel pressure drop rate inside the nozzle on the contamination of the nozzle

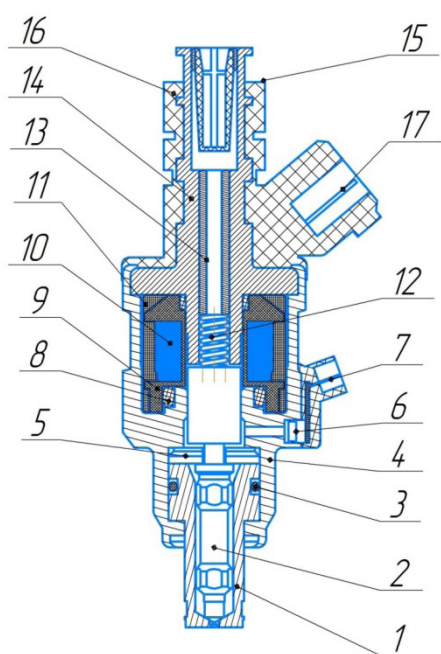


Рисунок 6 – Прототип топливной форсунки с встроенным датчиком давления:

- 1 – распылитель, 2 – запорная игла,
- 3 – уплотнение распылителя,
- 4 – нижняя часть корпуса, 5 – седло иглы,
- 6 – датчик давления в сборе с платой,
- 7 – разъем датчика давления,
- 8 – уплотнение электромагнита,
- 9 – катушка электромагнита,
- 10 – обмотка электромагнита,
- 11 – оболочка электромагнита,
- 12 – возвратная пружина,
- 13 – опорная трубка,
- 14 – верхняя часть корпуса,
- 15 – пластиковая часть корпуса,
- 16 – фильтрующий элемент, 17 – разъем

Figure 6 – Prototype fuel injector with integrated pressure sensor:

- 1 – atomizer, 2 – shut-off needle, 3 – atomizer seal,
- 4 – housing bottom, 5 – needle seat,
- 6 – pressure sensor assembly with board,
- 7 – pressure sensor connector, 8 – solenoid seal,
- 9 – solenoid coil, 10 – solenoid winding, 11 – solenoid shell,
- 12 – return spring, 13 – support tube, 14 – housing top,
- 15 – plastic housing part, 16 – filter element, 17 – connector

На представленном графике выделена линия критического уровня падения давления, характерная для показателя долгосрочной топливной коррекции в 10%. Данное значение является предельно нормальным для корректной работы двигателя⁴. Критический уровень может быть использован в качестве допусти-

мого норматива при эксплуатации электромагнитных форсунок.

Для проведения диагностики состояния форсунок необходимо постоянно проводить измерения скорости падения давления топлива, для этого целесообразно дооснастить топливную систему датчиками давления. Одним из перспективных вариантов может стать разработка конструкции форсунки с встроенным датчиком давления (рисунок 6).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки показаний датчиков давления необходим электронный блок управления, который будет анализировать входные данные и информировать водителя о необходимости проведения процедуры обслуживания или замены топливных форсунок. Варианты реализации могут быть различны: это может быть самостоятельное устройство, которое будет работать совместно с блоком управления двигателем. Однако более перспективным вариантом является интеграция алгоритма проверки форсунок в стандартную прошивку блока управления двигателем.

Алгоритм проверки форсунок может быть следующим: на холостом ходу ДВС блок управления через датчики давления определяет скорость падения давления топлива в форсунках за определенное количество циклов, рассчитывает среднее значение и сравнивает с допустимым нормативом (критический уровень). В случае, если форсунки работают некорректно – блок управления выдает ошибку и загорается лампа проверки двигателя Check Engine. Похожие алгоритмы успешно реализованы при управлении бензиновыми ДВС [23].

Полученная зависимость скорости падения давления топлива в форсунке во время впрыска в зависимости от её загрязненности качественно совпадает с зависимостями, полученными другими авторами при разработке методов диагностирования как бензиновых [5, 6, 24], так и дизельных ДВС [25].

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Основной причиной выхода из строя электромагнитных топливных форсунок является качество топлива, несоответствующее ГОСТу. При выходе из строя форсунок изменяются экономические, экологические, а также эксплуатационные показатели автомобиля.

⁴ Bosch. Системы управления бензиновыми двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. Москва : ООО «Книжное издательство «За рулем», 2005. – 432 с. ISBN:5-9698-0025-2

2. Определены основные факторы и пределы их значений, создана и описана физическая модель, представляющая собой уменьшенную версию топливной системы автомобиля. На основании экспериментальных данных получена зависимость падения давления от загрязненности распылителя форсунки.

3. Построен график зависимости скорости изменения давления топлива от загрязненности распылителя, на котором выделено критическое значение, характерное для показателя долгосрочной топливной коррекции в 10%. Предложен возможный вариант алгоритма работы электронного блока управления. Одним из таких вариантов является конструкторская разработка – форсунка со встроенным датчиком давления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мальцев Д.В., Пестриков С.А., Утробин В.Ю. Влияние условий эксплуатации на надежность грузовых автомобилей на базе шасси КамАЗ // Химия. Экология. Урбанистика. 2019. Т2. С. 129–133.
2. Шаихов Р.Ф. Анализ показателей надежности коробок отбора мощности грузовых автомобилей // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 4. С. 67–73.
3. Шаихов Р.Ф. Определение остаточного ресурса деталей навесного оборудования специальных автомобилей // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 3. С. 83–88.
4. Шаихов Р.Ф. Контроль производственного персонала на автотранспортном предприятии // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. №3. С. 89–95.
5. Васильев А.В., Березюков Д.С. Совершенствование диагностирования электромагнитных форсунок бензиновых двигателей на основе оценки их динамической производительности // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. 2012. № 6. С. 11–15.
6. Васильев А.В., Березюков Д.С. Совершенствование диагностики топливных форсунок поршневых двигателей с распределенным впрыском топлива // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. № 8(81). С. 20–23.
7. Jin, Y., Qiao, X., Gu, C., Guo, H., & Ning, C. A method for fault diagnosis of fuel injector of diesel engine based on res-CNN and fuel pressure wave. Qiche Gongcheng/Automotive Engineering. 2021. 43(6). pp. 943-951. doi:10.19562/j.chinasae.qcgc.2021.06.019
8. Wang, J. -, Wang, Z. -, Ma, X. -, & Yuan, Z. Decoupling and diagnosis of multi-fault of diesel engine fuel system. Kongzhi Yu Juece/Control and Decision. 2019. 34(10). pp. 2249-2255. doi:10.13195/j.kzyjc.2018.0264
9. Gong, W., Chen, H., Zhang, M., & Zhang, Z. Intelligent diagnosis method for incipient fault of motor bearing based on deep learning. Yi Qi Yi Biao Xue Bao/Chinese Journal of Scientific Instrument. 2020. 41(1). pp. 195-205. doi:10.19650/j.cnki.cjsi.J1905073
10. Stoeck, T. Analytical methodology for testing common rail fuel injectors in problematic cases. Diagnostyka. 2021. 22(2). pp. 47-52. doi:10.29354/DIAG/135999
11. Kluczyk, M., & Grządziela, A. Vibration diagnostics of common rail injectors. Journal of Marine Engineering and Technology. 2021. 16(4). pp. 177-184. doi:10.1080/20464177.2017.1387088
12. Stoeck, T., Osipowicz, T., & Abramek, K. F. Methodology for the repair of denso common rail solenoid injectors. [Metodyka naprawy wtryskiwaczy elektromagnetycznych układów zasilania Common Rail Denso] Eksploatacja i Niezawodnosc. 2014. 16(2). pp. 270-275
13. Sarwar, A., Sankavaram, C., & Lu, X. Diagnosis and prognosis of fuel injectors based on control adaptation. Paper presented at the Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, PHM. 2017. pp. 467-476.
14. Mohapatra, C. K., Schmidt, D. P., Sforzo, B. A., Matusik, K. E., Yue, Z., Powell, C. F., Martínez, M. Collaborative investigation of the internal flow and near-nozzle flow of an eight-hole gasoline injector (engine combustion network spray G). International Journal of Engine Research. 2020 doi:10.1177/1468087420918449
15. Medina, M., Fatouraie, M., & Wooldridge, M. High-speed imaging studies of gasoline fuel sprays at fuel injection pressures from 300 to 1500 bar. SAE Technical Papers. 2018-April doi:10.4271/2018-01-0294
16. Ishima, T., Sukena, R., Obokata, T., Kawachi, K., & Kobayashi, K. Study on diagnostic methods to evaluate the relationship between fuel injection pattern and spray characteristics at the swirl nozzle injector. Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. 2003. Part B, 69(678). pp. 504-511. doi:10.1299/kikaib.69.504
17. Dong, X., Yang, J., Hung, D. L. S., Li, X., & Xu, M. Effects of flash boiling injection on in-cylinder spray, mixing and combustion of a spark-ignition direct-injection engine. Proceedings of the Combustion Institute. 2019. 37(4). pp. 4921-4928. doi:10.1016/j.proci.2018.09.014
18. Hwang, J., Weiss, L., Karathanassis, I. K., Koukouvini, P., Pickett, L. M., & Skeen, S. A. Spatio-temporal identification of plume dynamics by 3D computed tomography using engine combustion network spray G injector and various fuels. Fuel. 2020. 280 doi:10.1016/j.fuel.2020.118359
19. Yang, J., Xu, M., Hung, D. L. S., Wu, Q., & Dong, X. Influence of swirl ratio on fuel distribution and cyclic variation under flash boiling conditions in a spark ignition direct injection gasoline engine. Energy Conversion and Management. 2017. 138. pp. 565-576. doi:10.1016/j.enconman.2017.02.024

20. Costa, M., Sorge, U., Merola, S., Irimescu, A., La Villetta, M., & Rocco, V. Split injection in a homogeneous stratified gasoline direct injection engine for high combustion efficiency and low pollutants emission. *Energy*. 2016. 117. pp. 405-415. doi:10.1016/j.energy.2016.03.065
21. Mohan, B., Du, J., Sim, J., & Roberts, W. L. Hydraulic characterization of high-pressure gasoline multi-hole injector. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2018. 64. pp. 133-141. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.017
22. Cavicchi, A., Sparacino, S., Berni, F., Postrioti, L., & Fontanesi, S. Evaluation of the single jet flow rate for a multi-hole GDI nozzle. Paper presented at the AIP Conference Proceedings. 2019. 2191 doi:10.1063/1.5138776
23. Gritsenko, A., Shepelev, V., Zadorozhnaya, E., & Shubenkova, K. Test diagnostics of engine systems in passenger cars. *FMETransactions*. 2020. 48(1). pp. 46-52. doi:10.5937/fmet2001046G
24. Овчинников Г.В., Козлов С.А. Влияние загрязнений электромагнитных форсунок на их показатели // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2007. № 4. С. 45–46.
25. Макушев Ю.П., Филатов А.В., Михайлова Л.Ю. Методика диагностики топливной аппаратуры дизеля по изменению давления на входе в форсунку и движения иглы // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*. 2012. Т.1. С. 347–354.
1. Mal'cev D.V., Pestrikov S.A., Utrobin V.YU. Vliyanie uslovij ekspluatacii na nadezhnost' gruzovyh avtomobilej na baze shassi KamAZ [The influence of operating conditions on the reliability of trucks based on the KAMAZ chassis]. *Chemistry. Ecology. Urban studies*, 2019, 2: 129-133 (In Russian)
2. SHaihov R.F. Analiz pokazatelej nadezhnosti korobok otbora moshchnosti gruzovyh avtomobilej [Analysis of reliability indicators of power take-off boxes of trucks]. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2019, 4: 67-73 (In Russian)
3. SHaihov R.F. Opredelenie ostatochnogo resursa detalej navesnogo oborudovaniya special'nyh avtomobilej [Determination of the residual life of the parts of the attachments of special vehicles]. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2019, 3: 83-88 (In Russian)
4. SHaihov R.F. Kontrol' proizvodstvennogo personala na avtotransportnom predpriyatii [Control of production personnel at a motor transport enterprise]. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2019, 3: 89-95 (In Russian)
5. Vasil'ev A. V., Berezyukov D. S. Sovershenstvovanie diagnostirovaniya elektromagnitnyh forsunok benzinovyh dvigatelej na osnove ocenki ih dinamicheskoy proizvoditel'nosti [Improving the diagnosis of electromagnetic injectors of gasoline engines based on the assessment of their dynamic performance]. *Bulletin of the Volgograd State University. Series 10: Innovative activity*, 2012, 6: 11-15 (In Russian)
6. Vasil'ev A. V., Berezyukov D. S. Sovershenstvovanie diagnostiki toplivnyh forsunok porshnevnyh dvigatelej s raspredelennym vpryskom topliva [Improvement of diagnostics of fuel injectors of piston engines with distributed fuel injection]. *Proceedings of the Volgograd State Technical University*, 2011, 8(81): 20-23 (In Russian)
7. Jin, Y., Qiao, X., Gu, C., Guo, H., & Ning, C. A method for fault diagnosis of fuel injector of diesel engine based on res-CNN and fuel pressure wave // *Qiche Gongcheng/Automotive Engineering*. 2021, 43(6): 943-951. doi:10.19562/j.chinasae.qcgc.2021.06.019
8. Wang, J. -, Wang, Z. -, Ma, X. -, & Yuan, Z. Decoupling and diagnosis of multi-fault of diesel engine fuel system // *Kongzhi Yu Juece/Control and Decision*. 2019, 34(10), pp. 2249-2255. doi:10.13195/j.kzyjc.2018.026
9. Gong, W., Chen, H., Zhang, M., & Zhang, Z. Intelligent diagnosis method for incipient fault of motor bearing based on deep learning // *Yi Qi Yi Biao Xue Bao/Chinese Journal of Scientific Instrument*. 2020, 41(1): 195-205. doi:10.19650/j.cnki.cjsi.J1905073
10. Stoeck, T. Analytical methodology for testing common rail fuel injectors in problematic cases // *Diagnostyka*. 2021, 22(2): 47-52. doi:10.29354/DIAG/135999
11. Kluczyk, M., & Grządziela, A. Vibration diagnostics of common rail injectors // *Journal of Marine Engineering and Technology*. 2021, 16(4): 177-184. doi:10.1080/20464177.2017.1387088 (In Eng.)
12. Stoeck, T., Osipowicz, T., & Abramek, K. F. Methodology for the repair of denso common rail solenoid injectors. [Metodyka naprawy wtryskiwaczy elektromagnetycznych układów zasilania Common Rail Denso] *Eksploracja i Niezawodność*. 2014, 16(2): 270-275
13. Sarwar, A., Sankavaram, C., & Lu, X. Diagnosis and prognosis of fuel injectors based on control adaptation // *Paper presented at the Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, PHM*. 2017: 467-476
14. Mohapatra, C. K., Schmidt, D. P., Sforzo, B. A., Matusik, K. E., Yue, Z., Powell, C. F., Martínez, M. Collaborative investigation of the internal flow and near-nozzle flow of an eight-hole gasoline injector (engine combustion network spray G) // *International Journal of Engine Research*. 2020 doi:10.1177/1468087420918449
15. Medina, M., Fatouraie, M., & Wooldridge, M. High-speed imaging studies of gasoline fuel sprays at fuel injection pressures from 300 to 1500 bar // *SAE Technical Papers*. 2018-April doi:10.4271/2018-01-0294
16. Ishima, T., Sukena, R., Obokata, T., Kawachi, K., & Kobayashi, K. Study on diagnostic methods to evaluate the relationship between fuel injection pattern and spray characteristics at the swirl nozzle injector // *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*. 2003, Part B, 69(678), pp. 504-511. doi:10.1299/kikaib.69.504
17. Dong, X., Yang, J., Hung, D. L. S., Li, X., & Xu, M. Effects of flash boiling injection on in-cylinder

spray, mixing and combustion of a spark-ignition direct-injection engine // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2019, 37(4), pp. 4921-4928. doi:10.1016/j.proci.2018.09.014

18. Hwang, J., Weiss, L., Karathanassis, I. K., Koukouvinis, P., Pickett, L. M., & Skeen, S. A. Spatio-temporal identification of plume dynamics by 3D computed tomography using engine combustion network spray G injector and various fuels // *Fuel*. 2020, 280 doi:10.1016/j.fuel.2020.118359

19. Yang, J., Xu, M., Hung, D. L. S., Wu, Q., & Dong, X. Influence of swirl ratio on fuel distribution and cyclic variation under flash boiling conditions in a spark ignition direct injection gasoline engine // *Energy Conversion and Management*. 2017, 138, pp. 565-576. doi:10.1016/j.enconman.2017.02.024

20. Costa, M., Sorge, U., Merola, S., Irimescu, A., La Villetta, M., & Rocco, V. Split injection in a homogeneous stratified gasoline direct injection engine for high combustion efficiency and low pollutants emission // *Energy*. 2016, 117, pp. 405-415. doi:10.1016/j.energy.2016.03.065

21. Mohan, B., Du, J., Sim, J., & Roberts, W. L. Hydraulic characterization of high-pressure gasoline multi-hole injector // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2018, 64, pp. 133-141. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.017

22. Cavicchi, A., Sparacino, S., Berni, F., Postriotti, L., & Fontanesi, S. Evaluation of the single jet flow rate for a multi-hole GDI nozzle // *Paper presented at the AIP Conference Proceedings*. 2019, 2191 doi:10.1063/1.5138776

23. Gritsenko, A., Shepelev, V., Zadorozhnaya, E., & Shubenkova, K. Test diagnostics of engine systems in passenger cars // *FME Transactions*. 2020, 48(1), pp. 46-52. doi:10.5937/fmet2001046G

24. Ovchinnikov G.V., Kozlov S.A. Vliyanie zagryaznenij elektromagnitnyh forsunok na ih pokazateli [The influence of contamination of electromagnetic injectors on their performance]. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2007, 4: 45-46 (In Russian)

25. Makushev, YU. P., Filatov A. V., Mihajlova L. YU. Metodika diagnostiki toplivnoj apparatury dizelya po izmeneniyu davleniya na vhode v forsunku i dvizheniya igly [The method of diagnostics of diesel fuel equipment by changing the pressure at the inlet to the nozzle and the movement of the needle]. *Modernization and scientific research in the transport complex*. 2012, 1: 347-354 (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Вотинов Г.Н. Разработка физической модели топливной системы автомобиля, проведение экспериментальных исследований и статистическая обработка данных.

Мальцев Д.В. Постановка цели и задач исследования, разработка прототипа топливной форсунки с встроенным датчиком давления.

Репецкий Д.С. Анализ ранее выполненных работ по тематике исследования.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Georgij N. Votinov Development of a physical model of the fuel system of the car, conducting experimental studies and statistical data processing.

Dmitry V. Maltsev Setting the goals and objectives of the study, developing a prototype of a fuel injector with a built-in pressure sensor.

Dmitry S. Repetsky Analysis of previously performed works on the subject of the study.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вотинов Георгий Николаевич – канд. физ.-мат. наук, доц., SPIN-код: 3870-1069; AuthorID: 112901; доц. кафедры «Общая физика».

Мальцев Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доц., Scopus ID 57212413474, SPIN-код: 5484-9395; AuthorID: 659132; доц. кафедры «Автомобили и технологические машины».

Репецкий Дмитрий Станиславович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобили и технологические машины».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Georgij N. Votinov – Cand. of Sci., Associate Professor, SPIN-code: 3870-1069; AuthorID: 112901;; Associate Professor of the General Physics Department.

Dmitry V. Maltsev – Cand. of Sci., Associate Professor, Scopus ID 57212413474, SPIN-code: 5484-9395; AuthorID: 659132; Associate Professor of the Cars and Technological Machines Department.

Dmitry S. Repetsky – Cand. of Sci., Associate Professor of the Cars and Technological Machines Department.