

Горбiк Ю.В.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет***МЕТОД ДІАГНОСТИКИ П'ЄЗОГІДРАВЛІЧНИХ ДИЗЕЛЬНИХ ФОРСУНОК**

У статті наведено метод діагностики п'єзогiдрaвлiчних дизельних форсунок, що дозволяє оцiнити їх стан без необхідності демонтажу з двигуна, що особливо корисно при неможливості зняття форсунок без механiчних пошкоджень. Для діагностики застосовується порiвняльний аналіз параметрів всіх форсунок, таких як корекція циклової подачі палива, калiбрування нульової подачі, параметри сигналу, що управляє, опiр форсунки і витрата палива на управління. Метод особливо актуальний для складних конструкцій систем подачі палива типу Common Rail, які широко використовуються в сучасних дизельних двигунах.

Дослідження підтверджує, що технічний стан форсунок можна визначити за непрямими ознаками, які виявляються під час використання діагностичного устаткування. На практиці частіше використовують метод оцiнити стану форсунок за їх робочими характеристиками, перевіряючи їх герметичність, стан гiдрокомпенсатора, електричні параметри п'єзомодуля, мінімальну напругу активації форсунки та кількість палива, що подається в різних режимах двигуна. Автори проводять діагностику на конкретному прикладі (автомобіль Kia Sportage), де запропонована методика показала ефективність, визначивши несправність форсунки без демонтажу.

Основний висновок полягає в тому, що даний метод може значно підвищити ефективність та точність діагностики, знизивши витрати на обслуговування за рахунок запобігання необхідності демонтажу форсунок.

Ключові слова: електрогiдрaвлiчні та п'єзогiдрaвлiчні форсунки, двигуни внутрішнього згоряння, дизельні паливні системи, корекція циклової подачі пального, калiбрування нульової подачі.

ВСТУП

Основним типом силових агрегатів автомобілів комерційного сектору є дизельний двигун. Цей тип двигуна є економічним, а автомобілі, оснащені ним, успішно експлуатуються в усіх кліматичних зонах країни. Для забезпечення високих екологічних вимог автомобільні дизелі обладнуються сучасними високоточними системами паливоподачі. Широко розповсюдженим представником таких систем є паливоподаюча система акумуляторного типу – Common Rail. Погіршення технічного стану практично будь-якого її елемента призводить до суттєвого погіршення екологічних, а згодом і експлуатаційних показників автомобіля, тому технічний стан паливоподаючої системи акумуляторного типу має систематично контролюватися.

Разом з тим контроль технічного стану цих наукоємних та технічно складних паливоподаючих систем має ряд особливостей, що, у свою чергу, вимагає нових знань, методів і рішень. Найбільш важливими і водночас найменш надійними елементами паливної системи є форсунки. Існуючі методи діагностики технічного стану форсунок є дорогими та трудомісткими процедурами, оскільки виконуються на спеціалізованих стендах і пов'язані з великим обсягом розбірно-збиральних робіт. У випадку, коли форсунки розташовані під клапанною кришкою, доступним місцем для діагностичних перевірок є загальна зворотна магістраль, однак відомими методами можна визначити лише загальний технічний стан, і виникає необхідність демонтажу всіх форсунок.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Система паливопостачання Common Rail автомобіля може комплектуватися форсунками двох типів управління – з електрогiдрaвлiчним (ЕГФ) та п'єзогiдрaвлiчним (ПГФ). Паливні системи більшості сучасних легкових і вантажних автомобілів укомплектовані п'єзогiдрaвлiчними форсунками. Перевагами ПГФ є швидкість спрацьовування (в 4 рази швидше електромагнітного клапана) та, як наслідок, можливість багаторазового впорскування пального протягом одного циклу, а також точна дозування впорскуваного пального. Це стало можливим завдяки використанню п'єзоелектричного ефекту в управлінні форсункою, що ґрунтується на зміні довжини п'єзокристала під дією напруги [1]. Така форсунка характеризується наявністю стабільного багатofазного впорскування пального, мінімальними порціями попереднього впорскування, можливістю короткого проміжку часу між попереднім і основним впорскуванням та компактним конструктивним рішенням. Важливо відзначити, що в порівнянні з електромагнітною форсункою п'єзофорсунка має менший витрату пального на управління і, отже, володіє більшим ККД [1, 2].

Вказані переваги ПГФ досягнуті шляхом реалізації в ній гiдрaвлiчної схеми, яка характеризується наявністю кількох, взаємопов'язаних і взаємодіючих гiдродинамічних каналів, порожнин і динамічних елементів. Складність конструкції обумовлює й складний взаємозв'язок

процесiв, що вiдбуваються в форсунцi. Це призводить до того, що така гiдродинамiчна система має вузький дiапазон значень своїх структурних параметрiв, якi визначають як оптимальну роботу форсунки, так i її працездатнiсть в принципi [3, 4]. Складна конструкцiя форсунок зумовлює кiлькiсть структурних параметрiв, за якими можна судити про справнiсть форсунки, а їх бiльше 20, i, у зв'язку з цим, дефектувати форсунки за всiма структурними параметрами складно.

Проте змiна структурних параметрiв має загальнi зовнiшнi (непрямi) ознаки, якi можна подати як основнi дiагностичнi параметри. Їх значення можна отримати при дефектовцi ПГФ за допомогою спецiального дилерського обладнання. Методика такого дiагностування ПГФ базується на перевiрцi вiдповiдностi електричних i гiдравлiчних параметрiв, заданих виробником у тест-планi. До цих параметрiв вiдносяться:

- перевiрка герметичностi форсунки;
- перевiрка наповнення гiдрокомпенсатора;
- перевiрка електричних параметрiв п'езомодуля;
- визначення мiнiмальної напруги для активацiї форсунки;
- вимiрювання кiлькостi пального, що подається форсункою на рiзних режимах роботи двигуна

[5, 6].

На практицi, при обслуговуванні деяких марок автомобiлiв встановити п'езоелектричнi форсунки на дороговартiсне дилерське обладнання часто неможливо, оскiльки форсунки в бiльшостi випадкiв майже неможливо зняти з двигуна без їх механiчного пошкодження. До таких двигунiв можна вiднести тi, що встановлюються на автомобiлi марок Mercedes (двигуни 2.2 CDI, 2.7 CDI, 3.0 CDI, 3.2 CDI, 4.0 CDI), Peugeot, Citroen, Ford, Volvo, Suzuki (двигуни 1.6 HDI, 1.8 HDI, 2.0 HDI, 2.2 HDI, 2.5 HDI, 2.7 HDI), Renault, Nissan, Opel (двигуни 1.9 DCI, 2.0 DCI, 2.2 DCI), Hyundai, Kia (двигуни 2.0 CRDI, 2.2 CRDI, 2.5 CRDI, 2.7 CRDI), Fiat, Iveco (двигуни 2.4 JTD, 3.0 JTD) тощо. Спроби знизити трудомiсткiсть i пiдвижити iнформативнiсть контролю технiчного стану акумуляторних паливних систем автомобiльних дизелiв вiдомими методами стикаються з труднощами, спричиненими браком знань про закономірностi змiни тиску та витрати палива в загальнiй зворотнiй магiстралi паливних систем пiд час зносу форсунок, а також вiдсутнiстю дорогого дилерського обладнання. У зв'язку з цим розробка методу дiагностики дизельних паливних форсунок iз п'езоелектричним приводом без їх демонтажу з двигуна є актуальною.

ЦIЛI ТА ЗАДАЧI ДОСЛIДЖЕНЬ

Метою цiєї роботи є зниження трудомiсткостi та пiдвищення iнформативностi дiагностики електрогiдравлiчних форсунок акумуляторних паливних систем автомобiльних дизелiв в умовах експлуатацiї шляхом використання розробленого методу за витратою палива в загальнiй зворотнiй магiстралi.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛIДЖЕННЯ

Ми запропонували метод дiагностики для дизельних двигунiв, де як оцiночнi характеристики розглядаються такi дiагностичнi показники, якi можна визначити без демонтажу форсунки з двигуна та без її розборки. Крім того, цей спiсiб можна застосовувати для дiагностики будь-яких дизельних двигунiв iз паливною системою Common Rail (ПГФ). До дiагностичних параметрiв належать:

- корекцiя циклової подачi палива;
- калiбрування нульової подачi;
- параметри керуючого iмпульсу;
- опiр форсунки;
- витрата палива на керування.

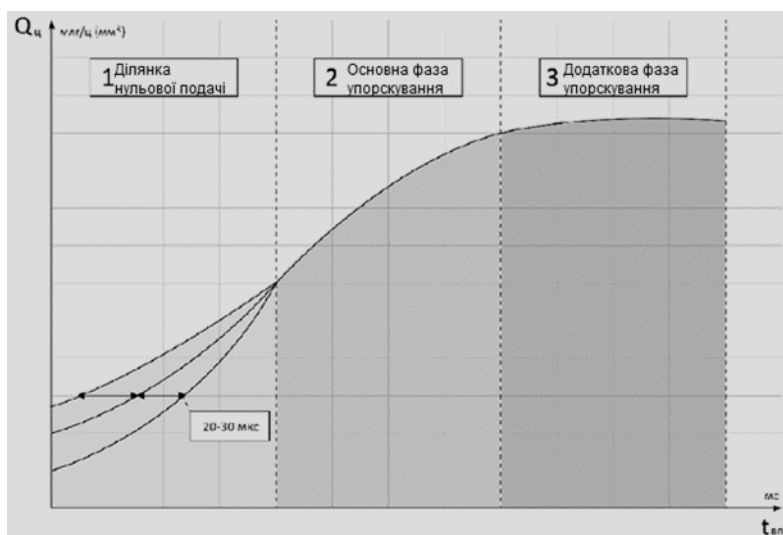
Перевiрка форсунок без зняття здiйснюється порiвняльним аналізом параметрiв усiх форсунок двигуна.

Корекцiя циклової подачi палива. Циклова подача палива (мг) – один iз найважливиших показникiв роботи цилiндрiв двигуна та форсунок. Пiсля подачi палива в кiнцi такту стиснення поршень, завдяки згорянню палива, перемiщується вiд верхньої мертвої точки до нижньої, передаючи кутове прискорення колiнчастому валу (кутове прискорення визначається за допомогою датчика колiнчастого валу). В iдеально працюючому двигунi для рiвномiрного прискорення колiнчастого валу вiд кожного цилiндра в одному режимi (холостий хiд, часткове навантаження, повне навантаження тощо) необхідно однакову кiлькiсть палива в кожен цилiндр. Проте через знос компонентiв гiдросистеми ПГФ частина палива може скидатися через керуючий канал або розпилуватися неякiсно, через що потрiбна бiльша кiлькiсть палива для досягнення такого ж прискорення колiнчастого валу. Вiдповiдно, у кожен цилiндр подається рiзна кiлькiсть палива, i цей алгоритм

працює постійно [7, 8].

Рiзниця мiж кiлькiстю палива, запланованою для подачi форсункою, та реально поданою кiлькiстю називається корекцiєю циклової подачi палива. Це значення можна оцiнити, пiдключивши до автомобiля, наприклад, автосканер Launch X431 PRO. Корекцiя циклової подачi є вiдносним показником, тому технiчний стан форсунок визначається пiсля аналізу значень цього параметра на всiх форсунках. Виробники рекомендують вважати форсунку несправною, якщо вiдхилення корекцiї перевищує 25% вiд номiнального значення циклової подачi.

Калiбрування нульової подачi. Залежнiсть кiлькостi подачi пального вiд тривалостi iмпульсу вiдкриття п'єзофорсунки можна подiлити на три основнi дiлянки: дiлянка 1 – нульової подачi, дiлянка 2 – основної фази впорскування, i дiлянка 3 – додаткової фази впорскування (рис. 1).



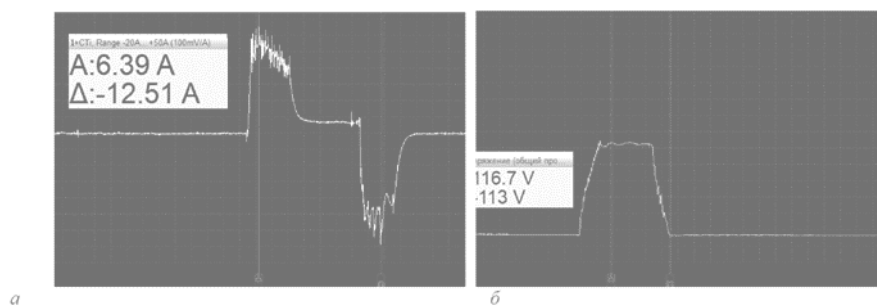
$Q_{ц}$ – циклове подавання пального; $t_{вп}$ – час відкриття форсунки
Рисунок 1 – Залежність кількості подачі пального від тривалості імпульсу відкриття форсунки

На балістичній ділянці (ділянки 1 та 2) подача пального зростає із збільшенням часу впорскування, а на небалістичній ділянці (ділянка 3) – майже не змінюється. Зазвичай небалістична ділянка відображає роботу форсунки за підвищеного навантаження двигуна, коли подальше збільшення кількості пального не призводить до збільшення потужності, а лише викликає посилене утворення сажі. На цих ділянках кожному значенню часу впорскування відповідає кількість поданого пального, встановлена заводом-виробником.

Ділянка нульової подачі характеризує роботу форсунки під час попередніх впорскувань, де час відкриття форсунки дуже малий, тому його неможливо запрограмувати. Цей час відкриття становить приблизно 100 мкс, постійно коливається в межах від 20 до 30 мкс і називається калібруванням нульової подачі. Збільшення меж коливання цього параметра свідчить про знос основних гідравлічних елементів форсунки. Як і в випадку корекції циклової подачі, калібрування нульової подачі визначається за допомогою скануючої діагностичної системи.

Параметри керуючого імпульсу. Для відкриття клапана ПГФ потрібні високий ток і велика напруга. Керуюча напруга ПГФ коливається від 70 до 120 В, тому для живлення форсунок у блоці управління встановлюється окремий перетворювач, що підвищує напругу. При цьому напруга на форсунку подається не постійно, а короткими імпульсами (ШИМ-сигналом). При подачі та знятті напруги відбувається викид току, однакового за амплітудою (порядку $\pm 6-10$ А), але різноспрямованого за значенням (рис. 2).

За величиною напруги, силою току та формою сигналу можна зробити висновок про стан форсунок. Для визначення параметрів керуючого імпульсу необхідно використовувати мотор-тестер, підключивши до одного з його каналів токові клещі з широкою смугою пропускання, а до іншого – адаптер-голку для вимірювання напруги. Токіві клещі та адаптер-голку слід встановити на проводі з керуючим сигналом.



а – осцилограма сили струму; б – осцилограма напруги

Рисунок 2 – Параметри керуючого сигналу

Форма та значення сили току, а також значення напруги повинні бути однаковими для всіх форсунок. Будь-яке відхилення параметрів керуючого імпульсу вказує на несправність форсунки.

Опір форсунки. П'єзоелемент форсунки повинен мати високе омичне опір від 150 до 200 кОм. Також опір між корпусом форсунки та контактами п'єзоелемента має прагнути до нескінченності. Для визначення опору п'єзоелемента використовують омметр, а для вимірювання опору між п'єзоелементом та корпусом форсунки – мегомметр з можливістю подачі напруги приблизно 100 В.

Витрата пального на управління. Окрім цього, перевірка форсунок без демонтажу здійснюється шляхом порівняльного аналізу обсягу пального, що повертається, тобто вимірювання витрати пального на управління. Для проведення тесту необхідно зняти шланги зі штуцерів зворотного скидання форсунки, встановивши на їх місце прозорі шланги спеціального пристрою. Це пристрій являє собою градуйовані у одиницях обсягу мірні стакани (кожній форсунці встановлюється окремий мірний стакан, рис.3).



Рисунок 3 – Процес перевірки витрати палива на керування

Витрата пального визначається на холостому ході двигуна або при прокрутці стартером, якщо двигун не запускається. Витрата пального на управління повинна бути однаковою для всіх форсунок. Перевищення витрати пального на управління вдвічі щодо інших форсунок є критичним.

При діагностиці ПГФ без їх зняття з двигуна необхідно визначити значення всіх вищезгаданих діагностичних параметрів. Відхилення хоча б одного діагностичного параметра від номінального вказує на несправність форсунки. У такому випадку несправну форсунку слід замінити.

За цією методикою було проведено діагностування дизельних двигунів різних марок автомобілів, у яких виникають проблеми зі зняттям ПГФ.

ОБГОВОРЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

В статті наведено приклад застосування запропонованого методу для автомобіля Kia Sportage з двигуном 2,0 CRDI. Складності демонтажу форсунок з цього двигуна виникають через форму та крихкість корпусу форсунок. Крім того, обмежений простір моторного відсіку ускладнює зняття форсунок інерційним молотком.

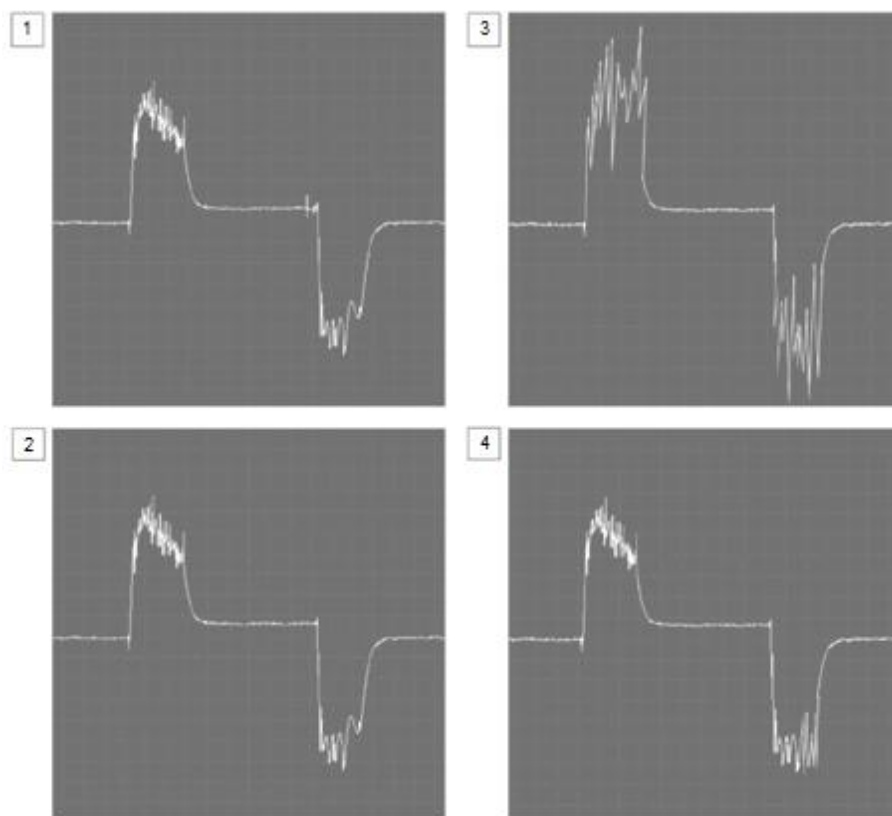
Несправність на цьому автомобілі проявлялася у вигляді нерівномірної роботи двигуна на всіх режимах роботи. Корекцію циклової подачі пального та калібрування нульової подачі визначали за допомогою дилерського автосканера GDS VCI Hyundai & Kia; для вимірювання сили току та напруги, а також для визначення форми сигналу – мотор-тестер USB Autoscope 4; для визначення опору п'єзоелемента – універсальний мультиметр MY60; опору форсунки – мегомметр Venetech GT5307A. Витрата пального на управління визначалася тестером зворотного витоку пального Rail HCB A2252.

Результати діагностування цього автомобіля за допомогою безрозбірного методу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати діагностування автомобіля Kia Sportage

Номер форсунки	Параметри						
	Корекція циклової подачі палива, мг	Калібрування нульової подачі, мкс	Сила струму, А	Напруга, В	Форма сигналу	Опір п'єзоелемента, кОм	Витрата палива на керування, мг
1	-1,0	13	6,8	116	Без особливостей	198 кОм	8 мг за 2 хв
2	+0,1	12	6,7	116	Без особливостей	198 кОм	8 мг за 2 хв
3	-0,5	18	12,1	116,7	Змінено форму сигналу	197 кОм	11 мг за 2 хв
4	-0,2	16	7,2	116	Без особливостей	199 кОм	8 мг за 2 хв

Відповідно до отриманих значень параметрів, форсунка 3-го циліндра має вищу силу струму (12,1 А) та особливості частоти коливання струму у порівнянні з іншими форсунками (рис. 4).



1 – 1-ша форсунка; 2 – 2-га форсунка; 3 – 3-тя форсунка; 4 – 4-та форсунка
Рисунок 4 – Осцилограми сили струму

Осцилограма сили струму 3-ї форсунки однозначно вказує на її несправність, оскільки значення сили струму та частота коливань форсунок, встановлених на один двигун, повинні бути однаковими.

Замір витрати палива на керування теж підтвердив про несправність форсунки у третьому циліндрі. Водночас інші параметри всіх форсунок не перевищують допустимих значень за винятком величини опору п'єзоелемента в цій форсунці. Ця форсунка спричинила описані ознаки неправильної роботи двигуна. Отже, її потрібно замінити.

У цьому випадку після заміни несправної форсунки працездатність системи живлення двигуна була відновлена.

ВИСНОВКИ

У результаті досліджень було встановлено, що запропонований нами метод діагностування дизельних паливних форсунок з п'єзоелектричним приводом без демонтажу з двигуна дозволяє ефективно визначати їх технічний стан. Перевірка форсунок за допомогою цього методу здійснюється шляхом порівняльного аналізу показників параметрів усіх форсунок двигуна.

Метод в першу чергу використовується в тих випадках, коли форсунки неможливо зняти з двигуна без механічних пошкоджень. Він може також застосовуватися для дизельних двигунів з п'єзофорсунками, які не мають проблем зі зняттям, оскільки не потребує дорогого дилерського обладнання.

Використання розробленого методу щодо витрати пального в загальній зворотній магістралі спрямоване на зменшення трудомісткості та підвищення інформативності діагностики електрогідравлічних форсунок акумуляторних паливоподаючих систем автомобільних дизелів в умовах експлуатації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Двигуни внутрішнього згорання: Серія підручників у 6 томах. Т. 3. Комп'ютерні системи керування ДВЗ. / За редакцією А.П. Марченка, засл. діяча науки України проф. А.Ф. Шеховцова – Харків: Видавн. центр НТУ “ХПІ”, 2004. 427 с.

2. Міненко С.В., Чорний Б.В. Форсунки, що використовуються в паливній апаратурі автотракторних дизелів. Техніка та технології в агропромисловому виробництві : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Полтава: ПДАУ, 2021. С. 67-75.

3. Система живлення дизельного двигуна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://avtodvigateli.com/detali/sistema-pitaniya-dizelya.html>. – Дата доступу: 16.09.2024.

4. Бабанін О.Б., Буцький О.В. Аналіз методів діагностування паливної апаратури дизелів. Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. №168. 2017. С. 75–86.

5. Ковтун Б.Ю., Шушляпін С.В. Причини погіршення надійності паливної апаратури ДВЗ. Інноваційні розробки в аграрній сфері: Матеріали МНПІК Харків: ХНТУСГ, 2019. С. 71-74.

6. Аналіз відомих способів діагностування двигунів внутрішнього згорання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studref.com/541509/tehnika/analiz-izvestnyh-sposobov-diagnostirovaniya-dvigatelay-vnutrennego-sgoraniya>. – Дата доступу: 16.09.2024.

7. Система живлення дизельного двигуна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://avtodvigateli.com/detali/sistema-pitaniya-dizelya.html>. – Дата доступу: 16.09.2024.

8. Діагностування та ТО системи живлення дизельного двигуна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://extxe.com/17397/diagnostirovanie-i-to-sistemy-pitaniya-dizelnogo-dvigatelja/#3> Common Rail. – Дата доступу: 16.09.2024.

REFERENCES

1. Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia: Seriiia pidruchnykiv u 6 tomakh. T. 3. Kompiuterni systemy keruvannia DVZ. / Za redaktsiieiu A.P. Marchenka, zasl. diiacha nauky Ukrainy prof. A.F. Shekhovtsova – Kharkiv: Vydavn. tsentr NTU “KhPI”, 2004. 427 s.

2. Minenko S.V., Chornyi B.V. Forsunky, shcho vykorystovuiutsia v palyvniy aparatury avtotraktornykh dyzeliv. Tekhnika ta tekhnolohii v ahropromyslovomu vyrobnytstvi : materialy Mizhnar. nauk.-prakt. konf. Poltava: PDAU, 2021. S. 67-75.

3. Systema zhyvlennia dyzelnoho dvyhuna [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://avtodvigateli.com/detali/sistema-pitaniya-dizelya.html>. – Data dostupu: 16.09.2024.

4. Babanin O.B., Butskiy O.V. Analiz metodiv diahnostuvannia palyvnoi aparatury dyzeliv. Zb. nauk. prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu. №168. 2017. S. 75–86.

5. Kovtun B.Iu., Shushliapin S.V. Prychyny pohirshennia nadiinosti palyvnoi aparatury DVZ. Innovatsiini rozrobky v ahrarnii sferi: Materialy MNPK Kharkiv: KhNTUSH, 2019. S. 71-74.
6. Analiz vidomykh sposobiv diahnostuvannia dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: https://studref.com/541509/tehnika/analiz_izvestnyh_sposobov_diaagnostirovaniya_dvigately_vnutrennego_sgoraniya. – Data dostupu: 16.09.2024.
7. Systema zhyvlennia dyzelnoho dvyhuna [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://avtodvigateli.com/detali/sistema-pitaniya-dizelya.html>. – Data dostupu: 16.09.2024.
8. Diahnostuvannia ta TO systemy zhyvlennia dyzelnoho dvyhuna [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: https://extxe.com/17397/diaagnostirovanie-i-to-sistemy-pitaniya-dizelnogo-dvigatelja/#3_Common_Rail. – Data dostupu: 16.09.2024.

Y. Gorbik, Method of diagnosing piezohydraulic diesel injectors

The article presents a method for diagnosing piezohydraulic diesel injectors, which allows assessing their condition without the need to dismantle them from the engine, which is especially useful when it is impossible to remove the injectors without mechanical damage. For diagnostics, a comparative analysis of the parameters of all injectors is used, such as correction of cyclic fuel supply, calibration of zero supply, control signal parameters, injector resistance and fuel consumption for control. The method is especially relevant for complex designs of Common Rail fuel supply systems, which are widely used in modern diesel engines.

The study confirms that the technical condition of injectors can be determined by indirect signs that are detected when using diagnostic equipment. In practice, the method of assessing the condition of injectors by their operating characteristics is more often used, checking their tightness, the condition of the hydraulic compensator, the electrical parameters of the piezomodule, the minimum injector activation voltage and the amount of fuel supplied in different engine modes. The authors conduct diagnostics on a specific example (Kia Sportage car), where the proposed method showed effectiveness, identifying injector malfunctions without dismantling. The main conclusion is that this method can significantly increase the efficiency and accuracy of diagnostics, reducing maintenance costs by preventing the need to dismantle injectors.

Key words: electro-hydraulic and piezo-hydraulic injectors, internal combustion engine, diesel fuel systems, correction of cyclic fuel supply, calibration of zero supply.

ГОРБИК Юрій Васильович, кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: yuragorbik@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6876-8428.

Yurij GORBIK, Associate Professor (Assoc. Prof.), Candidate of Science in Engineering (Ph. D. (Eng.)), Kharkiv National Automobile and Highway University (KhNAHU), e-mail: yuragorbik@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6876-8428.

DOI 10.36910/automash.v2i23.1527