

2. **Макаренко М. Г. та ін.** Електронні системи керування та діагностики сучасних автомобілів: проблеми і рішення. *Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії* : зб. тез та доп. міжнар. конф. (Харків, 11–12 берез. 2024 р.). Харків : ХНАДУ, 2024. С. 274–278.

3. **Макаренко М. Г., Шевченко І. О., Кривоніс С. В.** Оптимізація систем керування двигунами вантажних автомобілів. *Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії* : зб. тез доп. міжнар. конф. (Харків, 11–12 берез. 2024 р.). Харків : ХНАДУ, 2024. С. 271–274.

4. **Johnson T. V.** Diesel Emissions in Review. *SAE Technical Paper 2011-01-0304*. 2011.

5. **Norouzi A. et al.** Model Predictive Control of Internal Combustion Engines: A Review and Future Directions. *Energies*. 2021.

6. **Liao-McPherson D. et al.** Model predictive emissions control of a diesel engine air path: design and evaluation. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2020.

7. **Guzzella L., Onder C. H.** *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Springer, 2010.

8. **Tao F. et al.** Digital Twins and Cyber–Physical Systems: correlation and comparison. *Engineering*. 2019.

УДК 621.436:621.43.068:519.87

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ ТА NO_x/PM У ГАЗОДИЗЕЛЬНОМУ ДВЗ FPT NEF 6.7 НА НЕСТАЦІОНАРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

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

Корогодський Володимир Анатолійович, докт. техн. наук,
професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: korohodskiy@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1605-4631

Хомутов Максим Анатолійович, аспірант кафедри двигунів
внутрішнього згоряння, Харківський національний автомобільно-дорожній
університет, m.a.homutov@gmail.com, ORCID: 0009-0006-9184-7646

Стрижак Гліб Олександрович, магістр кафедри двигунів внутрішнього
згоряння, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
strizakgleb29@gmail.com, ORCID: 0009-0002-1850-3557

Для важких двигунів внутрішнього згоряння, зокрема вантажних автомобілів і тракторів, саме перехідні режими роботи [1] формують значну частину інтегральної витрати палива [2] та шкідливих викидів [3, 4, 5]. Це пояснюється інерційністю повітряного тракту та запізненням дії контурів керування. У системах турбонаддуву з VGT це проявляється як тимчасовий дефіцит наддуву або перерегулювання, а в системі EGR – як невідповідність між цільовою та фактичною часткою рециркуляції в перші секунди транзйєнта. Усе це безпосередньо впливає на локальний коефіцієнт надлишку [6] повітря та температурний режим згоряння [10, 11].

Для газодизельних двигунів проблема ускладнюється ще й тим, що процес стає дуже чутливим до дози та фази пілотного дизельного впорскування, від яких залежить стабільність займання і характер тепловиділення під час зміни навантаження [7, 8]. У результаті компроміс між паливною економічністю, викидами NO_x та PM на перехідних режимах стає ще більш загостреним. З одного боку, EGR знижує NO_x за рахунок розбавлення суміші та зменшення температури згоряння, а з іншого – може погіршувати умови окиснення сажі. Додатково зі зростанням частки газу підвищуються вимоги до забезпечення двигуна повітрям [12, 15].

Метою роботи є формування та оцінювання багатокритеріальних стратегій керування газодизельним режимом роботи двигуна FPT NEF 6.7, у якому біометан використовується як основне паливо, а дизель – як пілотне джерело займання, для зменшення паливної витрати та показників викидів NO_x і PM на нестационарних режимах з урахуванням динаміки систем EGR і VGT.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання: побудувати mean-value 0D/1D модель повітряного тракту та процесу згоряння, придатну для аналізу транзєнтів; сформувані сценарії нестационарних навантажень і критерії оцінки якості роботи двигуна; поставити задачу багато критеріальної оптимізації з фізично обґрунтованими обмеженнями; виконати аналіз Парето-компромїсів і чутливості основних керованих параметрів [10, 11, 16].

Об'єктом дослідження є двигун FPT NEF 6.7 – рядний шестициліндровий двигун робочим об'ємом близько 6,7 л, який розглядається у газодизельному режимі. Біометан подається у впускний тракт, а дизельне паливо використовується для пілотного ініціюючого впорскування. У моделі враховано наявність систем EGR та VGT, які визначають динаміку тиску наддуву, температурного стану та складу заряду на перехідних режимах [10, 11].

Максимальну частку заміщення дизельного палива біометаном прийнято на рівні $\text{SR}_{\text{max}} = 70\%$ за енергетичною часткою. Це відповідає характерним значенням для dual-fuel концепцій на основі природного газу або біометану, однак у транзєнтних режимах така частка може потребувати тимчасового обмеження для забезпечення стабільності згоряння та обмеження утворення твердих частинок [7-9].

Дослідження виконано виключно методом комп'ютерного моделювання в межах system-level підходу 0D/1D/mean-value. Власні стендові експерименти в цій роботі не проводилися.

Розроблена модель включає такі основні підсистеми.

В повітряному тракті враховано компресор і турбіну з картами, керовану геометрію турбіни VGT, інтеркулер, а також впускний і випускний тракти з акумуляцією маси та енергії у plenum-об'ємах [10, 11].

Модель враховує клапан EGR з динамікою, а також вплив рециркуляції на склад заряду, його теплоємність і коефіцієнт надлишку повітря [10, 11].

Частка заміщення SR розглядається як керована величина в межах 0...70 %, а параметри пілотного впорскування – кут початку впорскування,

відносна кількість пілотної дози та тиск упорскування – використовуються як інструменти керування займанням і тепловиділенням [7-9].

Застосовано узагальнений транз'єнтно-стійкий підхід на базі mean-value та квазістаціонарних кореляцій. Параметри калібруються на стаціонарних режимах, а в нестаціонарних умовах прогноуються за поточними динамічними станами, такими як тиск наддуву, температура на вході, ступінь EGR, λ , частота обертання і навантаження [10, 11].

Викиди NOx оцінюються за узагальненою моделлю, що спирається на термічний механізм Зельдовича та враховує температуру, час перебування і кисневу забезпеченість [12, 13]. Для PM застосовано напівемпіричний підхід типу «утворення–окиснення», чутливий до локальної еквівалентності, коефіцієнта надлишку повітря та температурних умов [14, 15].

У моделі аналізуються BSFC або еквівалентна енерговитрата, викиди NOx, PM/димність, тиск наддуву, λ , частка EGR, температурні показники та параметри, пов'язані зі стабільністю горіння [10, 12, 15].

Слід наголосити, що всі числові оцінки в роботі трактуються саме як результати моделювання. Припущення, пов'язані з узагальненнями для PM і NOx, розглядаються окремо як обмеження моделі. У роботі розглянуто два основних типи нестаціонарних режимів при фіксованій частоті обертання: ступінчасті зміни моменту: 25→75 %, 50→100 %, 75→25 % та рамп-переходи зі зростанням або спадом моменту впродовж 5–15 с. Додатково допускається синтетичний комбінований профіль типу «поле/дорога», який поєднує рамп та короткі ступінчасті збурення [10, 11].

Оптимізація проводиться одночасно за трьома критеріями: мінімізація BSFC, мінімізація NOx і мінімізація PM.

До керованих змінних віднесено: частку заміщення дизельного палива біометаном $SR(t)$ в межах 0...70 %; параметри пілотного впорскування SOI_{pilot} , m_{pilot} , p_{rail} ; закон зміни EGR(t); закон зміни VGT(t) [8, 10, 11].

При цьому враховано обмеження щодо стабільності займання, пікових значень PM/димності, допустимої температури відпрацьованих газів, швидкодії актуаторів EGR і VGT, а також запобігання локальному перезбагаченню суміші в умовах дефіциту повітря під час набору моменту [10, 12, 15].

Як інструмент пошуку оптимальних рішень застосовано послідовність: DOE → метамодель → Парето-пошук методом NSGA-II або еквівалентним елітистським MOEA [16]. Такий підхід є доцільним для задач, де прямі симуляції потребують значних обчислювальних витрат.

Проведене моделювання дало змогу виявити низку стійких якісних закономірностей. Так координоване керування системами VGT і EGR зменшує так званий «кисневий провал» на етапі набору навантаження. Це досягається за рахунок швидшого наростання тиску наддуву та кращого узгодження фактичного EGR-rate із цільовим значенням. Як наслідок, зменшується ймовірність короткочасних сплесків PM і димності.

Зі зростанням частки газового палива до рівня, близького до 70 %, різко підвищується чутливість двигуна до нестачі повітря на швидких транз'єнтах.

Навіть короткочасне зниження λ у цей період створює умови для інтенсивнішого утворення сажі. Тому серед раціональних керувальних рішень часто з'являється тимчасове обмеження SR у першій фазі набору моменту.

Встановлено, що пілотне дизельне впорскування підтверджує свою ключову роль у формуванні компромісу між NOx і PM в газодизельному процесі. Більш ранній або інтенсивніший пілот покращує стабільність займання і зменшує циклові коливання, але одночасно може підвищувати локальні температурні піки, а отже, і термічне утворення NOx.

Крім того, система EGR справді ефективно знижує NOx завдяки зменшенню температури згоряння і концентрації кисню в заряді. Однак на фоні транз'єнтного дефіциту наддуву вона може погіршувати умови окиснення частинок сажі, що призводить до зростання PM. Саме цим і пояснюється загострення компромісу між NOx та PM на нестационарних режимах.

Аналіз Парето-поверхонь показує, що для таких режимів доцільні не фіксовані уставки, а саме режимно-адаптивні закони керування для SR(t), EGR(t) і VGT(t). Оптимальні налаштування для плавних рамп-переходів не збігаються з оптимумами для різких ступінчастих змін, оскільки роль інерційності турбонаддуву та динаміки EGR в цих випадках різна.

Експериментальна валідація в межах роботи не виконувалася. Водночас отримані тренди узгоджуються з результатами, опублікованими для dual-fuel двигунів близького робочого об'єму з аналогічною схемою «газ у впуск + пілот дизеля» [7-9]. Це підтверджує фізичну правдоподібність моделі, хоча й не замінює повного стендового калібрування та перевірки.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що сформульовано транз'єнтно-орієнтовану задачу багатокритеріальної оптимізації газодизельного режиму з урахуванням динаміки систем EGR і VGT у межах system-level моделі; обґрунтовано доцільність введення транз'єнтних обмежень на SR(t) як інструменту керування локальним коефіцієнтом надлишку повітря та ризиком PM-сплесків при turbo-lag; уточнено інтерпретацію компромісів між паливною економічністю, NOx і PM через Парето-фронти та через аналіз чутливості параметрів пілотного впорскування як регулятора системи «займання – тепловиділення – NOx/PM».

Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані Парето-набори рішень і правила узгодження SR – пілот – EGR – VGT можуть бути використані як основа для подальшого калібрування електронних систем керування важкими двигунами у dual-fuel режимі. Крім того, ці результати можуть бути корисними під час формування вимог до швидкодії виконавчих механізмів систем EGR і VGT на перехідних режимах.

Водночас потрібно враховувати й обмеження застосованого підходу. System-level модель класу 0D/1D mean-value не відтворює детально просторову неоднорідність суміші та мікрофізику сажеутворення, тому оцінка PM і NOx виконується за узагальненими моделями й кореляціями [10, 11]. Біометан у роботі прийнято еквівалентним природному газу за основними впливами на dual-fuel процес без деталізації домішок і варіацій складу. Крім того, не

оцінювалися викиди CH_4 -slip, CO та HC, хоча для газових палив вони також є важливими [7, 8].

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення моделі з урахуванням складу палива, введення показників стабільності горіння та проведення стендової валідації з використанням критеріїв NRMSE і MAPE для тиску наддуву, частки EGR, а також викидів NO_x і PM.

Висновки

У роботі сформовано та реалізовано підхід до багатокритеріальної оптимізації паливної економічності та викидів NO_x /PM газодизельного двигуна FPT NEF 6.7 на нестационарних режимах навантаження. Встановлено, що основними чинниками погіршення екологічних показників у транзйентних процесах є інерційність системи регульованого турбонаддуву та запізнення контуру рециркуляції відпрацьованих газів.

Показано доцільність транзйентного обмеження частки заміщення дизельного палива біометаном у фазі набору навантаження для стабілізації коефіцієнта надлишку повітря та зниження ризику утворення твердих частинок. Визначено, що пілотне дизельне впорскування залишається ключовим інструментом керування стабільністю займання та компромісом між NO_x і PM. Отримані за результатами Парето-оптимізації режимно-адаптивні рішення можуть бути використані як основа для подальшого калібрування систем керування газодизельними двигунами.

Література

1. **Osetrov O. et al.** Mathematical Modeling and Computational Study of a Passenger Car Dynamics During Acceleration. *Transport Means - Proceedings of the International Conference*. 2021. No. 1. P. 284–289.
2. **Корогодський В. А.** Визначення раціонального циклу та способу організації робочого процесу двигуна за навантажувальною характеристикою. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2020. Вип. 90. С. 80–94.
3. **Gritsuk I. et al.** Development of an approach to the construction of an adapted model for ensuring the thermal readiness processes of a vehicle based on fuel consumption and exhaust gas emissions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 6, no. 4 (132). P. 26–45. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.316922>.
4. **Макаренко М. Г., Шевченко І. О., Кривоніс С. В.** Оптимізація систем керування двигунами вантажних автомобілів. *Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії* : зб. тез доп. міжнар. конф. (Харків, 11–12 берез. 2024 р.). Харків : ХНАДУ, 2024. С. 271–274.
5. **Макаренко М. Г., Лобинський Д. Р.** Оптимізація динамічних характеристик двигуна трактора ХТЗ-170 шляхом впровадження інтелектуальної системи регульованого наддуву. *Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті* : матеріали XXI міжнар. форуму молоді (Харків, 10–11 квіт. 2025 р.). Харків : ДБТУ, 2025. С. 235–236.
6. **Korohodskiy V. et al.** Determining the criteria and the degree of the stratification of the air-fuel charge in a cylinder of a spark-ignition engine during injecting fuel. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 977. 012002.
7. **Karim G. A.** A review of combustion processes in the dual fuel engine—The gas diesel engine. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1980. Vol. 6, no. 3. P. 277–285. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(80\)90019-2](https://doi.org/10.1016/0360-1285(80)90019-2).

8. **Hegab A. H.** Dual-fuelling of diesel engines with natural gas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 70. P. 666–697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.249>.
9. **Papagiannakis R. G., Hountalas D. T.** Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas. *Energy Conversion and Management*. 2004. Vol. 45, no. 18–19. P. 2971–2988. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.01.013>.
10. **Guzzella L., Onder C. H.** *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. 2nd ed. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010. 432 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10775-7>.
11. **Eriksson L., Nielsen L.** *Modeling and Control of Engines and Drivelines*. Chichester : John Wiley & Sons, 2014. 588 p. ISBN 978-1118479995.
12. **Heywood J. B.** *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 978-1260116106.
13. **Zel'dovich Ya. B.** The oxidation of nitrogen in combustion and explosions. *Acta Physicochimica URSS*. 1946. Vol. 21. P. 577–628.
14. **Hiroyasu H., Kadota T.** Models for combustion and formation of nitric oxide and soot in direct injection diesel engines. *SAE Paper 760129*. Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 1976.
15. **Tree D. R., Svensson K. I.** Soot processes in compression ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2007. Vol. 33, no. 3. P. 272–309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2006.03.002>.
16. **Deb K. et al.** A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002. Vol. 6, no. 2. P. 182–197. DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.

УДК 621.432.4:534.16

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРІВ МУФТИ ІЗ ПОПЕРЕДНІМ НАТЯГОМ ДЛЯ ОБМЕЖЕННЯ КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ДВОВАЛЬНИХ ДИЗЕЛІВ

Шатохін Володимир Михайлович, докт. техн. наук, професор кафедри теоретичної і будівельної механіки, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,

e-mail: shatokhinvlm@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-0766-4104

Красніков Сергій Васильович, канд. техн. наук, доцент кафедри ДМтаТММ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: ysevavr@ukr.net, ORCID: [0000-0003-1441-9921](https://orcid.org/0000-0003-1441-9921)

1. Збільшення потужності та швидкості сучасних установок з ДВЗ неминує веде до зростання динамічних навантажень у них. Ефективним засобом боротьби з небезпечними крутильними коливаннями є введення пружних муфт і демпфуючих пристроїв, характеристики яких найчастіше є нелінійними. Можливості існуючих підходів на вибір їх параметрів обмежені