




## Применение диагностики для исследования эксплуатационной надежности электронных систем управления двигателем автомобиля Skoda

П. В. Сенин, Д. А. Галин, Л. О. Круш 

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

 [leonidsgrants@yandex.ru](mailto:leonidsgrants@yandex.ru)

### Аннотация

*Введение.* В электронных системах управления двигателем происходят физические процессы, часть из которых приводит к износу элементов системы. Опыт эксплуатации и диагностирования автомобилей на станции технического обслуживания показал, что часть автомобилей эксплуатируются с неисправностями, многие из которых в дальнейшем приводят к отказам различных групп сложности. Цель исследования – применить диагностику для определения эксплуатационной надежности и оценки технического состояния электронных систем управления двигателем.

*Материалы и методы.* Для оценки эксплуатационной надежности современной электронной системы управления двигателем была выбрана партия автомобилей. Экспериментальные исследования были проведены на автомобилях Skoda Octavia с двигателями 1.8 TSI CDAB 152 л.с. Euro5 и CDAA 160 л.с. Euro5. Выборка составила 60 единиц техники. Автомобиль записывался на диагностику, предварительно проводилось техническое обслуживание и компьютерная диагностика. После короткого теста автомобиль снова заезжал на станцию технического обслуживания и подвергался глубокой диагностике электронной системы управления двигателем.

*Результаты исследования.* Получены результаты исследований надежности основных элементов электронной системы управления двигателем. Можно сделать вывод о том, что большая часть отказов конструктивных элементов электронной системы управления двигателем соответствует исполнительным механизмам системы, имеющим подвижные элементы. Датчики, измеряющие параметры системы, изнашиваются в меньшей степени. Проведен анализ зависимости показателей безотказности регулятора давления топливного насоса по интервалам наработки.

*Обсуждение и заключение.* Определено, что наименьший ресурсный пробег приходится на свечи зажигания. При этом наиболее частая неисправность возникает у регулятора давления топлива в топливной системе автомобилей с долей в 19,8 % от общего количества. Ресурс данного элемента электронной системы управления двигателем составляет в среднем 125 тыс. км. Доказано, что диагностирование с применением современного технологического оборудования является эффективным.

**Ключевые слова:** диагностика, давление топлива, форсунка, код неисправности, ЭСУД, электронный блок управления, дроссельная заслонка, топливный насос высокого давления, сканер, рабочие характеристики

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Сенин П. В., Галин Д. А., Круш Л. О., 2022



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

*Для цитирования:* Сенин П. В., Галин Д. А., Круш Л. О. Применение диагностики для исследования эксплуатационной надежности электронных систем управления двигателем автомобиля Skoda // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 235–248. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.235-248>

*Original article*

## Using Diagnostics to Research the Operational Reliability of Electronic Engine Control Systems of Skoda Car

**P. V. Senin, D. A. Galin, L. O. Krush** ✉

*National Research Mordovia State University  
(Saransk, Russian Federation)*

✉ [leonidsgrants@yandex.ru](mailto:leonidsgrants@yandex.ru)

### **Abstract**

*Introduction.* Some physical processes active in the electronic engine control systems lead to wear and tear of the system elements. Experience in operating and diagnosing vehicles at the service station has shown that there is the operation of vehicles with failures, many of which subsequently lead to malfunctions of different complexities. The purpose of the study is to apply diagnostics for determining the operational reliability and assessing the technical condition of electronic engine control systems.

*Materials and Methods.* A batch of cars was selected to assess the operational reliability of modern electronic engine control system. There were carried out experimental tests of Skoda Octavia cars with 1.8 TSI CDAB 152 hp Euro5 engine and CDAA 160 hp Euro5 engine. The sample consisted of 60 vehicles. Every vehicle was registered for diagnostics, pre-maintenance and computer diagnostics. After a short test, the vehicle was taken back to the service station and subjected to a detailed diagnosis of the electronic engine control system.

*Results.* The results of analyzing reliability of the main elements of the electronic engine control system have been obtained. It can be concluded that most of the failures of the structural elements of the electronic engine control system occur within the actuators of the system, which have moving elements, sensors measuring the parameters of the system wear out to a lesser extent. The analysis of dependence of failure rates of the fuel pump pressure regulator on operating time intervals has been carried out.

*Discussion and Conclusion.* It was determined that the spark plugs have the least mileage lifetime. At the same time, the failure within the fuel pressure regulator of the car fuel system occurs most frequently (19.8% of total). The resource of this element of the electronic engine control system averages 125,000 km. It is proved that diagnostics using modern technological equipment is effective.

**Keywords:** diagnostics, fuel pressure, injector, fault code, electronic engine control system, electronic control unit, throttle valve, high pressure fuel pump, scanner, performance

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

**For citation:** Senin P.V., Galin D.A., Krush L.O. Using Diagnostics to Research the Operational Reliability of Electronic Engine Control Systems of Skoda Car. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):235–248. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.235-248>

## Введение

Современные автомобили с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) в подавляющем большинстве оборудованы электронными блоками управления, входящими в электронную систему управления двигателем (ЭСУД). Они позволяют улучшить показатели двигателя и во многом снизить экологическую нагрузку на окружающую среду. Электроника оптимизирует состав топливовоздушной смеси на различных режимах работы мотора, точное дозирование топлива в цилиндры, стехиометрический состав заряда. На существующем этапе производства и эксплуатации автомобилей экологические показатели стали приоритетными, что во многом зависит от исправной системы управления двигателем [1].

В системе управления двигателем в процессе эксплуатации возникают различные повреждения (изнашивание, загрязнение, старение). Эти изменения сказываются на параметрах работы ДВС и в конечном счете приводят к потере работоспособности узла в целом [2].

Решение проблемы поддержания работоспособности ЭСУД предусматривает исследование причин возникновения отказов, их влияния на работу двигателя. Наличие такой информации является необходимым условием сохранения работоспособности ЭСУД в эксплуатации [3].

За последнее время качество, эффективность, мощностные, экономические и экологические показатели автомобилей улучшились, но при этом надежность и долговечность остались на прежнем уровне и зачастую значительно ухудшились. Это объясняется удешевлением сырья, использованием биоразлагаемых материалов с ограниченным сроком службы, повышением требований к экологичности, усложнением конструкции и применением

агрегатной замены деталей и узлов при ТО и ремонте [3–5].

Опыт эксплуатации и диагностирования автомобилей на станции технического обслуживания показал, что часть автомобилей эксплуатируются с неисправностями. Многие из них в дальнейшем приводят к отказам различных групп сложности [4–7].

В связи с этим целью исследования является анализ эксплуатационной надежности и оценка технического состояния электронных систем управления двигателем автомобилей с применением компьютерной диагностики.

## Обзор литературы

Существующие технологии диагностирования автомобилей с ЭСУД позволяют проводить различные действия для определения параметров функционирования систем и узлов автомобиля. В научных исследованиях ведется активное развитие технологий диагностирования параметров и показателей функционирования ЭСУД. Так, проведен подробный анализ изменения характеристик сгорания топлива в зависимости от изменения параметров впрыска [4]. Данное исследование можно связать с определением пропусков зажигания на автомобилях в зависимости от топливных показателей [5; 6].

Определение параметров работы двигателя возможно при диагностировании по показателям выбросов вредных веществ в выхлопной системе автомобиля. В научных работах показан опыт применения диагностирования по показателям выбросов NOx [8–10]. При этом для анализа выбросов возможно применять различное оборудование, которым определяется как показатель состава выхлопа автомобиля, так и показатели элементов системы ЭСУД. Эффективность определения доказывает актуальность применения данных методов для определения показателей работы ЭСУД автомобиля в целом [11–14].

При этом диагностирование ЭСУД по существующим и разрабатываемым технологиям, включая диагностирование по составу выхлопа, возможно также и на автомобилях с дизельными двигателями [15–17].

В современном мире цифровые технологии применяются и в технологическом оборудовании для диагностирования автомобилей. К примеру, было разработано технологическое оборудование, представленное расходомером с применением микропроцессорной платы. В данном исследовании показана эффективность применения цифровых технологий при диагностировании, так как разработанный расходомер топлива позволяет контролировать эффективность подачи топлива, своевременно обнаруживать скрытые неисправности автомобиля и оценивать качество условий эксплуатации [18].

В качестве применяемого оборудования для диагностирования ЭСУД и других систем автомобиля хорошо зарекомендовало себя технологическое оборудование на основе микропроцессорных плат на базе Arduino Uno с применением современного и редактируемого исходного кода платформы [11–13]. Ранее разработанное технологическое оборудование с применением платформы Arduino Uno показало эффективность применения для диагностирования автомобилей с ЭСУД в условиях технического сервиса [11–13].

Одной из причин, кроме влияния датчиков и устройств из состава ЭСУД, являются возникающие сбои в программном обеспечении электронного блока управления двигателем. В проведенных исследованиях доказано, что наиболее часто возникающая неисправность – это неравномерная работа двигателя в результате сбоя программного обеспечения [16].

Анализ существующих исследований в области диагностирования ЭСУД

показал, что имеющиеся технологии диагностирования, основанные на применении диагностических сканеров с протоколом OBDII, во многом неэффективны из-за постоянного совершенствования системы ЭСУД автомобилей. Поэтому исследование причин отказов современных систем управления двигателем с применением эффективных методик диагностирования и одновременного контроля технического состояния систем ЭСУД будет актуальным.

### **Материалы и методы**

Для точной оценки при диагностировании автомобилей должно быть правильно подобрано оборудование (сканеры, цифровые тестеры, мультиметры), чтобы с достаточной точностью определить причины неисправности и не вызвать нарушение в работе системы ЭСУД. Также диагностирование должно проводиться квалифицированными специалистами, имеющими практические навыки работы [6; 7].

Обычно диагностика проводится на специально оборудованных закрытых постах, участках. Наиболее современной является компьютерная диагностика электронных систем управления автомобиля, где выявляются неисправности электроники, подтвержденные кодами неисправности, записанными в память электронного блока управления (ЭБУ).

Источником информации, как правило, является ЭБУ. Подключаясь к ЭБУ с помощью специализированных устройств, сканеров, возможно выявить основные параметры работы систем автомобиля. Фактически ЭБУ выполняет роль внутреннего тестера неисправностей и событий, а сканер интерпретирует эти данные в графическое изображение на экране и представляет их в презентабельном виде [8; 10].

Современные автомобили состоят из большого количества ЭБУ. Программное обеспечение ЭБУ развивается,

увеличивается внутренний объем памяти, частоты работы процессоров, скорости шин передачи данных и их количество [10].

При диагностировании автомобиля особое внимание необходимо уделить точному описанию выдаваемых кодов неисправностей системами автомобиля. Информация с блоков управления поступает в виде цифрового кода и важно понимать, какая неисправность соответствует данному коду [18–21].

Для оценки надежности современной системы управления двигателем проведены экспериментальные исследования работоспособности ЭСУД автомобиля марки Skoda. Автомобиль записывался на диагностику, предварительно проводились техническое обслуживание (ТО) и компьютерная диагностика. После короткого теста автомобиль снова заезжал на станцию ТО и затем подвергался глубокой диагностике ЭСУД.

Для проведения исследования применялось следующее технологическое оборудование:

1. Диагностические цифровые сканеры для определения неисправностей путем считывания кодов с ЭБУ двигателем, а также для контроля технологических параметров, характеризующих функционирование элементов ЭСУД (ScanDoc, BOSCH KTS, VCDS).

2. Разработанное технологическое оборудование для диагностирования датчиков и топливных систем на основе Arduino Uno [11].

3. Оборудование для определения концентрации вредных выбросов, содержащихся в выхлопе автомобиля (газоанализаторы «Инфракар 5MT-01»).

4. Дополнительное технологическое оборудование и программное обеспечение.

Экспериментальные исследования были проведены на автомобилях Skoda Octavia с двигателем 1.8 TSI CDAB

152 л.с. Euro5 и CDAA 160 л.с. Euro5. Выборка составляла 60 единиц. Выбор данного автомобиля обусловлен доступностью на рынке и популярностью среди владельцев. Также в регионе недоступны дилерские центры данной марки, что также благоприятно сказывается на ее популярности. Предварительно перед проведением исследований замеряли компрессию и проверяли вытяжку цепи газораспределительного механизма.

### Результаты исследования

На основе диагностирования и оценки эксплуатационной надежности ЭСУД автомобилей марки Skoda получены результаты исследований надежности основных элементов ЭСУД. Работа выполнялась на станции технического сервиса машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» в г. Саранске в период 2019–2021 гг. Результаты исследования надежности системы ЭСУД представлены в таблице 1.

Основные жалобы на работоспособность автомобилей были связаны с повышенным расходом топлива, длительным запуском, снижением мощности. Многие автомобили не имели возможности самостоятельно перемещаться. Им требовалась услуга эвакуатора. Оценку состояния проводили при полностью заряженной аккумуляторной батарее, чтобы избежать погрешностей в измерениях. Дефектацию неисправных и отказавших узлов проводили как инструментальным методом контроля с помощью сканеров ScanDoc (Qantex), BOSCH KTS, VCDS, мотора-тестера Motodoc, так и органолептической оценкой по внешним признакам и проявлениям. Во многих случаях неисправности присутствовали на автомобилях без внешних признаков.

Анализируя результаты исследования, представленные в таблице 1, можно сделать вывод о том, что большая часть отказов конструктивных

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

**Показатели надежности элементов электронной системы управления двигателем автомобиля Skoda Octavia**

**Reliability indicators of the electronic engine control system elements of the Skoda Octavia car**

Датчик или исполнительный механизм / Sensor or actuator	Причина возникновения отказа или неисправности / Cause of failure or malfunction	Средняя наработка до отказа, тыс. км / Average operating time to failure, thous. km	Доля отказов, % / Failure ratio, %
1	2	3	4
1. Датчик кислорода (Лямбда зонд 1) / Oxygen sensor (Lambda probe 1)	Обрыв цепи нагревателя. Снижение эффективности работы чувствительного элемента / Heater circuit breakage. Reduced sensing element efficiency	165,2	4,2
2. Датчик кислорода (Лямбда зонд 2) / Oxygen sensor (Lambda probe 2)	Обрыв цепи нагревателя. Снижение эффективности работы чувствительного элемента, в том числе вследствие повреждения каталитического нейтрализатора / Heater circuit breakage. Reduced sensing element efficiency, including that resulting from the catalytic converter damages	148,1	6,1
3. Каталитический нейтрализатор / Catalytic converter	Разрушение, снижение эффективности / Destruction, reduced efficiency	175,5	6,2
4. Датчик массового расхода воздуха / Mass air flow sensor	Снижение эффективности / Reduced efficiency	148,3	5,3
5. Электромагнитный клапан регулирования фаз / Electromagnetic phase control valve	Износ, повреждение соленоида / Wear, damage of the solenoid	165,4	5,7
6. Электромагнитная топливная форсунка / Electromagnetic fuel injector	Засорение распылителя, межвитковые замыкания в цепи катушки / Atomizer clogging, turn-to-turn short circuits in the coil circuit	138,3	4,8
7. Регулятор давления топлива / Fuel pressure regulator	Износ, загрязнение, задиры на штоке / Wear, pollution, tearings up on the stock	141,6	19,8
8. Топливный насос / Fuel pump	Износ, обрыв цепи проводника / Wear, conductor circuit breakage	112,8	6,6
9. Электронная дроссельная заслонка / Electronic throttle valve	Износ потенциометра / Potentiometer wear	94,4	7,6
10. Катушка зажигания / Ignition coil	Обрыв цепи обмотки / Winding circuit breakage	96,4	6,4

Окончание таблицы 1 / End of table 1

1	2	3	4
11. Свеча зажигания / Spark plug	Износ электродов вследствие повышенного расхода масла. Разрушение или пробой изолятора / Wear of the electrodes resulted from increased oil consumption. Destruction or breakdown of the insulator	48,6	5,8
12. Турбокомпрессор / Turbocharger	Износ опорных подшипников / Wear of the support bearings	125,8	3,2
13. Клапан регулятор давления наддува / Valve boost pressure regulator	Нарушение герметичности / Break of tightness	134,4	2,1
14. Электронный блок управления двигателем ECU / Electronic engine control unit ECU	Перегорание дорожек платы вследствие короткого замыкания в цепях датчиков и исполнительных механизмов / Burnout of the board tracks resulted from short circuit fault in the circuits of sensors and actuators	172,2	2,4
15. Остальные узлы / Other nodes			13,8

элементов ЭСУД соответствует исполнительным механизмам системы, имеющим подвижные элементы (электронная дроссельная заслонка, катушка зажигания, топливный насос, регулятор давления топлива). Датчики, измеряющие параметры системы, изнашиваются в меньшей степени [14–16].

Пример нарушения работоспособного состояния топливного насоса высокого давления автомобиля Skoda Octavia с двигателем 1.8 TSI представлен на рисунке 1. На рабочем штоке заметны характерные задиры и повреждения вследствие механического воздействия абразива, скапливающегося на поверхности штока, температурных режимов работы, качества смазочного материала и нарушения целостности уплотнительных элементов.

Определить данное повреждение внешним осмотром, не разбирая узел, не представлялось возможным.

Изношенный шток способствовал утечкам и попаданию топлива в систему смазки двигателя. Происходило разжижение масла и формирование богатой смеси в рабочем пространстве кислородного датчика. На это указывал код неисправности P0172, периодически появляющийся в памяти ЭБУ. При этом заметной потери мощности не наблюдалось, но контроллер информировал через приборную панель о низком среднем часовом расходе топлива и о переобогащении топливовоздушной смеси.

При игнорировании данного диагностического сообщения последствия стали бы негативными для состояния двигателя и его остаточного ресурса: слишком жидкое масло привело бы к нарушению смазки в трущихся узлах и повреждению двигателя. Невнимательное отношение к диагностическим сообщениям может стать причиной дорогостоящего ремонта автомобиля.



Р и с. 1. Шток топливного насоса высокого давления BOSCH 0261520472 со следами износа  
F i g. 1. BOSCH 0261520472 high pressure fuel pump rod with signs of wear

Также оценка технического состояния топливного насоса высокого давления проводилась по параметрам развиваемого давления в режиме холостого хода и повышенных оборотов. Данные параметры сравнивались с табличными значениями, установленными для конкретного типа ЭСУД и версии программного обеспечения. Для топливного насоса высокого давления (ТНВД) BOSCH 0261520472 в режиме холостого хода параметры работы должны соответствовать запрашиваемому системой давлению 40 бар.

Дальнейшие исследования проводились по основным показателям, характеризующим надежность любой технической системы. Наряду со средней наработкой на отказ так же внимание уделялось параметрам вероятности безотказной работы  $P(t)$  и интенсивности отказов  $\lambda(t)$  по интервалам наработки. Расчеты этих показателей по

результатам исследований эксплуатационной надежности ЭСУД выполнены по всем основным ее элементам с помощью программы Microsoft Office Excel.

В качестве примера в таблице 2 представлены показатели безотказности регулятора давления ТНВД по интервалам наработки.

Графическое представление изменения интенсивности отказов  $\lambda(t)$  и вероятности безотказной работы  $P(t)$  элемента ЭСУД по наработке показано на рисунках 2, 3.

Вероятность безотказной работы элемента находили исходя из выражения для каждого интервала наработки:

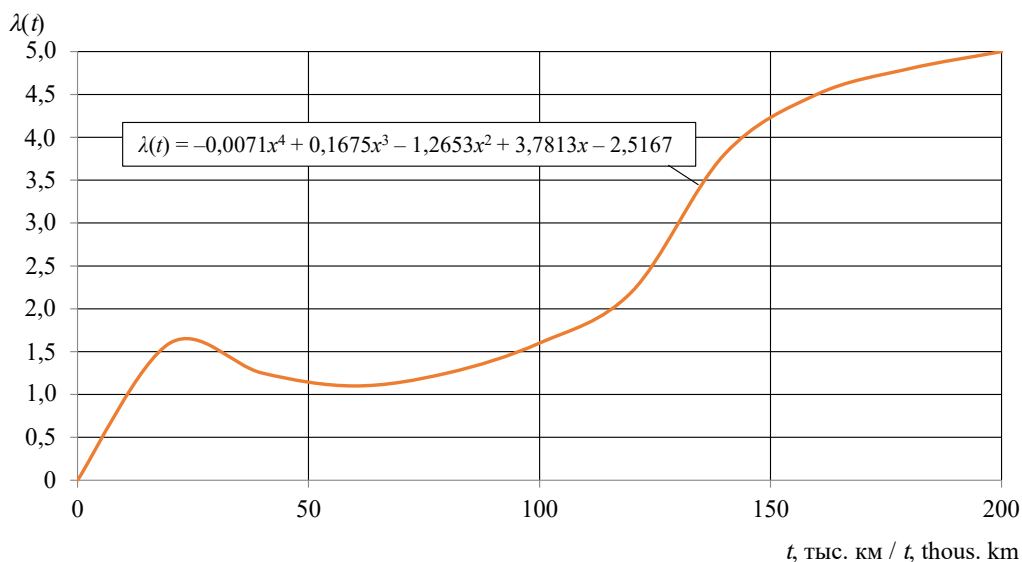
$$P(t) = N(t) / N_0, \quad (1)$$

где  $N_0$  – количество изделий, работавших в данный промежуток;  $N(t)$  – количество исправных изделий в конце отрезка.



Показатели безотказности регулятора давления топлива по наработке  
Reliability indicators of the fuel pressure regulator by operating time

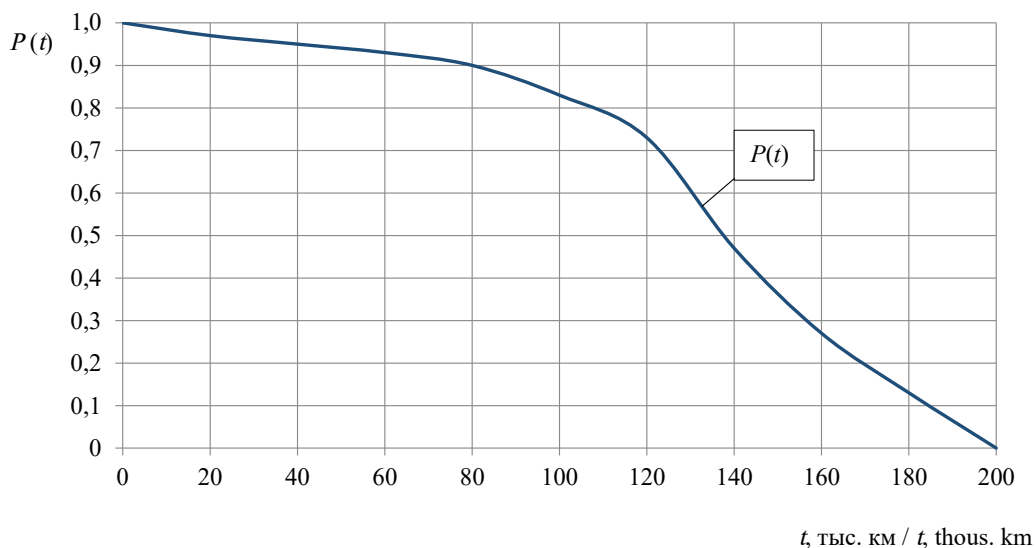
Показатель / Indicator	Наработка, тыс. км / Operating time, thous. km									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Число отказов $n(\Delta t)$ / Number of failures $n(\Delta t)$	2	1	1	2	4	6	16	12	8	8
Интенсивность отказов $\lambda(t)$ , $10^4$ 1/тыс.км / Failure rate $\lambda(t)$ , $10^4$ 1/thous. km	1,60	1,24	1,10	1,25	1,60	2,20	3,80	4,50	4,80	5,00
Вероятность безотказной работы $P(t)$ / Probability of uptime $P(t)$	0,97	0,95	0,93	0,90	0,83	0,73	0,47	0,27	0,13	0



Р и с. 2. Изменение интенсивности отказов  $\lambda(t)$  регулятора давления топлива по наработке  
F i g. 2. Change in the failure ratio  $\lambda(t)$  of the fuel pressure regulator by operating time

Анализ приведенной зависимости показал, что после достижения наработки 125 тыс. км интенсивность отказов такого элемента топливной

системы, как регулятор давления топлива  $\lambda(t)$ , начинает вырастать, а вероятность безотказной работы снижаться до значения  $P(t) = 0,47$ .



Р и с. 3. Снижение вероятности безотказной работы регулятора давления топлива по наработке  
 F i g. 3. Reducing the probability of failure-free operation of the fuel pressure regulator by operating time

К прогнозируемой наработке происходит засорение штока вследствие загрязнения, что приводит к износу штока и в конечном итоге потере работоспособности узла.

Отказы элементов системы управления двигателем оказывают большое влияние на ряд показателей работы (мощность, расход топлива, вредные выбросы в окружающую среду и т. д.). При отказах таких основных элементов, как топливный насос низкого и высокого давления и датчики положения, запуск двигателя блокируется ЭСУД.

**Обсуждение и заключение**

Для предупреждения отказов ЭСУД при проведении работ по техническому обслуживанию и диагностированию автомобилей необходимо выявлять состояние элементов данных систем и при необходимости устранять неисправности.

Согласно рекомендациям производителя автомобиля предусмотрена проверка памяти кодов неисправностей в ЭБУ. При их наличии требуется

выполнять необходимые контрольно-диагностические операции. При отсутствии кодов неисправностей ЭСУД признается технически исправной и дополнительные проверки не проводятся. В результате при выполнении технического обслуживания пропускается значительное число не выявленных в ЭСУД скрытых неисправностей, что приводит к росту отказов этих систем в эксплуатации.

По результатам анализа таблиц 1, 2 был сделан вывод, что наименьший ресурсный пробег приходится на свечи зажигания, входящие в состав ЭСУД. При этом наиболее частая неисправность возникает у регулятора давления топлива в топливной системе автомобилей с долей 19,8 % от общего количества. Ресурс данного элемента ЭСУД, определенный в результате вычисления и представленный на рисунках 2, 3, составляет в среднем 125 тыс. км.

Проведенные исследования с использованием компьютерной диагностики позволили оценить состояние ЭСУД

автомобилей Skoda, эксплуатируемых в регионе. На основании анализа причин возникновения отказов и неисправностей даны рекомендации по проведению диагностики системы ЭСУД при посещении станции ТО для предупреждения возникновения сложных отказов и неисправностей по собственной методике оценки с использованием современных сканеров, механических тестеров, специальных диагностических программ и иного оборудования.

Подводя итог, можно сделать вывод, что применение технологий диагностирования с использованием технологического оборудования для определения неисправностей позволяет определять ресурсные показатели элементов ЭСУД. Данная методика является актуальной и эффективной при применении на автомобилях, включающих современные цифровые технологии и электронные системы управления двигателем автомобиля.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Methods to Investigate the Importance of eFuel Properties for Enhanced Emission and Mixture Formation [Электронный ресурс] / J. Villforth [et al.] // SAE Technical Papers. SAE 15<sup>th</sup> International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0017>
2. Komorska I., Wołczyński Z, Borezuch A. Diagnosis of Sensor Faults in a Combustion Engine Control System with the Artificial Neural Network // Diagnostyka. 2019. Vol. 20, Issue 4. P. 19–25. doi: <https://doi.org/10.29354/diag/110440>
3. Control and Optimization of Spark Ignition–Controlled Auto-Ignition Hybrid Combustion Based on Stratified Flame Ignition / T. Chen [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2019. Vol. 233, Issue 12. P. 3057–3073. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407018817626>
4. Effect of Diesel Injection Strategies on Natural Gas/Diesel RCCI Combustion Characteristics in a Light Duty Diesel Engine / K. Poorghasemi [et al.] // Applied Energy. 2017. Vol. 199. P. 430–446. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.011>
5. Detection of Engine Misfire Using Characteristic Harmonics of Angular Acceleration / Q. Song [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2019. Vol. 233, Issue 14. P. 3816–3823. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407019834104>
6. Experimental and Numerical Investigation for Improved Mixture Formation of an eFuel Compared to Standard Gasoline [Электронный ресурс] / E. Rossi [et al.] // SAE Technical Papers. SAE 15<sup>th</sup> International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0019>
7. Misfire Detection of Diesel Engine Based on Convolutional Neural Networks / P. Zhang [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2021. Vol. 235, Issue 8. P. 2148–2165. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407020987077>
8. Kannadhasan A. Self Diagnostic Cars: Using Infotainment Electronic Control Unit [Электронный ресурс] // SAE Technical Papers. 17<sup>th</sup> Symposium on International Automotive Technology. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-26-0027>
9. Concept Analysis and Initial Results of Engine-Out NOx Estimator Suitable for on ECM Implementation [Электронный ресурс] / D. Kihias [et al.] // SAE Technical Papers. SAE 2016 World Congress and Exhibition. 2016. doi: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0611>
10. Price K. S., Wang L., Pauly T. Evaluation of Field NOx Performance of Diesel Vehicles Using ECM - Provided OBD/SAEJ1979 Data [Электронный ресурс] // SAE Technical Papers. SAE 2015 World Congress and Exhibition. 2015. doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1067>
11. Круш Л. О., Галин Д. А. Разработка устройства для определения магнитного поля на базе микроконтроллера Arduino Uno // Сурский вестник. 2021. Т. 13, № 1. С. 47–51. doi: [https://doi.org/10.36461/2619-1202\\_2021\\_13\\_01\\_009](https://doi.org/10.36461/2619-1202_2021_13_01_009)

12. Azizahwati A., Rahmad M., Hidayat F. Development of a Circular Motion Experimental Device Using an Arduino Uno Microcontroller [Электронный ресурс] // Journal of Physics: Conference Series. Universitas Riau International Conference on Science and Environment (11–13 September 2020). Vol. 1655. Pekanbaru, 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012154>
13. Takeuchi Y., Oike H., Ishikawa T. Development of Motor Health Examination System Using Arduino Uno [Электронный ресурс] // 23<sup>rd</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (24–27 November 2020). Hamamatsu, 2020. doi: <https://doi.org/10.23919/ICEMS50442.2020.9290982>
14. Model-Based Development and OBD Calibration for Heavy-Duty Applications / R. Rezaei [et al.] // Proceedings of China SAE Congress 2020: Selected Papers. Lecture Notes in Electrical Engineering. Vol. 769. Springer : Singapore, 2020. P. 753–770. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2090-4\\_45](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2090-4_45)
15. Mirmohammadsadeghi M., Zhao H., Ito A. Optical Study of Gasoline Substitution Ratio and Diesel Injection Strategy Effects on Dual-Fuel Combustion // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2020. Vol. 234, Issue 4. P. 1075–1097. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407019864013>
16. Extracting Event Data from Memory Chips within a Detroit Diesel DDEC v [Электронный ресурс] / J. Daily [et al.] // SAE Technical Papers. SAE 2015 World Congress and Exhibition. 2015. doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1450>
17. Krogerus T. R., Hyyönönen M. P., Huhtala K. J. A Survey of Analysis, Modeling, and Diagnostics of Diesel Fuel Injection Systems [Электронный ресурс] // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2016. Vol. 138, Issue 8. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4032417>
18. Krivoshepov S. Development of a Piston Fuel Flow Meter Based on a Microcontroller and Its Use for Vehicle Diagnostics // SAE Technical Papers. SAE 2021 Powertrains, Fuels and Lubricants Digital Summit, FFL. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-01-1150>
19. Selvam H. P., Shekhar S., Northrop W. F. Prediction of NOx Emissions from Compression Ignition Engines Using Ensemble Learning-Based Models with Physical Interpretability [Электронный ресурс] // SAE Technical Papers. SAE 15<sup>th</sup> International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0082>
20. Real Time Energy Management Control Strategies for an Electrically Supercharged Gasoline Hybrid Vehicle [Электронный ресурс] / F. Accurso [et al.] // SAE Technical Papers. SAE 2020 World Congress Experience, WCX. 2020. doi: <https://doi.org/10.4271/2020-01-1009>
21. Combined CFD – Experimental Analysis of the In-Cylinder Combustion Phenomena in a Dual Fuel Optical Compression Ignition Engine [Электронный ресурс] / R. De Robbio [et al.] // SAE Technical Papers. SAE 15<sup>th</sup> International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0012>

*Поступила 09.03.2022; одобрена после рецензирования 11.04.2022; принята к публикации 20.04.2022*

*Об авторах:*

**Сенин Петр Васильевич**, заведующий кафедрой технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, [senin53@mail.ru](mailto:senin53@mail.ru)

**Галин Дмитрий Александрович**, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-2685>, Researcher ID: AGA-8511-2022, [dagalin@yandex.ru](mailto:dagalin@yandex.ru)

**Круш Леонид Олегович**, аспирант кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0876-0739>, Researcher ID: AGA-8642-2022, [leonidgrants@yandex.ru](mailto:leonidgrants@yandex.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

П. В. Сенин – научное руководство, разработка технического задания на исследование.

Д. А. Галин – проведение научного исследования, подготовка текста, математический расчет, анализ результатов исследования.

Л. О. Круш – подготовка и анализ литературных данных, проведение научного исследования, анализ результатов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Villforth J., Kulzer A.C., Deeg H.-P., et al. Methods to Investigate the Importance of eFuel Properties for Enhanced Emission and Mixture Formation. In: SAE Technical Papers. SAE 15<sup>th</sup> International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0017>
2. Komorska I., Wolczyński Z, Borczech A. Diagnosis of Sensor Faults in a Combustion Engine Control System with the Artificial Neural Network. *Diagnostyka*. 2019;20(4):19–25. doi: <https://doi.org/10.29354/diag/110440>
3. Chen T., Wang X., Zhao H., et al. Control and Optimization of Spark Ignition–Controlled Auto-Ignition Hybrid Combustion Based on Stratified Flame Ignition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019;233(12):3057–3073. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407018817626>
4. Poorghasemi K., Saray R.K., Ansari E., et al. Effect of Diesel Injection Strategies on Natural Gas/Diesel RCCI Combustion Characteristics in a Light Duty Diesel Engine. *Applied Energy*. 2017;199:430–446. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.011>
5. Song Q., Gao W., Zhang P., et al. Detection of Engine Misfire Using Characteristic Harmonics of Angular Acceleration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019;233(14):3816–3823. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407019834104>
6. Rossi E., Hummel S., Cupo F., et al. Experimental and Numerical Investigation for Improved Mixture Formation of an eFuel Compared to Standard Gasoline. In: SAE Technical Papers. SAE 15<sup>th</sup> International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0019>
7. Zhang P., Gao W., Li Y., Wang Y. Misfire Detection of Diesel Engine Based on Convolutional Neural Networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2021;235(8):2148–2165. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407020987077>
8. Kannadhasan A. Self Diagnostic Cars: Using Infotainment Electronic Control Unit. In: SAE Technical Papers. 17<sup>th</sup> Symposium on International Automotive Technology. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-26-0027>
9. Kihias D., Khaled N., Kihias D., et al. Concept Analysis and Initial Results of Engine-Out NOx Estimator Suitable for on ECM Implementation. In: SAE Technical Papers. SAE 2016 World Congress and Exhibition. 2016. doi: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0611>
10. Price K.S., Wang L., Pauly T. Evaluation of Field NOx Performance of Diesel Vehicles Using ECM - Provided OBD/SAEJ1979 Data. In: SAE Technical Papers. SAE 2015 World Congress and Exhibition. 2015. doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1067>
11. Krush L.O., Galin D.A. Development of a Device for Determining the Magnetic Field Based on Arduino Uno Microcontroller. *Sura Bulletin*. 2021;13(1):47–51. (In Russ.) doi: [https://doi.org/10.36461/2619-1202\\_2021\\_13\\_01\\_009](https://doi.org/10.36461/2619-1202_2021_13_01_009)
12. Azizahwati A., Rahmad M., Hidayat F. Development of a Circular Motion Experimental Device Using an Arduino Uno Microcontroller. In: Journal of Physics: Conference Series. Universitas Riau International Conference on Science and Environment (11–13 September 2020). Vol. 1655. Pekanbaru; 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012154>
13. Takeuchi Y., Oike H., Ishikawa T. Development of Motor Health Examination System Using Arduino Uno. In: 23<sup>rd</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (24–27 November 2020). Hamamatsu; 2020. doi: <https://doi.org/10.23919/ICEMS50442.2020.9290982>

14. Rezaei R., Schwalbe J., Weber M., et al. Model-Based Development and OBD Calibration for Heavy-Duty Applications. In: Proceedings of China SAE Congress 2020: Selected Papers. Lecture Notes in Electrical Engineering. Vol. 769. Springer: Singapore; 2020. p. 753–770. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2090-4\\_45](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2090-4_45)
15. Mirmohammadsadeghi M., Zhao H., Ito A. Optical Study of Gasoline Substitution Ratio and Diesel Injection Strategy Effects on Dual-Fuel Combustion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2020;234(4):1075–1097. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407019864013>
16. Daily J., Kongs A., Johnson J., Corcega J. Extracting Event Data from Memory Chips within a Detroit Diesel DDEC v. In: SAE Technical Papers. SAE 2015 World Congress and Exhibition. 2015. doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1450>
17. Krogerus T.R., Hyvönen M.P., Huhtala K.J. A Survey of Analysis, Modeling, and Diagnostics of Diesel Fuel Injection Systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2016;138(8). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4032417>
18. Krivoschapov S. Development of a Piston Fuel Flow Meter Based on a Microcontroller and Its Use for Vehicle Diagnostics. In: SAE Technical Papers. SAE 2021 Powertrains, Fuels and Lubricants Digital Summit, FFL. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-01-1150>
19. Selvam H.P., Shekhar S., Northrop W.F. Prediction of NOx Emissions from Compression Ignition Engines Using Ensemble Learning-Based Models with Physical Interpretability. In: SAE Technical Papers. SAE 15<sup>th</sup> International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0082>
20. Accurso F., Zanelli A., Rolando L., Millo F. Real Time Energy Management Control Strategies for an Electrically Supercharged Gasoline Hybrid Vehicle. In: SAE Technical Papers. SAE 2020 World Congress Experience, WCX. 2020. doi: <https://doi.org/10.4271/2020-01-1009>
21. De Robbio R., Cameretti M.C., Mancaruso E., et al. Combined CFD – Experimental Analysis of the In-Cylinder Combustion Phenomena in a Dual Fuel Optical Compression Ignition Engine. In: SAE Technical Papers. SAE 15<sup>th</sup> International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0012>

*Submitted 09.03.2022; approved after reviewing 11.04.2022; accepted for publication 20.04.2022*

*About the authors:*

**Petr V. Senin**, Head of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: [H-1219-2016](https://orcid.org/H-1219-2016), [senin53@mail.ru](mailto:senin53@mail.ru)

**Dmitriy A. Galin**, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2858-2685>, Researcher ID: [AGA-8511-2022](https://orcid.org/AGA-8511-2022), [dagalin@yandex.ru](mailto:dagalin@yandex.ru)

**Leonid O. Krush**, Postgraduate Student of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0876-0739>, Researcher ID: [AGA-8642-2022](https://orcid.org/AGA-8642-2022), [leonidsgrants@yandex.ru](mailto:leonidsgrants@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

P. V. Senin – scientific guidance, development of the terms of reference for the study.

D. A. Galin – conducting scientific research, text preparation, mathematical calculation, analysis of the research results.

L. O. Krush – preparation and analysis of literary data, conducting scientific research, analysis of the results.

*All authors have read and approved the final manuscript.*