

УДК 621.113

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК  
С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ БЕЗ СНЯТИЯ С ДВИГАТЕЛЯ****В.В. КОСТРИЦКИЙ, А.В. ПАВЧЕНКО**  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассмотрен метод диагностирования дизельных топливных форсунок, который позволяет эффективно оценить их техническое состояние без снятия с двигателя. Этот метод применим в первую очередь в тех случаях, когда форсунки невозможно снять без механических повреждений. Проверка форсунок без снятия производится сравнительным анализом показателей параметров всех форсунок двигателя. К этим параметрам можно отнести коррекцию цикловой подачи топлива, калибровку нулевой подачи, характеристики управляющего сигнала, сопротивление форсунки, расход топлива на управление. Для определения состояния форсунки необходимо установить значения всех диагностических параметров. Отклонение хотя бы одного из них от номинального значения указывает на неисправность пьезофорсунки.*

**Ключевые слова:** пьезофорсунки, двигатели внутреннего сгорания, дизельные топливные системы, коррекция цикловой подачи топлива, калибровка нулевой подачи.

**Введение.** Самым совершенным устройством, обеспечивающим впрыск топлива в дизельном двигателе, является пьезоэлектрическая форсунка (пьезофорсунка). Преимуществами пьезофорсунки являются быстрота срабатывания (в 4 раза быстрее электромагнитного клапана) и, как следствие, возможность многократного впрыска топлива в течение одного цикла, а также точная дозировка впрыскиваемого топлива. Это стало возможным благодаря использованию пьезоэффекта в управлении форсункой, основанного на изменении длины пьезокристалла под действием напряжения [1]. Такая форсунка характеризуется наличием устойчивого многофазового впрыскивания топлива, минимальными порциями предварительного впрыскивания, возможностью короткого промежутка времени между предварительным и основным впрыскиванием и компактным конструктивным решением. Важно отметить, что по сравнению с электромагнитной форсункой пьезофорсунка имеет меньший расход топлива на управление и, следовательно, обладает большим КПД [1; 2].

Указанные преимущества пьезофорсунки достигнуты путем реализации в ней гидравлической схемы, которая характеризуется наличием нескольких, связанных между собой и оказывающих взаимное влияние, гидродинамических каналов, полостей и динамических звеньев. Сложность конструкции обусловливает и сложную взаимосвязь процессов, происходящих в работающей форсунке. Это приводит к тому, что такая гидродинамическая система имеет узкий диапазон значений своих структурных параметров, которые определяют как оптимальную работу форсунки, так и ее работоспособность в принципе [3; 4]. Кроме того, из-за непростой конструкции количество структурных параметров, по которым можно судить об исправности форсунки, больше 20. В связи с этим дефектовать форсунки по всем структурным параметрам трудно.

Однако изменение структурных параметров имеет общие внешние (косвенные) признаки, которые можно представить как основные диагностические параметры. Их значения можно получить при дефектовке пьезофорсунок с помощью специального дилерского оборудования. Методика такого диагностирования пьезофорсунок базируется на проверке соответствия электрических и гидравлических параметров, заданных производителем в тест-плане. К этим параметрам относятся:

- проверка герметичности форсунки;
- проверка наполнения гидрокомпенсатора;
- проверка электрических параметров пьезомодуля;
- определение минимального напряжения для активации форсунки;
- измерение количества топлива, подаваемого форсункой на различных режимах работы двигателя [5; 6].

Но установить пьезофорсунки на дорогостоящее дилерское оборудование не представляется возможным, т.к. в большинстве случаев их практически нельзя снять с двигателя без механических повреждений. К таким двигателям можно отнести те, которые устанавливаются на автомобили марок Mercedes (двигатели 2.2 CDI, 2.7 CDI, 3.0 CDI, 3.2 CDI, 4.0 CDI), Peugeot, Citroen, Ford, Volvo, Suzuki (двигатели 1.6 HDI, 1.8 HDI, 2.0 HDI, 2.2 HDI, 2.5 HDI, 2.7 HDI), Renault, Nissan, Opel (двигатели 1.9DCI, 2.0 DCI, 2.2 DCI), Hyundai, Kia (двигатели 2.0 CRDI, 2.2 CRDI, 2.5 CRDI, 2.7 2.0 CRDI), Fiat, Iveco (двигатели 2.4 JTD, 3.0 JTD) и т.д. В связи с этим разработка метода диагностирования дизельных топливных форсунок с пьезоэлектрическим приводом без снятия с двигателя является актуальной.

**Основная часть.** Для таких двигателей нами предложен метод, в котором рассматриваются в качестве оценочных характеристик такие диагностические показатели, которые возможно определить и зафиксировать без снятия форсунки с двигателя и без ее разборки. Кроме того, этот способ можно использовать для диагностирования любых дизельных двигателей с пьезофорсунками.

К диагностическим параметрам относятся:

- коррекция цикловой подачи топлива;
- калибровка нулевой подачи;
- параметры управляющего импульса;
- сопротивление форсунки;
- расход топлива на управление.

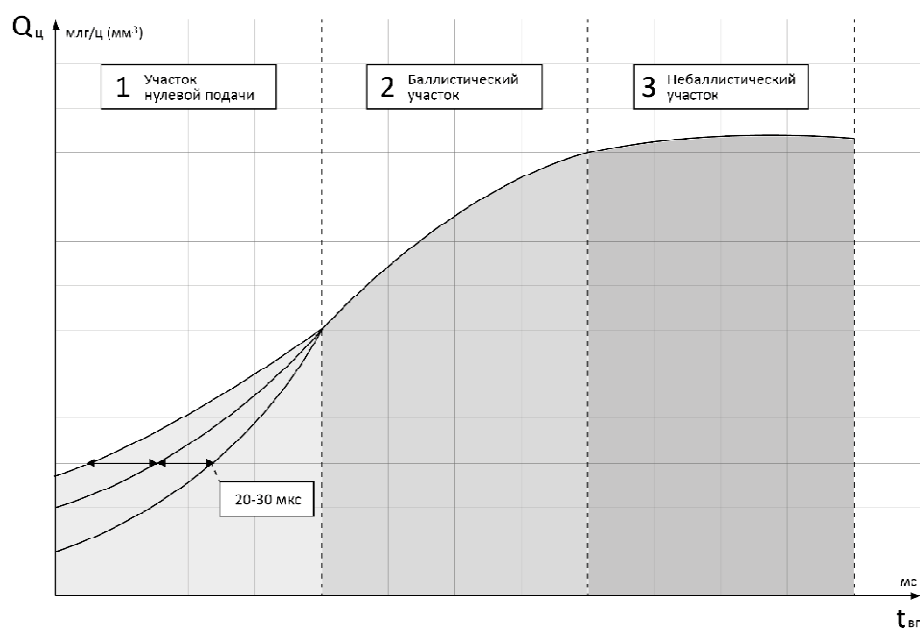
Проверка форсунок без снятия производится сравнительным анализом показателей параметров всех форсунок двигателя.

*Коррекция цикловой подачи топлива.* Цикловая подача топлива (мг) – один из важнейших показателей работы цилиндров двигателя и форсунок.

После подачи топлива в конце такта сжатия поршень в результате воспламенения этого топлива перемещается от верхней мертвой точки к нижней, передавая угловое ускорение коленчатому валу (угловое ускорение определяется с помощью датчика коленчатого вала). В идеально работающем двигателе для равномерного ускорения коленчатого вала от каждого цилиндра в одном режиме (холостой ход, частичная нагрузка двигателя, полная нагрузка двигателя и т.д.) необходимо одно и то же количество подаваемого топлива в каждый цилиндр. Однако в результате изнашивания составных частей гидросистемы пьезофорсунки часть топлива может либо сбрасываться через канал управления, либо некачественно распыляться, поэтому требуется больше топлива, чтобы получить такое же ускорение коленчатого вала. В каждый цилиндр подается разное количество топлива, и этот алгоритм работает всегда.

Разница между заложенным в электронный блок управления количеством топлива, которое необходимо подать форсункой, и реально поданным количеством называется коррекцией цикловой подачи топлива. Значение этого параметра можно оценить, подключив к автомобилю сканирующую диагностическую систему. Коррекция цикловой подачи носит относительный характер, т.е. техническое состояние по этому параметру определяется после анализа его значений на всех форсунках. Производители рекомендуют считать форсунку неисправной, если отклонение коррекции превышает 25% от номинального значения цикловой подачи.

*Калибровка нулевой подачи.* Зависимость количества подачи топлива от длительности импульса открытия пьезофорсунки можно разделить на три основных участка: участок нулевой подачи, баллистический и небаллистический участки (рисунок 1).



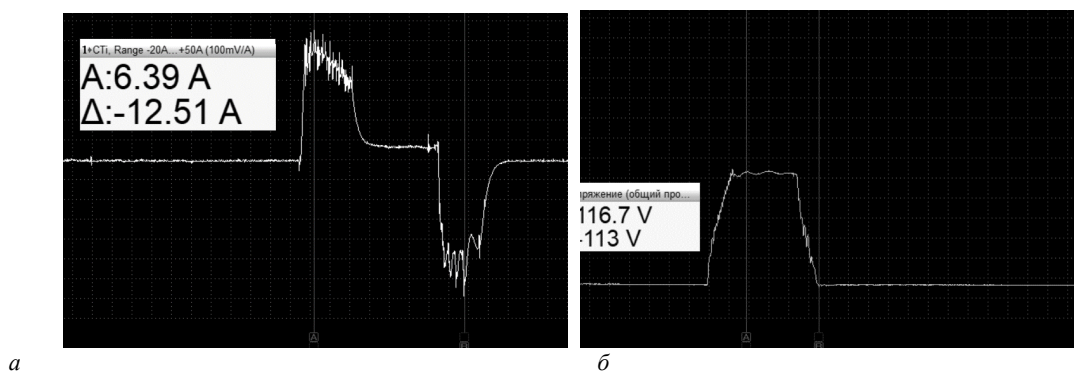
$Q_c$  – цикловая подача топлива;  $t_{вн}$  – время открытия форсунки

**Рисунок 1.** – Зависимость количества подачи топлива от длительности импульса открытия форсунки

На баллистическом участке подача топлива растет с увеличением времени впрыска, на небаллистическом – почти не изменяется. Как правило, небаллистический участок отражает работу форсунки при повышенной нагрузке двигателя, когда дальнейшее увеличение количества топлива не приводит к нарастанию мощности, а лишь вызывает усиленное образование сажи. На этих участках каждому значению времени впрыска соответствует количество подаваемого топлива, установленное заводом-изготовителем.

Участок нулевой подачи характеризует работу форсунки при предварительных впрысках, где время открытия форсунки крайне мало, поэтому запрограммировать его невозможно. Такое время открытия форсунки составляет примерно 100 мкс, постоянно колеблется в пределах от 20 до 30 мкс и называется калибровкой нулевой подачи (мкс). Увеличение пределов колебания данного параметра свидетельствует об износе основных гидравлических элементов форсунки. Как и в случае коррекции цикловой подачи, калибровка нулевой подачи определяется при помощи сканирующей диагностической системы.

*Параметры управляющего импульса.* Для открытия клапана пьезофорсунки нужны большой ток и высокое напряжение. Управляющее напряжение пьезофорсунки находится в пределах от 70 до 120 В, поэтому для питания форсунок устанавливается отдельный, повышающий напряжение, трансформатор. При этом напряжение на форсунку подается не постоянно, а короткими импульсами (ШИМ-сигналом). При подаче и снятии напряжения происходит выброс тока, одинакового по амплитуде (порядка  $\pm 6-10$  А), но разнонаправленного по значению (рисунок 2).



*a* – осциллограмма силы тока; *б* – осциллограмма напряжения

**Рисунок 2. – Параметры управляющего сигнала**

По величине напряжения, силе тока и форме сигнала тока можно сделать вывод о состоянии форсунок. Для определения параметров управляющего импульса необходимо использовать мотортестер, подключив к одному из его каналов токовые клещи с широкой полосой пропускания, а к другому – адаптер-иглу для измерения напряжения. Токосные клещи и адаптер-иглу следует установить на провод с управляющим сигналом. Форма и значения силы тока, значения напряжения должны быть одинаковыми для всех форсунок. Любое отклонение параметров управляющего импульса указывает на неисправность форсунки.

*Сопротивление форсунки.* Пьезоэлемент форсунки должен обладать высоким омическим сопротивлением от 150 до 200 кОм. Также сопротивление между корпусом форсунки и контактами пьезоэлемента должно стремиться к бесконечности. Для определения сопротивления пьезоэлемента используют омметр, а для измерения сопротивления между пьезоэлементом и корпусом форсунки – мегомметр с возможностью подачи напряжения порядка 100 В.

*Расход топлива на управление.* Помимо этого, проверка форсунок без снятия производится сравнительным анализом объема поступающего топлива в обратную линию, т.е. измерением расхода топлива на управление (мг). Для проведения теста необходимо снять шланги со штуцеров обратного слива форсунки, установив на их место прозрачные шланги специального устройства. Это устройство представляет собой градуированные в единицах объема мерные стаканы (к каждой форсунке устанавливается отдельный мерный стакан). Расход топлива определяют на холостом ходу двигателя или при прокрутке стартером, если двигатель не заводится. Расход топлива на управление должен быть одинаковым для всех форсунок. Превышение расхода топлива на управление в два раза относительно других форсунок является критическим.

При диагностировании пьезофорсунок без снятия их с двигателя необходимо определить значения всех приведенных выше диагностических параметров. Отклонение хотя бы одного диагностического параметра от номинального указывает на неисправность форсунки. В таком случае неисправную форсунку следует заменить.

*Результаты исследований.* По данной методике было проведено диагностирование дизельных двигателей различных марок автомобилей, у которых есть проблема со снятием пьезофорсунок. В данной статье рассмотрены примеры применения метода для автомобилей Opel Vivaro с двигателем 2.0 HDI, Peugeot 607 с двигателем 2,2 HDI и Kia Sportage с двигателем 2,0 CRDI.

1. Автомобиль *Opel Vivaro с двигателем 2.0 HDI*. Этот автомобиль имеет особенности конструкции подкапотного пространства, которые позволяют дождевой воде с ветрового стекла попадать в колдцы форсунок, что приводит к коррозии и невозможности снятия форсунок без механических повреждений. В случае с этим автомобилем неисправность проявлялась как неравномерная работа двигателя на всех режимах и плохой запуск двигателя. Для определения коррекции цикловой подачи топлива и калибровки нулевой подачи использовалась сканирующая диагностическая система Launch X431 PRO; для измерения силы тока и напряжения, а также для определения формы сигнала – мотортестер USB Autoscore 4; для определения сопротивления пьезоэлемента – омметр, встроенный в мультиметр MY60, сопротивления форсунки – мегомметр Мегеон 13210. Расход топлива на управление определялся прибором Rail HCB A2252.

Результаты диагностирования этого автомобиля при помощи безразборного метода представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты диагностирования автомобиля Opel Vivaro

Номер форсунки	Параметры							
	коррекция цикловой подачи топлива, мг	калибровка нулевой подачи, мкс	сила тока, А	напряжение, В	форма сигнала	сопротивление пьезоэлемента, кОм	сопротивление форсунки, кОм	расход топлива на управление, мг
1	-1,2	8	7,7	114	без особенностей	178 кОм	–	5 мг за 2 мин
2	+0,3	15	7,7	118	без особенностей	175 кОм	–	4 мг за 2 мин
3	<b>+2,4</b>	<b>158</b>	8	114	без особенностей	168 кОм	–	<b>21 мг за 2 мин</b>
4	+0,1	12	7,9	116	без особенностей	167 кОм	–	4 мг за 2 мин

В выделенных ячейках таблицы значения параметров превышают предельно допустимые. Для данного двигателя цикловая подача топлива составляет 6,5 мг, соответственно, коррекция не должна превышать 1,95 мг топлива на цикл. Для третьей форсунки это значение значительно выше – 2,4 мг. Кроме того, для этой форсунки калибровка нулевой подачи значительно выше допустимого значения (158 мкс при предельно допустимом значении 30 мкс), расход топлива на управление в несколько раз превышает значения этого параметра для других форсунок. По полученным данным форсунку третьего цилиндра следует признать неисправной и рекомендовать ее заменить.

2. Автомобиль *Peugeot 607 с двигателем 2,2 HDI*. Главная проблема с извлечением форсунок из двигателя заключается в ограниченном моторном пространстве. Также затрудняют снятие форсунок две крепежные шпильки. Этот автомобиль имел признаки неисправности, которые характеризовались как потеря мощности, нестабильная работа двигателя под нагрузкой, повышенные показатели дымности на всех режимах работы двигателя. Причиной таких признаков неисправности могут быть неисправные форсунки. Поэтому проводилась проверка форсунок по предложенным методикам. Для определения параметров (силы тока, напряжения, сопротивления пьезоэлемента, сопротивления форсунки и расхода топлива на управление) использовалось такое же оборудование, как и для автомобиля Opel Vivaro. Для определения коррекции цикловой подачи топлива и калибровки нулевой подачи использовалась сканирующая диагностическая система Lexia 3 (XS Evolution). Результаты диагностирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты диагностирования автомобиля Peugeot 607

Номер форсунки	Параметры							
	коррекция цикловой подачи топлива, мг	калибровка нулевой подачи, мкс	сила тока, А	напряжение, В	форма сигнала	сопротивление пьезоэлемента, кОм	сопротивление форсунки, кОм	расход топлива на управление, мг
1	+0,9	22	6,4	110	без особенностей	198 кОм	–	5 мг за 2 мин
2	+0,7	<b>77</b>	6,5	111	без особенностей	197 кОм	<b>34 Ом</b>	<b>18 мг за 2 мин</b>
3	-0,4	21	6,4	110	без особенностей	198 кОм	–	13 мг за 2 мин
4	+0,1	<b>98</b>	6,7	110	без особенностей	199 кОм	<b>29 Ом</b>	<b>19 мг за 2 мин</b>

В этом двигателе неисправны две форсунки: форсунка 2-го и 4-го цилиндров. Если такие параметры, как калибровка нулевой подачи и расход топлива на управление, незначительно превышают предельно допустимые значения (см. соответствующие ячейки таблицы 2), то сопротивление форсунок, проверенное с помощью мегомметра при подаче напряжения около 100 В, не стремится к бесконечности, а имеет очень низкие значения (для 2-й форсунки 34 Ом, для 4-й – 29 Ом). Эти форсунки стали причиной описанных признаков неправильной работы двигателя. Следовательно, их необходимо заменить.

3. Автомобиль *Kia Sportage с двигателем 2,0 CRDI*. Трудности демонтажа форсунок с этого двигателя возникают из-за формы и хрупкости корпуса. Кроме того, ограниченное пространство моторного отсека затрудняет снятие форсунок инерционным молотком.

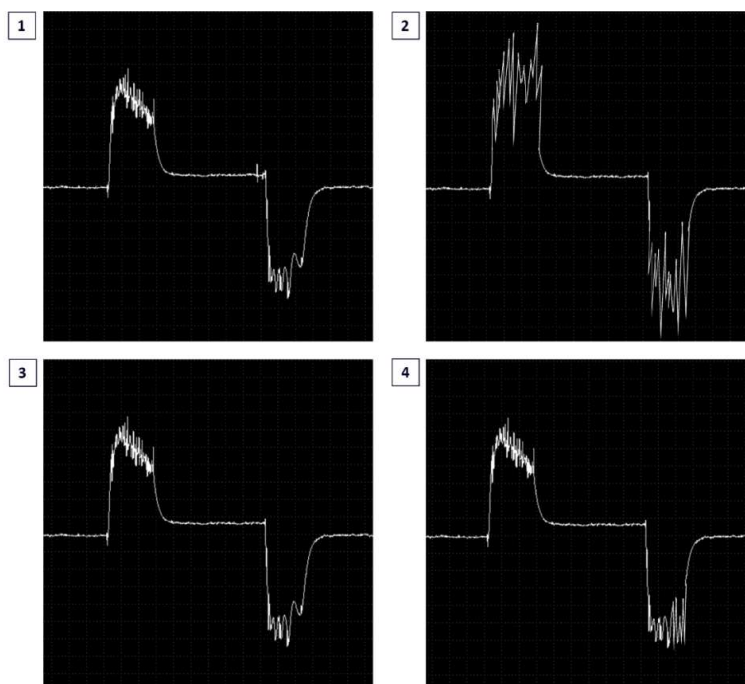
Неисправность в этом автомобиле проявлялась в виде неравномерной работы двигателя на всех режимах работы. Для определения параметров, кроме коррекции цикловой подачи и калибровки нулевой подачи пьезофорсунок, использовался такой же комплект оборудования, как и в случаях, описанных выше. Коррекцию цикловой подачи топлива и калибровку нулевой подачи определяли при помощи сканирующей диагностической системы GDS VCI Hyundai & Kia.

Значения полученных параметров после диагностирования форсунок представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты диагностирования автомобиля *Kia Sportage*

Номер форсунки	Параметры							
	коррекция цикловой подачи топлива, мг	калибровка нулевой подачи, мкс	сила тока, А	напряжение, В	форма сигнала	сопротивление пьезоэлемента, кОм	сопротивление форсунки, кОм	расход топлива на управление, мг
1	-1,0	13	6,8	116	без особенностей	198 кОм	–	8 мг за 2 мин
2	-0,5	18	<b>12,1</b>	116	<b>особенности формы</b>	197 кОм	–	11 мг за 2 мин
3	+0,1	12	6,7	116	без особенностей	198 кОм	–	8 мг за 2 мин
4	-0,2	16	7,2	116	без особенностей	199 кОм	–	8 мг за 2 мин

Согласно полученным значениям параметров, форсунка 2-го цилиндра имеет более высокую силу тока (12,1 А) и особенности частоты колебания тока по сравнению с другими форсунками (рисунок 3).



1 – 1-я форсунка; 2 – 2-я форсунка; 3 – 3-я форсунка; 4 – 4-я форсунка

Рисунок 3. – Осциллограммы силы тока

Осциллограмма силы тока 2-й форсунки однозначно указывает на ее неисправность, т.к. значение силы тока и частота колебаний форсунок, установленных на один двигатель, должны быть одинаковыми. При этом остальные параметры всех форсунок не превышают предельно допустимые значения.

Во всех случаях после замены неисправных форсунок работоспособность системы питания двигателей была восстановлена.

**Заключение.** В результате исследований было установлено, что предложенный нами метод диагностирования дизельных топливных форсунок с пьезоэлектрическим приводом без снятия с двигателя позволяет эффективно определять их техническое состояние. Проверка форсунок при помощи данного метода производится сравнительным анализом показателей параметров всех форсунок двигателя.

Метод в первую очередь используется в тех случаях, когда форсунки невозможно снять с двигателя без механических повреждений. Он может использоваться и для дизельных двигателей с пьезофорсунками, не имеющими проблемы снятия, т.к. не требует дорогостоящего дилерского оборудования.

Для дизельных двигателей таких марок машин, как Mercedes, Peugeot, Citroen, Ford, Volvo, Suzuki, Renault, Nissan, Opel, Hyundai, Kia, Fiat и Iveco, этот метод является единственно возможным способом оценки технического состояния пьезофорсунок.

Преимущество метода заключается в использовании недорогого оборудования. Кроме того, данный метод требует небольших временных затрат и обладает достаточно высокой точностью полученных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Диагностика и техническое обслуживание машин : учеб. / А.Д. Ананьин [и др.]. – М : Академия, 2015. – 416 с.
2. Неговора, А.В. Улучшение эксплуатационных показателей автотракторных дизелей совершенствованием конструкции и технологии диагностирования топливоподающей системы : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.02 / А.В. Неговора. – СПб., 2004. – 343 л.
3. Грехов, Л.В. Аккумуляторная топливная система с электро-гидроуправляемой форсункой / Л.В. Грехов, И.И. Габитов, А.В. Неговора // Тракторы и сельхозмашины. – 2001. – № 7. – С. 14–16.
4. Неговора, А.В. Диагностирование топливной аппаратуры автотракторных дизелей / А.В. Неговора., Л.В. Грехов, И.И. Габитов // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. 100-лет Вибс. – Челябинск : ЮУрГУ, 2003. – 85 с.
5. Гюнтер, Г. Диагностика дизельных двигателей : [пер. с нем.] / Г. Гюнтер. – М. : За рулем, 2004. – 176 с. – (Автомеханик).
6. Скляр, В. Ремонт и обслуживание форсунок дизельных двигателей: практическое руководство / В. Скляр, С. Яковенко, А. Скляр. – Ростов на/Д : ПОНЧиК, 2000. – 24 с.

Поступила 12.11.2020

### DIAGNOSING DIESEL FUEL INJECTORS WITH PIEZOELECTRIC DRIVE WITHOUT REMOVING FROM THE ENGINE

V. KOSTRITSKY, A. PAVCHENKO

*A method for diagnosing diesel fuel injectors is considered, which makes it possible to effectively assess their technical condition without removing them from the engine. This method is applicable primarily in cases where the injectors cannot be removed without mechanical damage. Checking the injectors without removing is carried out by a comparative analysis of the parameters of all engine injectors. These parameters include the correction of the cyclic fuel supply, calibration of zero supply, characteristics of the control signal, injector resistance, fuel consumption for control. To determine the condition of the injector, it is necessary to set the values of all diagnostic parameters. Deviation of at least one diagnostic parameter from the nominal value indicates a malfunction of the piezo injector.*

**Keywords:** piezo injectors, internal combustion engines, diesel fuel systems, fuel cycle correction, zero flow calibration.