

А. О. Корпач¹
О. О. Левківський²
О. А. Корпач¹

РОЗШИРЕНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ ВИСОКОГО ТИСКУ ДИЗЕЛЯ

¹Національний транспортний університет
²ТОВ «Віннер Імпорте Україна, ЛТД»

У статті розглянуто сучасні методи діагностування паливних систем високого тиску дизеля, зокрема паливної системи акумуляторного типу Common Rail. Особливу увагу приділено систематизації підходів до виявлення неполадок прецизійних компонентів, таких як електромагнітні або п'єзоелектричні форсунки та паливні насоси високого тиску (ПНВТ), що дозволяє підвищити точність локалізації дефектів.

Об'єктом дослідження є методи та засоби технічного діагностування паливної апаратури сучасних дизелів.

Розглянуто комплексний процес діагностики, що включає візуальну оцінку, аналіз кольору відпрацьованих газів, використання бортової системи самодіагностики (OBD) та інструментальної перевірку за допомогою цифрового осцилографа. Встановлено, що інтеграція цифрових технологій дозволяє відстежувати параметри корекції циклової подачі палива в реальному часі через реєстратори даних або осцилографа, що спрощує виявлення дисбалансу між циліндрами.

Описано методику безрозбірної перевірки продуктивності ПНВТ та герметичності системи за допомогою осцилограм тиску в паливній рампі. Визначено алгоритм оцінки стану електромагнітних та п'єзоелектричних форсунок через аналіз сигналів напруги, сили струму та часу активації, а також контроль витрати палива через зворотну магістраль.

Детально висвітлено етапи перевірки паливної апаратури на діагностичних стендах, що базуються на вимірюванні електричних параметрів, динамічних характеристик та гідравлічних показників у різних режимах навантаження. Доведено, що такий підхід забезпечує найбільш надійні результати при прийнятті рішення про ремонт або заміну вузлів.

Результати, висвітлені в статті, можуть бути використані для розробки структурованих алгоритмів технічного обслуговування, що дозволяють мінімізувати витрати на експлуатацію та ремонт сучасних дизелів.

Ключові слова: дизель, паливна система високого тиску, Common Rail, діагностика, паливна форсунка, ПНВТ, OBD, осцилограф.

Вступ

Постійне підвищення екологічних стандартів та вимог до паливної економічності і потужності сучасних дизелів призвело до значного вдосконалення конструкції паливної системи високого тиску, зокрема широкого впровадження паливної системи акумуляторного типу Common Rail. Даний тип паливної системи має електронне управління, як роботою паливного насоса високого тиску (ПНВТ) так і форсунок. Використання прецизійних п'єзоелектричних форсунок та високопродуктивних ПНВТ вимагає контролю робочих параметрів у дуже вузькому діапазоні, та як наслідок, навіть, незначні відхилення через знос або пошкодження компонентів призводять до порушення робочого процесу дизеля. Традиційні методи діагностики, що базуються на індивідуальній перевірці кожного компоненту паливної системи високого тиску, вже не здатні забезпечити необхідну точність та ефективність виявлення дефектів.

Водночас, інтеграція цифрових технологій у процеси діагностики розширює доступні методи виявлення дефектів. Основним викликом залишається відсутність уніфікованого підходу до вибору правильного методу діагностики до виявленого відхилення в роботі двигуна. Це обумовлює потребу в систематизації сучасних методів перевірки паливної апаратури дизеля, які дозволили б не лише констатувати факт неполадки, а й визначити причини виходу з ладу елементів паливної системи високого тиску.

Базова інформація, щодо методів діагностування паливної системи високого тиску дизеля, наведена в навчальній літературі, що створена на основі технічної документації виробників паливних систем, наприклад Robert Bosch GmbH [1]. В роботах [2] та [3] описано деструктивний вплив низької якості палива та кавітації на робочі показники паливної системи та методи їх виявлення. Іншим

перспективним напрямком досліджень вважається вивчення методів виявлення дефектів шляхом аналізу даних з електронних датчиків. Робота [4] пропонує методи аналізу зміни тиску палива для виявляти несправностей без демонтажу компонентів. Водночас, в роботі [5], описано принципи використання бортової системи самодіагностики (OBD) для оцінки роботи регулятора тиску та механічної продуктивності ПНВТ.

Метою роботи є аналіз основних методів діагностування паливної системи високого тиску сучасних дизелів та розробка структурованого підходу до їх практичного впровадження.

Результати дослідження

Діагностика паливної системи високого тиску дизеля являє собою комплексний процес, що складається з ряду етапів. На першому етапі необхідно виконати візуальну оцінку стану паливної апаратури та інших елементів двигуна, а також запуск та оцінку роботи двигуна в різних режимах. При виявленні порушень в роботі двигуна виконується перевірка наявності зареєстрованих помилок в модулі управління двигуном з подальшим дослідження за допомогою вбудованих функцій діагностичного програмного забезпечення (реєстратор даних, тест виконавчих механізмів і т.п.) або додаткового діагностичного обладнання (мультиметр, осцилограф інші електронні або механічні вимірювальні засоби). Після локалізації компоненту, що є причиною порушення роботи двигуна, на останньому етапі, він перевіряється на стенді, що дозволяє прийняти рішення про можливість виконання відновлювального ремонту або заміну всього компоненту.

Візуальна оцінка передбачає огляд елементів паливної апаратури на наявність ознак порушення герметичності (виявлення слідів витікання палива) та механічного пошкодження. Після запуску двигуна, можливо оцінити стан паливної апаратури, проаналізувавши шуми, вібрації та жорсткість роботи дизеля. Зростання рівня шуму та жорсткості роботи двигуна може свідчити про підвищення кількості або зміну моменту подачі палива в результаті порушення герметичності паливних форсунок або дефектів елементів електронного управління. Також, важливим показником ефективності роботи паливної апаратури дизеля, вважається колір відпрацьованих газів [6]. Виділяють три основні кольори відпрацьованих газів: білий, чорний і синій, що можуть свідчити про різні дефекти в роботі паливної апаратури або інших систем дизеля.

Білий колір відпрацьованих газів зазвичай означає високий вміст водяної пари. Такий колір відпрацьованих газів вважається нормальним явищем при роботі дизеля в умовах низької температури навколишнього середовища і його інтенсивність має знизитись після подальшого прогріву двигуна. Постійний білий колір відпрацьованих газів, як правило, свідчить про надмірний вміст води в дизельному паливі або може виникнути в результаті потрапляння охолоджуючої рідини в циліндри двигуна, або випускної систему, тому, у даному випадку, додатково необхідно перевірити рівень охолоджуючої рідини.

Чорний колір відпрацьованих газів свідчить про надмірний вміст вуглецю. Як правило, наявність чорного диму з випускної системи, вказує на некоректне співвідношення палива і повітря та, для автомобілів без сажового фільтра, вважається нормальним явищем при роботі двигуна в перехідних режимах. Наявність чорного диму при прискоренні двигуна в сучасних автомобілях, в передшу чергу, свідчить про вихід з ладу сажового фільтра. Постійний чорний колір відпрацьованих газів може свідчити про неправильний момент впорскування, в результаті виходу з ладу паливних форсунок, порушення тиску та моменту синхронізації в результаті механічного або електричного дефекту ПНВТ, дефекту в роботі клапана рециркуляції відпрацьованих газів (EGR - Exhaust Gas Recirculation) або дефекту системи подачі повітря (засмічений повітряний фільтр- підвищений опір впуску, дефект турбокомпресора і т.п.).

Синій колір відпрацьованих газів, як правило, не пов'язаний з роботою паливної апаратури, а свідчить про надмірне потрапляння моторної оливи в циліндри двигуна. При виявленні синього диму необхідно, в першу чергу, проконтролювати рівень і витрату моторної оливи.

Для всіх автомобілів з дизелем категорії M1 (легкові автомобілі) та N1 (легкі комерційні автомобілі), починаючи з 1-го січня 2003 року для нових моделей і з 1-го січня 2004 року для моделей, що знаходились в виробництві, наявність бортової системи самодіагностики OBD (On-Board Diagnostics) стала обов'язковою. Таким чином, на сьогоднішній день більшість автомобілів з дизелем, що перебувають в експлуатації, не залежно від типу паливної апаратури обладнані бортовою системою самодіагностики. Відповідно при виявленні дефектів в роботі дизеля наступний крок діагностування полягає в перевірці даних, збережених в електронному модулі управління шляхом підключення до роз'єму OBD з використанням оригінального (розробленого і рекомендованого виробником даної моделі автомобіля), або універсального програмного забезпечення.

Бортова система самодіагностики двигуна контролює сигнали датчиків, а також напругу і силу струму виконавчих механізмів в раках заданих виробником параметрів. При відхиленні показника датчика або положення виконавчого механізму за рамки заданого діапазону для даного режиму роботи двигуна (враховуючи частоту обертання колінчастого вала, навантаження, температуру та інші параметри) модуль управління зареєструє та збереже відповідну помилку. Модуль управління також зареєструє помилку при виявленні електричних дефектів в ланцюгах датчиків та виконавчих механізмів, наприклад обрив ланцюга або коротке замикання. Для різних дефектів існують певні коди, визначені Європейським стандартом ISO 15031-6:2015. Зчитування та розшифрування кодів помилок дозволяє визначити, який саме параметр не відповідає заданим значенням та виявити можливі дефекти. Наприклад, якщо фактичне значення тиску палива в паливній рампі системи Common Rail відрізняється від очікуваного значення для даного режиму роботи двигуна, буде зареєстровано код помилки P0089. Причини виникнення даного коду можуть бути різні, наприклад, дефект самого датчика або неполадки регулятора тиску в ПНВТ.

Деякі автовиробники доповнюють стандартний код помилки, визначений ISO 15031-6:2015, додатковими даними, що дозволяють звузити потенційні причини виникнення дефекту і, відповідно, спростити процес подальшої діагностики. Наприклад, бортова система самодіагностики автомобілів Jaguar Land Rover, виявивши відхилення тиску в паливній рампі, спробує його скорегувати за допомогою клапана керування тиском. Якщо після активації клапана зміни тиску не відбудеться, буде зареєстровано код помилки P0089-4B, в якому суфікс 4B додатково вказує саме на дефект керування клапаном регулювання тиску в паливній рампі.

Інший потужний інструмент діагностування дизеля, що доступний при підключенні оригінального або універсального програмного забезпечення до бортової системи самодіагностики, це реєстратор даних. Реєстратор даних дозволяє в реальному часі відслідковувати входні та вихідні сигнали модуля управління. Наприклад, при погіршенні умов згоряння в певному циліндрі, в результаті зниження компресії або погіршення розпилення палива форсункою, для компенсації втрати потужності модуль управління буде підвищувати циклову подачу палива для даного циліндра. При цьому, як правило, модуль управління не реєструє помилку, але в перехідних режимах, в результаті дисбалансу між циліндрами, двигун буде працювати нестабільно. На рис. 1 показано результати перевірки корекції палива в рядному 6-ти циліндровому дизелі AJ20 D6H. Виявлене, за допомогою реєстратора даних значне підвищення корекції циклової подачі палива в другому циліндрі (5.43 мг/оберт), при подальшій діагностиці дозволило визначити дефект паливної форсунки, який проявлявся у вигляді вібрації під час прискорення автомобіля.

01 PCM Quantity correction for cylinder number one - 061B-1 -1.82mg/rev	02 PCM Quantity correction for cylinder number two - 061B-2 5.43mg/rev
03 PCM Quantity correction for cylinder number three - 061B-3 -1.42mg/rev	04 PCM Quantity correction for cylinder number four - 061B-4 -1.55mg/rev
05 PCM Quantity correction for cylinder number five - 061B-5 -0.88mg/rev	06 PCM Quantity correction for cylinder number six - 061B-6 0.22mg/rev

Рис. 1. Показники корекції циклової подачі палива, зчитані за допомогою реєстратора даних

У випадках, коли немає можливості виконати перевірку паливної системи за допомогою бортової системи самодіагностики або вона не дозволяє точно визначити дефектний компонент, діагностування паливної системи з електронним управлінням, наприклад Common Rail, можливо виконати за допомогою цифрового осцилографа [7]. Щоб комплексно перевірити паливну систему дизеля цифровим осцилографом, потрібно оцінити продуктивність ПНВТ, пересвідчитися в герметичності паливного контуру високого тиску і визначити продуктивність паливних форсунок. Крім того, існує можливість перевірити роботу клапана дозування палива.

Продуктивність ПНВТ перевіряється шляхом виключення клапана дозування палива (для цього від'єднують його живлення). У цьому режимі до паливної рампи надходить максимально можливий об'єм палива, тоді як заданий тиск підтримується виключно за рахунок клапана регулювання тиску. До сигнального контакту датчика тиску та маси клапана регулювання тиску слід підключити два канали цифрового осцилографа. Виконати максимально повний аналіз продуктивності паливної системи високого тиску можна за таких режимів роботи двигуна: запуск, робота на мінімальній частоті холостого ходу, різке прискорення двигуна, робота на максимальній частоті холостого ходу, стрімке зниження частоти обертання колінчастого вала та подальша стабілізація обертів холостого ходу.

Зміна напруги на датчику тиску в паливній рампі (канал А) і зміна сигналу управління клапаном регулювання тиском (канал С) відображені на осцилограмі (рис. 2). Аби спростити аналіз зміни сигналу, було розраховано його робочий цикл і побудовано як окрему криву (канал В). Це зроблено за допомогою вбудованої математичної функції програмного забезпечення PicoScope 6 Automotive цифрового осцилографа PicoScope 4425A.

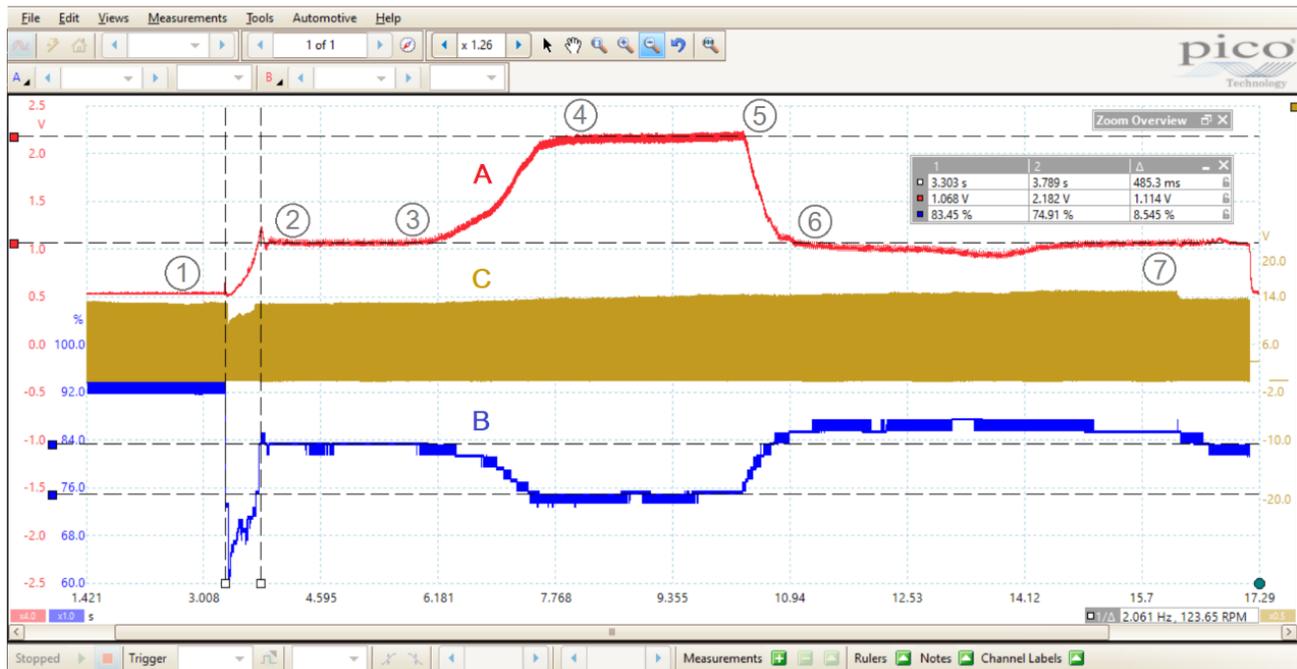


Рис. 2. Осцилограма зміни тиску в паливній рампі та робочий цикл клапана регулювання тиску палива

Швидкість наростання тиску під час запуску двигуна демонструє ділянка 1-2 осцилограми (рис. 2) зміни тиску в паливній рампі. Вал ПНВТ починає обертатись у точці 1, створюючи тиск; у цей момент паливні форсунки не отримують живлення, а клапан регулювання тиску палива переходить в закриті положення. Коли досягається необхідний для запуску двигуна тиск (приблизно 350-400 бар для паливної системи Bosch), у точці 2 модуль управління подає сигнал на паливні форсунки, і двигун запускається. Для сучасних паливних систем максимальне значення швидкості наростання тиску становить до 0,5 с. Якщо швидкість наростання тиску палива більш повільна, це може вказувати на недостатній тиск у паливній магістралі низького тиску, зниження продуктивності ПНВТ в результаті зношення або на порушення герметичності паливної системи високого тиску.

Тиск палива під час роботи двигуна в режимі мінімальної частоти обертання холостого ходу показує ділянка 2-3; напруга на датчику тиску в даному режимі повинна становити близько 1 В. Робочий цикл сигналу клапана регулювання тиску палива, у даному режимі, повинен мати певне фіксоване значення. У випадку порушення герметичності паливної системи модуль управління зменшуватиме робочий цикл (закриватиме клапан) для компенсації зниження тиску. Зробити висновок щодо герметичності паливного контура при відносно невисокому тиску можна, порівнявши робочий цикл сигналу з аналогічним справним двигуном.

Різне зростання частоти обертання колінчастого вала в режимі холостого ходу відбувається на ділянці 3-4. Під час аналізу даної ділянки основну увагу варто звернути на зміну робочого циклу сигналу клапана регулювання тиску палива. Значне зниження робочого циклу свідчить про низьку продуктивність ПНВТ або про втрату тиску в інших елементах паливної апаратури, для компенсації яких модуль управління буде додатково закривати клапан. Допустиме значення для більшості двигунів з паливною системою Bosch знаходиться в діапазоні 8-10%.

На ділянці 4-5 показано тиск палива в режимі максимальної частоти обертання холостого ходу. Як правило, модуль управління обмежує частоту обертання колінчастого вала на позначці 2200-2500 хв-1 при відключеному клапані дозування палива. У такому режимі для паливних систем даного типу напруга на датчику тиску повинна становити близько 2-2,2 В (800-900 бар). Можна зробити висновок про збереження герметичності системи і при більш високому тиску, якщо тиск відповідає заданому діапазону, а робочий цикл клапана регулювання тиску палива не відрізняється від аналогічного показника на справному двигуні.

Висновок про порушення роботи клапана регулювання тиску палива або наявність блокування в зворотній паливній магістралі дозволяє зробити аналіз ділянки 5-6. Тиск у справній системі повинен різко знизитись після того, як важіль акселератора буде відпущеним.

Момент стабілізації тиску після зниження частоти обертання колінчастого вала демонструє остання ділянка осцилограми 6-7. Різких коливань напруги на даній ділянці спостерігатись не повинно. Тиск та сигнал керування клапаном регулювання тиском палива у справній паливній апаратурі повинні стабілізуватись через 4-5 с після зниження частоти обертання колінчастого вала.

Щоб перевірити паливні форсунки високого тиску за допомогою цифрового осцилографа, необхідно підключити один канал осцилографа до лінії живлення форсунки (1), а за допомогою іншого каналу (2) виміряти струм, що споживає форсунка (рис. 3 і рис. 4). Стабільність з'єднання форсунки з масою можливо додатково перевірити, використавши третій канал осцилографа. При вимірюванні напруги необхідно враховувати, що для електромагнітних форсунок робоча напруга може сягати 60 В, а для п'єзоелектричних – до 200 В. Тому слід використовувати обладнання, що здатне працювати з даною напругою.

Осцилограми справної (А) та дефектної (В) електромагнітної паливної форсунки дизеля показано на рис. 3. Атенюатор TA197 10:1 використовувався для запису напруги, тобто через атенюатор на вхідний канал осцилографа надходить напруга, в 10 разів нижча ніж фактична (4.3 В замість 43 В у даному випадку). Це дозволяє безпечно виконувати вимірювання, а програмне забезпечення перераховує та відображає на екрані фактичну напругу 43 В. Безконтактні кліщі для вимірювання струму TA018, що здатні працювати в 2-х діапазонах до 20 А та до 60 А, використовувались для запису сили струму, що споживає паливна форсунка. Силу магнітного поля навколо провідника кліщі вимірюють та інтерпретують у вигляді вихідної напруги. Далі програмне забезпечення осцилографа зчитує напругу та перетворює її в еквівалентне значення сили струму (при виборі діапазону до 20 А - 1 мВ = 10 мА, для діапазону до 60 А - 1 мВ = 100 мА).

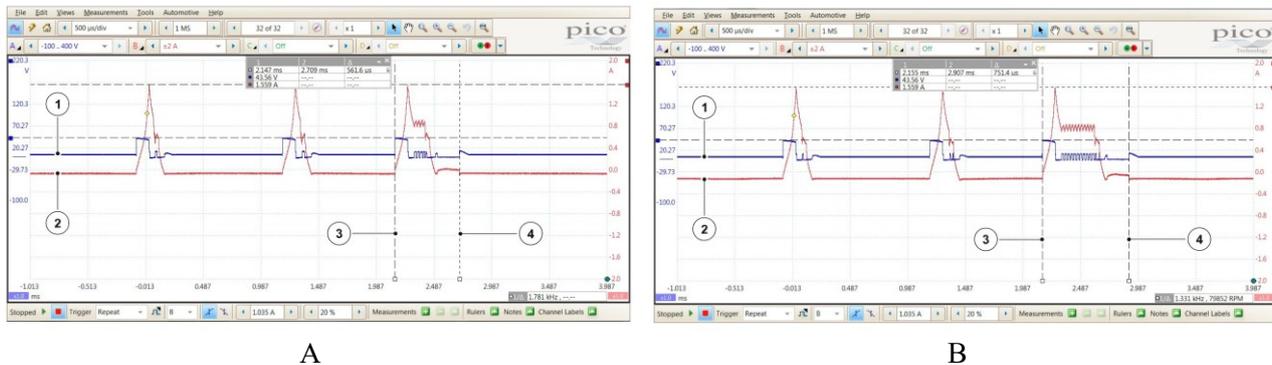


Рис. 3. Порівняння сигналу справної (А) та дефектної (В) електромагнітної паливної форсунки

Визначити, чи працює форсунка коректно або має дефект, дозволяє аналіз напруги, сили струму та часу активації форсунки. Найбільш розповсюджений дефект паливних форсунок пов'язаний з погіршенням розпилення в результаті забруднення отворів. Вимірюючи прискорення колінчастого вала на такті розширення у кожному циліндрі та порівнюючи одержане значення з іншими циліндрами та запрограмованими еталонними значеннями, модуль управління двигуном, в свою чергу, контролює ефективність розпилення та, як наслідок, згоряння палива. У випадку, якщо прискорення колінчастого вала не відповідає очікуваному значенню, модуль управління корегує кількість палива, змінюючи час відкриття форсунки.

Якщо розпилення палива погіршується через забруднення отворів форсунки продуктами згоряння, модуль управління буде збільшувати кількість палива, збільшуючи час роботи форсунки. У певних режимах роботи двигуна дані зміни можуть не спричинити значного зниження потужності та реєстрації

помилку системою самодіагностики, однак вони можуть спричинити зростання витрати палива та погіршення екологічних показників.

Точно визначити час відкриття кожної форсунки в аналогічних умовах можливо, порівнявши сигнали різних форсунок двигуна. Робочий цикл електромагнітної форсунки двигуна AJ20-D при мінімальній частоті обертання колінчастого вала в режимі холостого ходу показано на рис. 3. Основна доза палива подається між лініями 3 і 4, після 2-х попередніх впорскувань палива, що необхідні для зниження жорсткості роботи двигуна. У даному режимі час основного впорскування для справної форсунки (рис. 3А) становить приблизно 561 мікро секунд. Про значне коригування кількості палива і, як наслідок, погіршення розпилення, свідчить зростання часу до 751 мікро секунд у іншій форсунки (рис. 3В).

Для п'єзоелектричних форсунок можливо виконати аналогічну перевірку, однак необхідно враховувати, що п'єзоелектрична форсунка має іншу форму сигналу. Сигнал справної п'єзоелектричної форсунки двигуна AJ21-D показано на рис. 4. Осцилограма показує струм, що споживає форсунка (1), напругу живлення (2) і надійність з'єднання з масою (3). Можна виділити декілька попередніх впорскувань палива і основне (між лініями 4 і 5) аналогічно, як і для електромагнітної форсунки. Продуктивність форсунки буде визначати саме час основного впорскування.

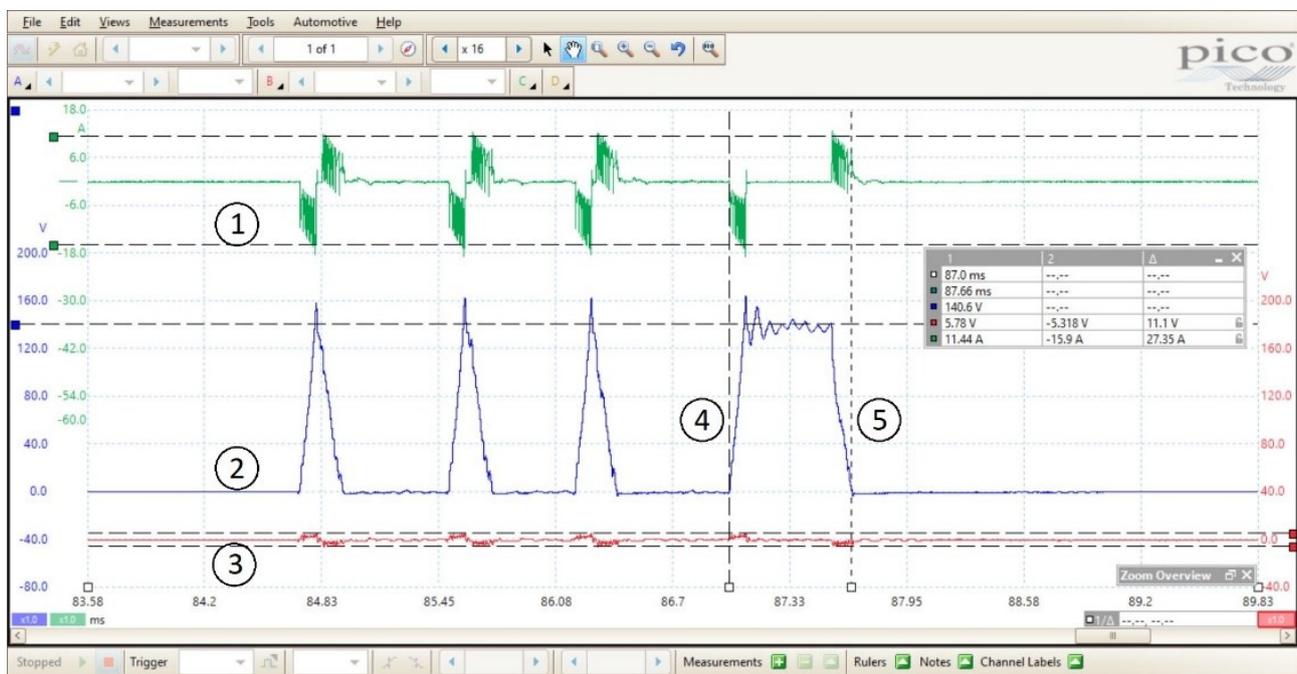


Рис. 4. Сигнал п'єзоелектричної форсунки

Іншим ефективним інструментальним методом перевірки паливних форсунок, вважається - контроль витрати палива через зворотну магістраль [8]. Оскільки, до кожної форсунки Common Rail подається однаковий тиск і, відповідно, однакова кількість палива, якщо в певній форсунці, за один цикл впорскування погіршиться розпилення, більше палива буде повертатись через зворотну магістраль. Таким чином, контролюючи кількість палива, що повернулася з кожної форсунки протягом певного часу, можливо визначити форсунку, яка має недостатню подачу палива в циліндр (наприклад, через забруднення розпилювача). Аналогічно, можливо визначити форсунку з дефектним запірним механізмом, яка матиме надмірну витрату палива.

Як приклад, на рис. 5 показано результати перевірки кількості палива в зворотній магістралі для 4-циліндрового дизеля в режимі холостого ходу. За результатами даного тесту встановлено, що об'єм палива з форсунки №1 - 53 мл, форсунки №2 - 21 мл, форсунки №3 - 21 мл, форсунки №4 - 13 мл. Згідно даних виробника паливної апаратури BOSCH, максимально допустима кількість палива, що повертається з форсунки в зворотну магістраль може бути в 3 рази більше, ніж найменша виміряна кількість палива. Таким чином, оскільки кількість палива з форсунки №4 становить 13 мл, максимальна кількість палива може бути не більше ніж $13 \text{ мл} \times 3 = 39 \text{ мл}$. Форсунка №1 має кількість палива в зворотній магістралі 53 мл і, таким чином, перевищує максимально допустиму. Отже, можливо зробити висновок, що форсунка №1 несправна і її необхідно перевірити на стенді або замінити.



Рис. 5. Перевірка витрати палива через зворотну магістраль паливних форсунок

Перевірка елементів паливної системи високого тиску на стенді вважається найбільш надійним та універсальним методом діагностики. Відповідні діагностичні стенди дозволяють перевіряти як ПНВТ і форсунки з механічним, так і з електронним управлінням [9]. Однак, даний метод діагностики паливної апаратури дизеля є найбільш трудомістким та довготривалим, оскільки потребує демонтажу елементів з двигуна та використання спеціального обладнання.

Методика перевірки паливних форсунок на діагностичному стенді базується на комплексній оцінці електричних параметрів робочого елемента (п'єзоелектричний або електромагнітний) та гідравлічних показників роботи розпилювача. Процес розділений на кілька ключових етапів. На першому етапі перевіряються електричні показники паливної форсунки (eRLC - Extended Resistance (R), Inductance (L), and Capacitance (C)), що дозволяє визначити стан робочого елемента без подачі палива. Наприклад, для п'єзоелектричної форсунки перевіряється опір, який дозволяє визначити стан ізоляції та внутрішніх з'єднань і для справної форсунки має бути в межах 175–200 кОм. Вимірювання ємності дозволяє оцінити деградацію п'єзоелемента, що у справної форсунки знаходиться в діапазоні 1.80–5.60 мкФ.

На другому етапі виконується оцінка динамічних параметрів (RSP - Response Parameter та NOP - Nozzle Open Pressure). Ці параметри визначають швидкість реакції форсунки на електричний сигнал та механічну готовність до роботи. Затримка впорскування (RSP) вимірює час від подачі сигналу до моменту реального виходу палива. Норма становить 100–420 мкс. При перевірці тиску відкриття сопла (NOP) стенд фіксує мінімальний тиск, при якому піднімається голка розпилювача, еталонне значення – 12-19 МПа.

Третій етап передбачає гідравлічні перевірки (IVM – Injection Volume Measurement). Форсунка перевіряється в різних режимах навантаження, що імітують реальну роботу двигуна. На кожному етапі вимірюється об'єм впорскування (Injection dosage) та об'єм зливу в звороту паливну магістраль (Return dosage). Особлива увага приділяється аналізу кількості палива, що повертається в бак через зворотну магістраль. Наприклад, у режимі Leak test норма зливу становить 0–1 мм³/год. Значне перевищення цього показника вказує на внутрішній механічний знос клапана, що призводить до падіння тиску в усій паливній системі.

На рис 6. показано результати перевірки справної (А) та дефектної (В) п'єзоелектричної паливної форсунки Bosch. Як видно, всі параметри справної форсунки знаходяться в межах заданих допусків. Натомість, у дефектної форсунки збільшений час затримки впорскування, підвищений тиск відкриття сопла, значний злив палива у зворотню магістраль та недостатній об'єм подачі палива в режимі середніх навантажень (IVM 4). Виявлені дефекти свідчать про блокування отворів розпилювача та зношений дозувальний клапан.

Аналогічно, процедура перевірки ПНВТ на стенді складається з декількох етапів, що імітують різні режими роботи двигуна [10]. Кількість та послідовність етапів буде залежати від типу і моделі ПНВТ, що перевіряється. Наприклад, для ПНВТ паливної системи Common Rail, процес перевірки складається з наступних етапів: перевірка опору обмотки датчика температури палива (як правило становить 1500 Ом при 20°C) та опору дозувального клапана, який має бути в межах 2.5–4.5 Ом.

Piezoelectric Bosch fuel injector no. 0445116024					Piezoelectric Bosch fuel injector no. 0445116024				
eRLC	Resistance [175–200 kΩ]		Capacitance [1.80–5.60 μF]		eRLC	Resistance [175–200 kΩ]		Capacitance [1.80–5.60 μF]	
	182		2.30			186		2.98	
RSP	Injection delay [100–420 μs]				RSP	Injection delay [100–420 μs]			
	208					387			
NOP	Nozzle open pressure [12–19 MPa]				NOP	Nozzle open pressure [12–19 MPa]			
	14					23			
Test	Injection dosage		Return dosage		Test	Injection dosage		Return dosage	
Leak test [mm ³ /H] 160 MPa, 85 s	0		0–1	0.33	Leak test [mm ³ /H] 160 MPa, 85 s	0		0–1	12.54
IVM 1 [mm ³ /H] 180 MPa, 800 μs	36.10–44.25	39.17	2–18	9.18	IVM 1 [mm ³ /H] 180 MPa, 800 μs	36.10–44.25	42.64	2–18	34.75
IVM 2 [mm ³ /H] 80 MPa, 190 μs	0.24–2.16	1.22			IVM 2 [mm ³ /H] 80 MPa, 190 μs	0.24–2.16	0.34		
IVM 3 [mm ³ /H] 30 MPa, 535 μs	1.68–5.20	4.27			IVM 3 [mm ³ /H] 30 MPa, 535 μs	1.68–5.20	1.84		
IVM 4 [mm ³ /H] 80 MPa, 490 μs	12.24–18.00	16.31			IVM 4 [mm ³ /H] 80 MPa, 490 μs	12.24–18.00	9.34		

A

B

Рис. 6. Результати перевірки справної (А) та дефектної (В) п'єзоелектричної паливної форсунки на стенді

Далі виконується перевірка на пускових обертах: стенд встановлює частоту обертання 200 хв⁻¹ та тиск 250 бар для перевірки здатності насоса забезпечити пуск двигуна. Наступний етап передбачає перевірку в режимі холостого ходу при частоті обертання вала 400 хв⁻¹ та тиску 300 бар та випробування під повним навантаженням при 2000 хв⁻¹ в та тиску 1400 бар (або максимальному для конкретної моделі) для оцінки максимальної продуктивності. На завершальному етапі виконується перевірка клапана регулювання тиску, під час якої оцінюється стабільність утримання тиску при зміні струму на дозуючому клапані.

Висновки

На основі проведеного аналізу методів діагностування паливної апаратури високого тиску дизелів встановлено, що сучасні паливні системи з електронним управлінням вимагають принципово нових підходів до діагностування через складну будову та низькі допустимі відхилення робочих показників. Важливий етап процесу діагностування полягає у виявленні зовнішніх ознак неполадки, що дозволяє в подальшому сформулювати оптимальну стратегію діагностики та вибрати правильні методи локалізації дефектного компонента. Систематизація методів діагностування дозволяє поєднати використання бортової самодіагностики OBD, електричних вимірювань з використанням осцилографа та індивідуальної перевірки елементів паливної системи високого тиску на стенді. Практичне значення роботи полягає у розробці структурованого підходу, що дозволяє визначити гідравлічні або електричні неполадки без зайвого демонтажу компонентів. Впровадження запропонованого підходу забезпечує швидке прийняття рішення про доцільність ремонту, що мінімізує витрати на експлуатацію паливної системи високого тиску автомобілів з дизелем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *Bosch automotive handbook*, 11th edition. Germany: Robert Bosch GmbH, 2022, 2044 pp.
- [2] R. Payri, F. J. Salvador, J. Gimeno, and T. Montiel, "Aging of a Multi-Hole Diesel Injector and Its Effect on the Rate of Injection", *SAE Technical Paper*, no. 2020-01-0829, pp. 1-11. 2020.
- [3] T. Osipowicz, and M. Lisowski, "The influence of corrosion phenomena on operational parameters of modern fuel injectors CI-engines", *Combustion Engines*, no. 171(4), pp. 17-23. 2017.
- [4] K. Reif, *Diesel Engine Management. Systems and Components*, 5th edition. Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, 370 pp.
- [5] T. Denton, *Advanced automotive fault diagnosis*, 5th edition. London: Routledge, 2021, 396 pp.
- [6] G. Wright. *Fundamentals of medium-heavy duty diesel engines*. Burlington, Massachusetts: Jones and Bartlett Learning, 2015, 1394 pp.
- [7] А. О. Корпач, та О. О. Левківський, «Використання цифрового осцилографа для перевірки технічного стану паливної апаратури дизеля» на *Всеукраїнській науково-практичній конференції «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури*, Київ: ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2023, с. 255-258.
- [8] А. О. Корпач, О. О. Левківський, та О. А. Корпач, «Методи діагностування паливної апаратури автомобільних дизелів» на *XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*, Вінниця: ВНТУ, 2025, с. 240–243.

[9] T. Osipowicz, K. F. Abramek, and T. Stoeck, "Testing of modern common rail fuel injectors", *Combustion Engines*, no. 162(3), pp. 688-694. 2015.

[10] Ž. M. Bulatović, D. M. Knežević, S. Lj. Biočanin, and M. S. Timotijević, "Testing high-pressure pumps on the BOSCH test bench", *Engineering Today*, no. 1, pp. 1-13. 2024.

Корпач Анатолій Олександрович – канд. техн. наук, професор, професор кафедри двигунів і теплотехніки, <https://orcid.org/0000-0002-7070-7883>, e-mail: akorpach@ukr.net

Корпач Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автомобілів, <https://orcid.org/0000-0002-2496-4395>, e-mail: o.korpach@ntu.edu.ua

Національний транспортний університет, м. Київ

Левківський Олександр Олександрович – канд. техн. наук, інструктор з технічного навчання, <https://orcid.org/0000-0002-2951-2312>, e-mail: oleksandr.levkivskyi@gmail.com

Товариство з обмеженою відповідальністю «Віннер Імпорте Україна, ЛТД», м. Київ

A. Korpach¹
O. Levkivskyi²
O. Korpach¹

Advanced diagnostics of high-pressure diesel injection systems

¹National Transport University
²LLC "Winner Imports Ukraine, LTD"

The article examines modern diagnostic methods for diesel high-pressure fuel systems, specifically the Common Rail accumulator-type system. Particular attention is paid to the systematization of approaches for detecting faults in precision components, such as electromagnetic or piezoelectric injectors and high-pressure fuel pumps (HPFP), which allows for increased accuracy in defect localization.

The object of the investigation - The methods and tools for technical diagnostics of fuel injection equipment in modern diesel engines.

A comprehensive diagnostic process is considered, including visual assessment, exhaust gas color analysis, the use of on-board diagnostics (OBD), and instrumental testing using a digital oscilloscope. It has been established that the integration of digital technologies allows for real-time monitoring of fuel delivery correction parameters via data loggers or oscilloscopes, which simplifies the detection of cylinder imbalance.

A methodology for non-intrusive testing of HPFP performance and system tightness using fuel rail pressure waveforms is described. An algorithm for assessing the condition of electromagnetic and piezoelectric injectors is defined through the analysis of voltage signals, current strength, and activation time, as well as fuel return flow control.

The stages of testing fuel equipment on diagnostic benches, based on measuring electrical parameters, dynamic characteristics, and hydraulic indicators under various load modes, are covered in detail. It is proven that this approach provides the most reliable results when making decisions regarding the repair or replacement of units.

The results highlighted in the article can be used to develop structured maintenance algorithms that minimize operation and repair costs for modern diesel engines.

Key words: diesel, high-pressure fuel system, common rail, diagnostics, fuel injector, HPFP, OBD, oscilloscope.

Korpach Anatolii – Cand. Sc. (Eng.), Professor, Professor Department of Engines and Heating Engineering, <https://orcid.org/0000-0002-7070-7883>, e-mail: akorpach@ukr.net

Levkivskyi Oleksandr – Cand. Sc. (Eng.), Technical Trainer, <https://orcid.org/0000-0002-2951-2312>, e-mail: oleksandr.levkivskyi@gmail.com

Korpach Oleksii – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor Department of Automobiles, <https://orcid.org/0000-0002-2496-4395>, e-mail: o.korpach@ntu.edu.ua