

sustainable manufacturing technologies is considered a key prerequisite for ensuring the long-term resilience of the industry by combining economic efficiency with social responsibility and environmental safety. As part of the research, a roadmap for adapting modern design and manufacturing principles of cast internal combustion engine (ICE) components within the framework of Industry 4.0 technologies was developed. A comparative analysis of existing PLM systems was carried out, covering a wide range of functional capabilities, each with its own strengths and limitations.

Based on a thorough evaluation, the 3DEXPERIENCE platform was reasonably selected due to its support for the full product lifecycle, including the integration of digital design, simulation, and production management tools. Particular attention is paid to the platform's functionality in enabling decentralized collaboration through cloud infrastructure and centralized data management. Within the digital twin concept, a virtual environment for the cast cylinder component of a two-stroke engine was created, ensuring continuous synchronization between the digital model and real-world manufacturing processes. Further steps for the modernization of the integrated digital model within the PLM system are discussed, including process simulation, stress-strain analysis, and the implementation of innovative materials with predefined physical and mechanical properties. The conclusions highlight the prospects for the development of next-generation, high-level autonomous digital twins that combine artificial intelligence, embedded sensor systems, and big data analytics—enabling significantly greater flexibility, adaptability, and sustainable efficiency in manufacturing systems within the context of Industry 4.0 and its evolution toward Industry 5.0.

Keywords: Industry 4.0 technologies; cast ICE components; two-stroke engine cylinder; design; PLM system; digital twin.

УДК 621.43.031

DOI: 10.20998/0419-8719.2025.2.04

І. Г. Пожидаєв, О. Ю. Лінков

КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА СИСТЕМОЮ АКУМУЛЯТОРНОГО ТИПУ З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ НА ПРИВІД НАСОСА

Відповідність сучасним екологічним стандартам та вимогам до паливної економичності є основними завданнями, що стоять перед виробниками дизельних двигунів. Для вирішення цих завдань вживаються заходи з інтенсифікації подачі палива та гнучкого управління її параметрів. Значною мірою виконання цих заходів забезпечують сучасні паливні системи (ПС) акумуляторного типу (системи Common Rail (CR)). Проте в такій ПС частина палива, що нагнітається паливним насосом високого тиску (ПНВТ) до акумулятора, є надмірною і скидається клапаном регулювання тиску до паливного бака. Відповідно частина механічної енергії, яку затрачено на привід ПНВТ, втрачається, що негативно позначається на ефективних та екологічних показниках двигуна. Особливо суттєвою є доля втрат на привід ПНВТ у малолітражних двигунах, що зумовлює необхідність вживати заходи щодо їх зменшення.

У статті наведено результати літературного огляду щодо рівня механічних втрат на привід паливного насоса високого тиску дизельного двигуна, способів регулювання ефективності ПНВТ на відповідних режимах роботи двигуна, а також обґрунтування необхідності керування подачею паливного насоса високого тиску, що входить до складу паливної системи акумуляторного типу, з метою зменшення механічних втрат на привід ПНВТ.

На основі проведеного аналізу зроблено висновок, що для зменшення втрат потужності на привід ПНВТ, а значить - підвищення механічного та ефективного ККД дизельного двигуна з акумуляторною паливною апаратурою, до складу останньої необхідно вводити пристрій, що забезпечує змінення подачі незалежно від частоти обертання вала насоса і тиску у акумуляторі. Подальший напрям роботи пов'язаний з розробленням концепції конструкції ПНВТ, що дозволить зменшити механічні втрати дизеля на привід паливного насоса шляхом керування його подачею, а також розробкою математичних моделей, необхідних для опису та дослідження процесів у паливній системі двигуна.

Ключові слова: паливний насос високого тиску; акумуляторна паливна система; механічні втрати; дизельний двигун.

Вступ

Поступове впровадження більш жорстких екологічних стандартів з метою зменшення шкідливого впливу двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) на навколишнє середовище зумовлює необхідність шукати рішення, спрямовані на забезпечення відповідності двигунів сучасним екологічним стандартам із збереженням мінімального рівня витрат палива. Для вирішення цих завдань вживаються заходи з оптимізації процесів сумішоутворення та згоряння палива,

на які значною мірою впливає процес подачі палива. Відповідно, для покращення екологічних показників дизельного двигуна необхідно вдосконалювати паливну апаратуру з метою інтенсифікації подачі палива та гнучкого управління її параметрами. Накопичений досвід демонструє (рис. 1), що відповідність екологічним стандартам досягається в тому числі за рахунок збільшення тиску впорскування палива.

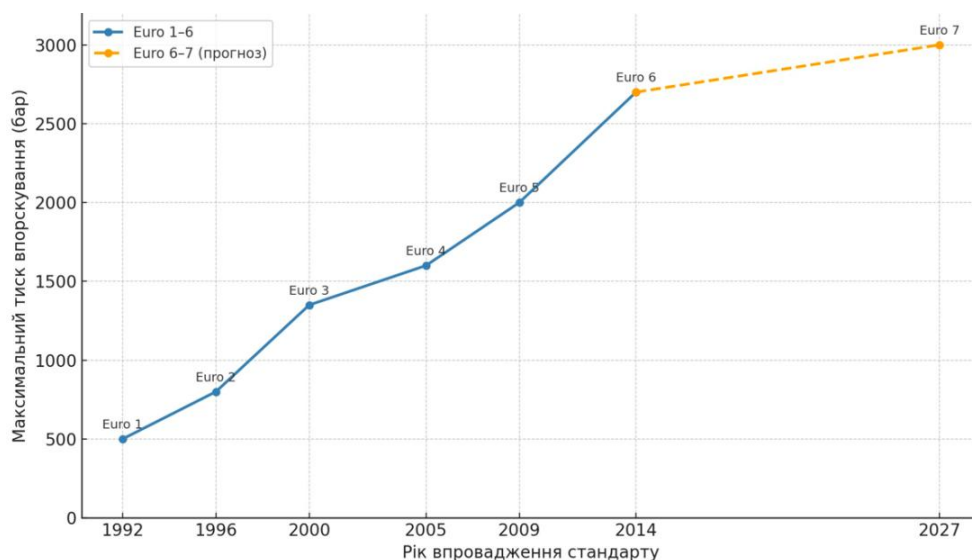


Рис. 1. Зростання максимального тиску впорскування палива дизельних двигунів із впровадженням стандартів Euro

Значною мірою виконання цих вимог забезпечують паливні акумуляторні системи типу Common Rail з електронним керуванням. Проте в такій ПС частина палива, що нагнітається ПНВТ до акумулятора, є надмірною і скидається клапаном регулювання тиску до паливного бака. Відповідно частина механічної енергії, яку затрачено на привід ПНВТ, втрачається, що негативно позначається на ефективних та екологічних показниках двигуна. Враховуючи що ці втрати складають суттєвий вплив на механічні втрати двигуна і збільшуються втрати на привід ПНВТ у малолітражних двигунах, це зумовлює необхідність вживати заходи щодо їх зменшення і вказує на актуальність вирішення даного питання.

Основна частина

Фірми-виробники паливної апаратури зазвичай надають мінімум інформації щодо власної продукції. За загально відомими даними досліджень втрати на привід ПНВТ в дизельних двигунах можуть досягати 7% від загальної кількості механічних втрат двигуна.

До того ж лише 20% палива, яке стиснуто до високого тиску, подається до циліндрів двигуна, а решта 80% витрачається на керування подачею. За даними фірми R. Bosch при $P_{ак} = 135$ МПа і $n_{кул} \sim 3000$ $мин^{-1}$ витрати на привід складають 3,8 кВт для чотирициліндрового двигуна OM 611 з ефективною потужністю 90 кВт, тобто 4,2 % від ефективної потужності двигуна. Необхідно зазначити, що для цього ж двигуна із системою безпосе-

редньої дії (ПНВТ BOSCH типу VE) витрати потужності на привід склали 2,5 кВт, тобто 2,7 % загальної потужності двигуна [1].

Для зниження механічних втрат на привід паливного насоса дизеля з паливною апаратурою акумуляторного типу виробниками впроваджено ряд технічних рішень. Наприклад, у радіально-плунжерних ПНВТ (CP1) фірми BOSCH [2] реалізовано відключення однієї секції (рис. 2).

Відключення однієї секції електромагнітним приводом (5) призводить до зменшення кількості палива, що подається до акумулятора, та забезпечує фіксацію впускного клапана (4) у відкритому положенні. Як наслідок паливо, що подається до над плунжерної порожнини, не може бути стиснено під час нагнітання та витікає до каналу низького тиску. У такий спосіб регулюється продуктивність ПНВТ на режимах з меншими витратами енергії. Проте суттєвим недоліком зазначеного методу є неможливість "гнучкого" керування подачею.

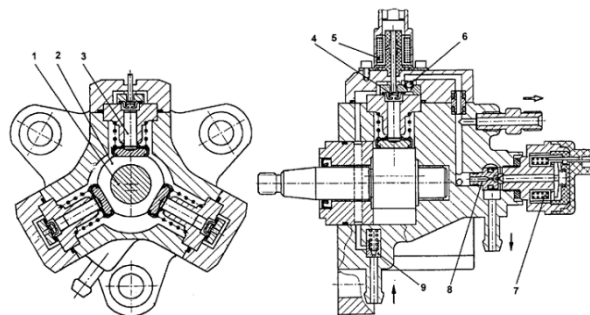


Рис. 1. Радіально-плунжерний ПНВТ (CP1) акумуляторної паливної системи Common Rail виробництва фірми R. Bosch

Регулювання продуктивності ПНВТ у більш сучасних акумуляторних паливних системах забезпечується дроселюванням палива на вході до секції високого тиску [3]. З цієї метою паливний насос оснащують дозувальним блоком (рис. 2), що містить електромагнітний клапан. Зміною положення плунжера електромагнітного клапана регулюється площа прохідного перерізу дроселюючого отвору. Керування клапаном виконується за допомогою електричного сигналу з широтно-імпульсною модуляцією.

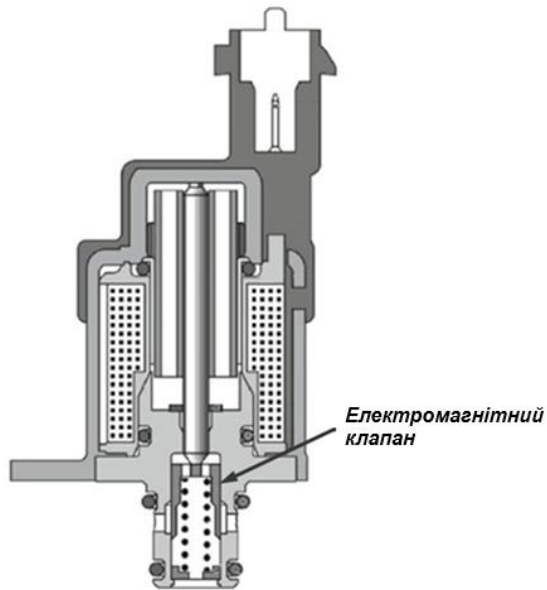


Рис. 2. Конструкція дозувального блоку ПНВТ акумуляторної паливної системи Common Rail

Схему керування об'ємною подачею ПНВТ, до складу якої входить впускний автоматичний клапан та керований дроселюючий клапан, наведено у статті [4]. Зазначено, що впровадження цих елементів для керування процесом наповнення надплунжерної порожнини, а відповідно і продуктивністю насоса, забезпечить зменшення потужності, що витрачається на привід ПНВТ.

Дослідження, які наведено в статті [5], показали, що збільшення потужності на привід ПНВТ із підвищенням тиску впорскування на 20 МПа складає 100-120 Вт, або 2-3 % ефективної потужності двигуна. Це необхідно враховувати у разі, якщо для вдосконалення екологічних показників дизеля впроваджуються заходи з підвищення максимального тиску впорскування. Також зазначено, що для виключення надлишкових витрат потужності на привід ПНВТ необхідно вводити регулювання його подачі за активним геометричним ходом плунжера, або за частотою обертання приводного валу, або за кількістю робочих нагнітальних секцій.

Висновки

З урахуванням перспективи впровадження більш жорстких екологічних стандартів Euro заходи з інтенсифікації паливоподачі окрім покращення екологічних показників дизельних двигунів можуть негативно вплинути на механічний ККД дизеля за рахунок збільшення механічних втрат на привід ПНВТ.

Для зменшення втрат потужності на привід паливного насоса дизеля з акумуляторною паливною апаратурою до її складу необхідно вводити пристрій, що забезпечує змінення подачі незалежно від частоти обертання вала насоса і тиску в акумуляторі.

Подальший напрямок роботи пов'язаний з розробленням концепції конструкції ПНВТ, що дозволить зменшити механічні втрати дизеля на привід паливного насоса шляхом керування його подачею, а також розробкою математичних моделей, необхідних для опису та дослідження процесів у паливній системі дизеля.

Список литературы:

1. Diesel-engine Management. Robert Bosch GmbH, 2004 – 3rd edition. ISBN 0-8376-1051-6.
2. Diesel-Speichereinspritzsystem Common Rail. Technische Unterrichtung. -Elektronische Motorsteuerung für Dieselmotoren, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 1998.-50 s.
3. Mollenhauer K. Handbook of diesel engines / Klaus Mollenhauer, Helmut Tschoeke. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 636 p.
4. Прохоренко А. А. Основы подхода к разработке конструкции и принципа управления ТНВД акумуляторной топливной системы дизеля / А. А. Прохоренко, А.Н. Врублевский, А.В. Грицюк, Г.А. Щербак // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – № 1. – С. 12 – 17.
5. Врублевский О.М. Энергетичні затрати на привід ПНВТ дизеля з акумуляторною паливною системою / О.М. Врублевський, А.О. Прохоренко, І.Г. Пожидаєв, Д.В. Мешков, А.І. Тимченко // Автомобільний транспорт, 2012. – № 30. – С. 90-95.
6. Врублевский А.Н. Научные основы создания аккумуляторной топливной системы для быстроходного дизеля: моногр. / А.Н.Врублевский. – Харьков: ХНАДУ, 2010. – 216 с.
7. Leonard R. 2000 bar Diesel Common Rail by Bosch for Passengers Cars / R. Leonard, J. Wargha // MTZ. – 2008. – № 10. – P. 26-31.
8. Jorach R. The upcoming generation of common rail injection systems for large bore engines from L'ORANGE GMBH. Design, Application, Performance and Emissions Of Modern Internal Combustion Engine Systems and Components / R. Jorach, H. Ressel, W. Scheibe, R. Prillwitz, L. Bakaj // ICE. – ASME. – 2002. – Vol. 39. – P. 17-27.

Bibliography (transliterated):

1. Bosch GmbH, R., (2004), Diesel-engine management. 3rd ed. Stuttgart: Robert Bosch GmbH. ISBN 0-8376-1051-6.
2. Bosch GmbH, R., (1998), Diesel-Speichereinspritzsystem Common Rail: Technische Unterrichtung – Elektronische Motorsteuerung für Dieselmotoren. Stuttgart: Robert Bosch GmbH.
3. Mollenhauer, K., Tschoeke, H. (2010), Handbook of diesel engines, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin,

636 p. 4. Prokhorenko, A.A., Vrublevskiy, A.N., Grytsyuk, A.V., Shcherbakov, G.A. (2010), "Fundamentals of the Approach to the Design and Control Principle of the High-Pressure Fuel Pump in a Diesel Common Rail Fuel System" ["Osnovi podkhoda k razrabotke konstruktsii i printsipa upravleniya TNVD akkumulyatornoi toplivnoi sistemi dizelya", *Dvyhately vnutrenneho shoranyia*], No 1, pp. 12-17. 5. Vrublevskiy, O.M., Prokhorenko, A.O., Pozhydaev, I.H., Meshkov, D.V., Tymchenko A.I. (2012), "Power expenses on HPFP drive of diesel engine with battery-driven fuel system", *Automobile transport* ["Enerhetychni zatraty na pryvid PNVТ dyzelia z akumuliatornoіu palyvnoіu systemoіu", *Avtomobilnyi transport*], No 30,

pp. 90-95. 6. Vrublevskiy, A.N. (2010), "Scientific Foundations for the Design of Common Rail Fuel Systems for High-Speed Diesel Engines" ["Nauchnye osnovy sozdaniya akkumulyatornoj toplivnoj sistemy dlya bystrokhodnogo dizelya"], *Kharkov KHNADU*, 216 p. 7. Leonard, R., Warga, J. (2008), *2000 bar diesel Common Rail by Bosch for passenger cars*. MTZ, No 10, pp. 26–31. 8. Jorach, R., Ressel, H., Scheibe, W., Prillwitz, R., Bakaj, L., (2002), *The upcoming generation of common rail injection systems for large bore engines from L'ORANGE GMBH. In: Design, Application, Performance and Emissions of Modern Internal Combustion Engine Systems and Components*. ICE – ASME, No 39, pp.17–27.

Надійшла до редакції 30.06.2025 р.

Пожидаєв Іван Геннадійович – аспірант кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Ivan.Pozhydaev@iee.khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0533-9199>.

Ліньков Олег Юрійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Oleh.Linkov@khpi.edu.ua, orcid.org/0000-0002-2780-2412.

FUEL SUPPLY CONTROL BY A BATTERY-TYPE SYSTEM TO REDUCE PUMP DRIVE LOSSES

I.H. Pozhydaev, O. Y. Linkov

Compliance with modern environmental standards and fuel efficiency requirements is a key challenge facing diesel engine manufacturers.

To meet these challenges, measures are being taken to intensify fuel supply and enable flexible control of its parameters. To a large extent, these requirements are fulfilled by modern accumulator-type fuel systems (Common Rail (CR) systems). However, in such systems, a portion of the fuel delivered by the high-pressure fuel pump (HPFP) to the rail is excessive and is discharged back to the fuel tank through a pressure control valve. Consequently, part of the mechanical energy consumed to drive the HPFP is lost, which negatively affects the engine's efficiency and environmental performance. These power losses are especially significant in small-displacement engines, which necessitates measures to reduce them.

This article presents the results of a literature review on the level of mechanical losses in the drive of high-pressure fuel pumps in diesel engines, the methods of regulating HPFP output under various engine operating conditions, and the rationale for controlling the delivery rate of the HPFP in accumulator-type fuel systems to reduce mechanical drive losses.

Based on the conducted analysis, it is concluded that in order to reduce power losses in the HPFP drive and thus increase the mechanical and overall efficiency of diesel engines with accumulator fuel systems it is necessary to include a device in the fuel system that enables delivery adjustment independently of pump shaft speed and accumulator pressure. Future work will focus on developing a conceptual design of an HPFP that enables reduction of mechanical losses through controlled delivery, as well as on creating mathematical models required to describe and study processes within the diesel fuel system.

Keywords: high-pressure fuel pump; accumulator-type fuel system; mechanical losses; diesel engine.