

Секція 1. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 621.43.064

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ ШЛЯХОМ АДАПТИВНОГО ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА

Макаренко Микола Григорович, доцент каф. «Трактори і автомобілі»,
Державний біотехнологічний університет,
e-mail: mak_nk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4078-9045

Манойло Володимир Максимович, докт. техн. наук, професор кафедра ДВЗ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: volodimir.m.manoylo@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2208-4404

Шевченко Ігор Олександрович, канд. техн. наук, доцент, завідувач каф.
«Трактори і автомобілі», Державний біотехнологічний університет,
e-mail: igorshvchnk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1280-5290

Дизельні двигуни є основою сучасного вантажного транспорту завдяки їхній високій паливній ефективності, довговічності та здатності працювати у важких умовах експлуатації. Однак, зростаючі екологічні обмеження та підвищені вимоги до економічності змушують автовиробників і дослідників шукати нові рішення для вдосконалення процесів горіння, зменшення споживання пального та зниження рівня шкідливих викидів. Одним із найбільш перспективних підходів є адаптивне впорскування палива, що дозволяє оптимізувати подачу пального залежно від режиму роботи двигуна та зовнішніх факторів.

Адаптивне впорскування палива базується на змінному регулюванні ключових параметрів процесу подачі пального, таких як кількість впорскуваного пального, тиск упорскування, фази упорскування, температура камери згоряння та рівень навантаження. Цей підхід дозволяє підвищити термічну ефективність двигуна, мінімізувати енергетичні втрати та покращити загальні експлуатаційні характеристики вантажних автомобілів.

Адаптивне впорскування палива реалізується завдяки інтеграції високоточних електронних систем керування, датчиків та програмного забезпечення, що забезпечують точне регулювання параметрів паливоподачі. Система аналізує миттєві дані про робочий стан двигуна та автоматично налаштовує режими впорскування відповідно до навантаження, температури, частоти обертання та інших факторів.

Основними принципами адаптивного впорскування є: мультифазне впорскування, що забезпечує багатоступеневий процес подачі пального для оптимізації горіння та зниження шкідливих викидів [1–3]; динамічне регулювання тиску впорскування, що дозволяє підвищити якість сумішоутворення та ефективність горіння [4]; інтелектуальне керування впорскуванням, що використовує штучний інтелект для аналізу параметрів роботи двигуна в реальному часі [5].

В сучасних дизельних двигунах з метою оптимізації процесу впорскування використовується система Common Rail, що дозволяє точно керувати тиском пального та моментами впорскування незалежно від режиму роботи двигуна. Головними характеристиками цієї технології є: тиск впорскування (1800–3000 бар залежно від навантаження та типу двигуна); час відкриття форсунки (200–500 мкс, що дає можливість багатоступеневого упорскування); кількість фаз упорскування (3–7 фаз за один такт - попереднє, основне та поствпорскування); розмір отворів розпилювачів форсунок (0,08–0,15 мм, що забезпечує точне дозування пального та рівномірність розпилення).

Високий тиск упорскування дозволяє досягти кращого розпилення пального, сприяючи утворенню більш гомогенної суміші та підвищенню коефіцієнта корисної дії двигуна. Типовими параметрами є: низьке навантаження (500–1200 бар); середнє навантаження (200–2000 бар); максимальне навантаження (2500–3000 бар).

Штучний інтелект у поєднанні з системами аналізу забезпечує регулювання параметрів упорскування в режимі реального часу, аналізуючи комплексні дані про роботу двигуна. Використовуючи методи глибокого навчання та адаптивні алгоритми оптимізації, система може визначати найефективніші режими подачі пального, враховуючи такі параметри, як температура навколишнього середовища, атмосферний тиск, вологість повітря, склад вихлопних газів та рівень навантаження.

Для досягнення високої точності регулювання застосовуються нейромережеві моделі, що проходять навчання на великих наборах даних, отриманих у різних експлуатаційних умовах. Це дозволяє системі прогнозувати зміни робочих характеристик двигуна та оперативно коригувати параметри впорскування, зокрема тиск (у діапазоні 500–3000 бар), тривалість кожної фази подачі пального (200–500 мкс), а також оптимізувати співвідношення повітря-паливо для різних режимів експлуатації.

Додатково, інтелектуальні системи керування можуть взаємодіяти з іншими електронними модулями двигуна автомобіля, такими як система рециркуляції вихлопних газів (EGR) та турбонаддув, для комплексного підвищення енергоефективності та зниження рівня шкідливих викидів. Завдяки цим технологіям досягається адаптація двигуна до різних кліматичних зон,

варіативності дорожніх умов та типу вантажу, що значно підвищує його продуктивність та економічність.

Адаптивне керування процесом згоряння дозволяє досягти зменшення витрати пального на 8–15% завдяки оптимізації параметрів упорскування та використанню інтелектуальних алгоритмів регулювання подачі пального. Зокрема, система змінює тиск впорскування залежно від навантаження, що дозволяє мінімізувати непродуктивні витрати енергії. Також регулюється час і кількість фаз впорскування (від 3 до 7 фаз на один такт), що покращує згоряння пального та знижує втрати енергії через неповне згоряння.

Дослідження показують, що при низьких навантаженнях зменшення витрати пального може досягати 12–15%, а при високих навантаженнях – 8–10%. Окрім того, впровадження адаптивного керування тиском (від 500 бар у режимі холостого ходу до 3000 бар у режимі максимального навантаження) дозволяє значно підвищити ефективність паливного процесу, що позитивно позначається на економічних показниках вантажного транспорту [8].

Одним із основних завдань адаптивного впорскування палива є також зниження рівня шкідливих викидів, зокрема оксидів азоту (NO_x), твердих частинок (PM) та вуглекислого газу (CO₂). Це досягається завдяки точному контролю процесу горіння та впровадженню передових методів регулювання параметрів упорскування.

Так мультифазне впорскування дозволяє здійснювати впорскування палива в кілька етапів (від 3 до 7 фаз за один такт). Початкові етапи сприяють утворенню рівномірної паливно-повітряної суміші, що зменшує концентрацію зон із високими температурами, а отже, знижує рівень утворення NO_x.

Оптимізація тиску впорскування залежно від режиму роботи двигуна, (тиск змінюється в межах 500–3000 бар), забезпечується покращене диспергування палива і мінімум утворення частково згорілих залишків, які можуть утворювати PM.

Динамічна зміна моменту впорскування дозволяє уникнути передчасного займання палива та запобігає неефективному згорянню при високих температурах, що є основною причиною утворення оксидів азоту.

Поєднання адаптивного впорскування з системою рециркуляції вихлопних газів (EGR) дозволяє знизити пікові температури в камері згоряння, що ефективно зменшує утворення NO_x.

Подача додаткової порції пального після основного впорскування сприяє допалюванню незгорілих залишків та зменшенню концентрації сажових частинок. Крім того впорскування розчину сечовини в потік вихлопних газів при використанні системи AdBlue (SCR – Selective Catalytic Reduction) у поєднанні з адаптивним впорскуванням дозволяє додатково знижувати рівень NO_x, перетворюючи його в нешкідливий азот і воду.

Результатами впровадження вказаних технологій є: зниження NOx на 30–50% завдяки кращому контролю температури горіння та використанню системи SCR; зменшення викидів твердих частинок (PM) на 40–60% за рахунок оптимізації процесу згоряння та використання поствпорскування; скорочення викидів CO₂ на 10–15% завдяки підвищенню ефективності згоряння та зниженню непродуктивних витрат енергії. Це дозволяє відповідати найсуворішим екологічним стандартам [8].

Завдяки рівномірному розподілу навантаження на поршневу групу та клапанний механізм, а також зниженню пікових температур згоряння, ресурс двигуна може збільшуватися на 15–25%, що значно зменшує витрати на ремонт та обслуговування [9].

Оптимізоване впорскування дозволяє зменшити рівень механічного та термічного навантаження на поршні, кільця та клапани, що запобігає передчасному зношуванню цих деталей.

Основними параметрами при застосуванні адаптивного впорскування, які впливають на довговічність двигуна є: точне дозування пального (3–7 фаз впорскування за один такт), що забезпечує рівномірне поширення теплового навантаження; контрольоване зростання температури в камері згоряння, що мінімізує ризик стрімкого наростання тиску та локальних перегрівів; регульований тиск впорскування, що змінюється у діапазоні від 500 до 3000 бар і дозволяє уникнути надмірного навантаження на форсунки та паливні магістралі; система самонавчання керування двигуном, що аналізує історію експлуатації та прогнозує майбутнє навантаження, оптимізуючи режими упорскування для продовження ресурсу агрегатів.

Таким чином, адаптивне впорскування не лише покращує ефективність двигуна, але й сприяє зниженню ризику передчасного виходу з ладу важливих компонентів, що є вагомим фактором для зменшення витрат на експлуатацію вантажного транспорту.

Однак, незважаючи на численні переваги, існують проблеми, що потребують подальших досліджень. Це, перш за все, висока вартість електронних систем керування та паливних форсунок, складність інтеграції адаптивного впорскування у застарілі конструкції двигунів та необхідність регулярного калібрування системи для підтримання високої точності впорскування.

Подальші дослідження спрямовані на розробку більш ефективних алгоритмів керування, удосконалення матеріалів для форсунок та інтеграцію з альтернативними видами пального (біодизель, синтетичне паливо).

Висновки

Адаптивне впорскування палива є інноваційним напрямком розвитку дизельних двигунів, що дозволяє значно підвищити їхню енергоефективність,

знизити рівень шкідливих викидів та збільшити довговічність. Подальший розвиток цієї технології зробить вантажний транспорт ще більш ефективним, економічним та екологічно безпечним.

Література

1. Оптимізація систем керування двигунами вантажних автомобілів. / Макаренко М.Г., Шевченко І.О., Кривоніс С.В. // Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії». 11–12 березня 2024 року. – Харків : ХНАДУ, 2024.С. 271 – 274.
2. Електронні системи керування та діагностики сучасних автомобілів: проблеми і рішення. / Макаренко М.Г., Шевченко І.О., Хейло В.О., Пиріжок В.І. // Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії». 11–12 березня 2024 року. – Харків : ХНАДУ, 2024. С. 274 – 278.
3. Bosch, R. Diesel Engine Management. Springer, 2021.
4. Heywood, J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, 2018.
5. Zhao, F. Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development. Woodhead Publishing, 2015.
6. Piezoelectric Injector Systems. SAE Technical Paper 2019-01-1210.
7. Common Rail Fuel Injection System. Automotive Engineering Journal, 2020.
8. AI-Based Optimization of Fuel Injection. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021.
9. Fuel Economy Benefits of Adaptive Fuel Injection. Journal of Engine Research, 2022.

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS WITH HIGH RELIABILITY AND EFFICIENCY OF OPERATION ON RAILWAYS

Nerubatskyi Volodymyr, Candidate of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, e-mail: NVP9@i.ua, ORCID: 0000-0002-4309-601X

Hordiienko Denys, Senior engineer, Private JSC “ELAKS”, e-mail: D.Hordiienko@i.ua, ORCID: 0000-0002-0347-5656

Ohurtsov Serhii, Master of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, e-mail: ogurcov2024@kart.edu.ua

Rail transport has been and remains the leading link in the integrated transport system of Ukraine. In the long term, rail transport will remain the most cost-effective way to transport significant volumes of stable flows of bulk cargo delivered over