
Секція 2. РОБОЧІ ПРОЦЕСИ, ДИНАМІКА І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА МАШИН

УДК 621.43:681.5:629.33:631.372

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК І МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗНЕ КЕРУВАННЯ РОБОЧИМ ПРОЦЕСОМ ДИЗЕЛЬНОГО ДВЗ У ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВКАХ ТРАКТОРІВ І АВТОМОБІЛІВ

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

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

Щербінський Ігор Олександрович, аспірант,
Державний біотехнологічний університет,
e-mail: ihor.shcherbinskyi@claas.com, ORCID 0009-0005-4278-3394

Гібридні силові установки (дизельний ДВЗ + електромашинна батарея) застосовуються для підвищення енергоефективності та керованості силової лінії у транспортних засобах різних класів, зокрема у вантажних автомобілях і перспективних тракторних платформах [3]. Водночас гібридизація не гарантує покращення умов роботи ДВЗ сама по собі: режимність визначається стратегією енергоменеджменту, обмеженнями АКБ та динамікою попиту на крутний момент [7]. На практиці реалізують як стратегії згладжування навантаження ДВЗ електричною частиною, так і режими роботи ДВЗ у вузьких зонах з частими переходами між станами (зупинки/пуски, швидкі зміни моменту), що підсилює вимоги до узгодженого керування повітряним трактом, упорскуванням і температурними режимами.

Для тракторів додатковим фактором є висока варіативність тягового опору та режими роботи від валу відбору потужності, де змінність навантаження ускладнює підтримання оптимальних параметрів згоряння та газообміну [1]. Для автомобілів (особливо вантажних) значними є перехідні процеси повітряного тракту (наддув, EGR) та залежність екологічних показників від реальної траєкторії руху й профілю дороги [3]. Традиційне керування за калібрувальними картами, сформованими у контрольованих умовах, має обмежену переносимість на експлуатацію, що проявляється у підвищенні насосних втрат, погіршенні компромісу «ефективність–викиди–ресурс» і частішому наближенні до теплових/ресурсних лімітів [7].

Критично важливо, що кінцеві викиди на виході транспортного засобу визначаються не лише «сирими» викидами ДВЗ, а й станом та температурним режимом систем нейтралізації (SCR/DPF), включно з регенерацією DPF і

«температурним вікном» ефективності SCR [4]. Тому перспективним є підхід, у якому оптимізація режимів ДВЗ узгоджується з обмеженнями нейтралізації та з енергетичним балансом гібридної системи.

Як інструмент такого узгодження розглядається цифровий двійник силової установки, синхронізований з бортовими даними, у поєднанні з модельно-прогнозним керуванням (MPC), що дозволяє формалізувати обмеження та прогнозувати наслідки керуючих дій у короткому горизонті часу [5], а концептуальні принципи цифрових двійників як кіберфізичних представлень підтримують таку інтеграцію у прикладних системах [8].

Мета роботи – обґрунтувати підхід до підвищення енергоефективності та зниження викидів дизельного ДВЗ у гібридних силових установках тракторів і автомобілів шляхом побудови цифрового двійника та застосування модельно-прогнозного керування, орієнтованого на профілі навантаження реальної експлуатації та на компроміс «ефективність–викиди–ресурс» [7].

Завданням є: сформувати архітектуру цифрового двійника «ДВЗ–повітряний тракт–паливоподача–система нейтралізації–електромашини–АКБ» [8]; визначити склад доступних сигналів ECU/VCU/датчиків і підходи до оцінювання станів та адаптації параметрів моделі, достатні для експлуатаційних умов [2]; розробити постановку MPC для узгодженого керування EGR, наддувом (boost) та параметрами упорскування з урахуванням обмежень і теплового стану ключових компонентів [5]; включити в контур прогнозу та обмежень вплив систем нейтралізації (SCR/DPF) як визначального чинника кінцевих викидів [4]; запропонувати методику оцінювання ефекту на профілях реальної експлуатації та критерії стійкості до невизначеностей і деградації.

Об'єкт досліджень – робочий процес дизельного ДВЗ у гібридній силовій установці тракторів і автомобілів, керований ECU/VCU та пов'язаний із системами EGR, наддуву і нейтралізації викидів [3].

Предмет – методи цифрового двійника та модельно-прогнозного керування/оцінювання станів (MPC/MHE), що забезпечують прогнозно-обмежувальну оптимізацію режимів ДВЗ в умовах реальної експлуатації [5].

Наукова новизна полягає у: інтеграції контуру «бортові дані → оцінка станів/адаптація параметрів → короткостроковий прогноз → оптимізація керування» з фокусом на експлуатаційні профілі; постановці MPC як інструмента керування з обмеженнями (constraint handling) для одночасного врахування екологічних, теплових та ресурсних лімітів і обмежень електричної частини; розмежуванні ефектів для «сирих» викидів ДВЗ та кінцевих викидів після SCR/DPF із включенням теплового стану нейтралізації в прогноз; уточненні реалістичності керування combustion phasing: використання індикаторів типу CA50 розглядається як опція лише за наявності датчика тиску в циліндрі або валідованого оцінювача; за відсутності таких засобів акцент переноситься на керування доступними змінними і системою обмежувачів [7].

Пропонується наступна методологія. Цифровий двійник формують як узгоджений набір моделей різної деталізації: 0D (середньопараметричні) моделі для прогнозу крутного моменту, витрати палива, динаміки повітряного

тракту та насосних втрат у горизонті MPC; 1D (газодинамічні) моделі для офлайн-уточнення динаміки наддуву/EGR та підготовки зведених (лінійаризованих/LPV) представлень; CFD/3D (офлайн) для обґрунтування залежностей сумішоутворення/згоряння та емісійних тенденцій; сурогатні моделі для швидкого прогнозу показників димності, тенденцій NOx/PM та обмежень (температури, ресурси), придатні до реалізації на ECU/VCU. Такий підхід узгоджується з інженерною практикою моделювання та керування ДВЗ, де складність моделі має відповідати даним і обчислювальному бюджету [7], а застосування MPC для ДВЗ часто потребує саме зведених моделей [5].

Для синхронізації використовують типові сигнали ECU/VCU: n , запит моменту, параметри впуску/випуску, положення EGR/VGT, параметри упорскування, а також сигнали SCR/DPF (температури, перепад тиску DPF, режими регенерації) і параметри АКБ (SOC, струми, температури, потужнісні ліміти). Оцінювання станів і адаптацію параметрів (наприклад, ефективність EGR, поправки турбіни, теплові параметри SCR/DPF) доцільно виконувати методами типу МНЕ/фільтрації зі вбудованими механізмами захисту від дрейфу та контролем якості даних, що є критичним для експлуатації [5]. Практична значущість коректної побудови вбудованих систем керування і діагностики для транспортних засобів підкреслена і в прикладних роботах з електронних систем [2].

Керуючі впливи: EGR, наддув (boost), параметри упорскування (injection timing/quantity), а також допустимі дії для підтримання теплового режиму нейтралізації. Мета: мінімізація витрати палива та насосних втрат; зниження прогнозних «сирих» NOx/PM без порушення обмежень димності; підтримання працездатного теплового режиму SCR/DPF; узгодження з енергетичним балансом «ДВЗ–електромашина–АКБ».

Обмеження: димність/надлишок повітря; ресурсні обмеження (піковий тиск/похідні показники, допустимі градієнти моменту), температурні обмеження компонентів, обмеження турбокомпресора, температурні обмеження SCR/DPF та обмеження електричної частини. Такі постановки відповідають сучасним підходам MPC для ДВЗ та емісійного керування повітряним трактом [5, 6].

Оцінювання виконується на профілях, сформованих із даних реальної експлуатації: для тракторів — тягові операції, транспорт, робота від ВВП [1]; для автомобілів/вантажних — міські й магістральні режими з урахуванням навантаження та ухилів [3]. Порівняння проводиться з базовим керуванням (калібрувальні карти + коректори/обмежувачі) за показниками: витрата палива; частота порушення обмежень; стабільність перехідних процесів; «сирі» та (за можливості) кінцеві викиди після SCR/DPF [4].

Наведені значення є очікуваними (модельна оцінка) і потребують підтвердження на експлуатаційних профілях: зменшення витрати палива: орієнтовно 1–4% за рахунок прогнозного узгодження EGR/boost, зменшення насосних втрат та оптимізації розподілу потужності в гібридній силовій установці [5, 7]; підвищення дисципліни обмежень: зменшення частоти виходів за температурні та димнісні ліміти на 20–50% завдяки явному урахуванню

обмежень у MPC та кращому керуванню перехідними процесами; викиди NOx/PM: для «сирих» викидів можливе зниження NOx на 5–15% при контролі димності через обмеження за надлишком повітря; для кінцевих викидів основний внесок очікується через підтримання працездатного температурного режиму SCR і узгодження режимів, що впливають на накопичення/регенерацію сажі в DPF [4, 6]; реалізованість: такт керування порядку десятків мілісекунд досяжний за використання зведених моделей і обмеження розмірності задачі; в іншому разі MPC доцільно впроваджувати поетапно або в окремих контурах (повітряний тракт/нейтралізація) [5].

Практична цінність полягає для тракторів в підході, спрямованому на підвищення повторюваності енергоефективності та екологічних показників у польових режимах і при роботі від ВВП, а також на зниженні ризику перевищення теплових і ресурсних лімітів [1]. Для автомобілів/вантажних – на зменшення відхилень у перехідних процесах, узгодження EGR/boost і підтримання ефективності SCR/DPF у динамічній експлуатації [3, 4].

Окремо цифровий двійник є корисним як модуль моніторингу/діагностики деградації EGR/турбіни/DPF, що узгоджується з практичними задачами електронних систем керування та діагностики [2]. Для тракторних вбудованих систем потенціал підсилюється використанням інтелектуальних підходів на рівні вбудованих алгоритмів і сервісних функцій [1].

Висновки

Цифровий двійник у поєднанні з MPC є обґрунтованим напрямом підвищення енергоефективності та керованості дизельного ДВЗ у гібридних силових установках за умови відповідності моделі доступним вимірюванням і обчислювальному бюджету ECU/VCU [5, 7].

Гібридизація не гарантує «згладжування» режимів ДВЗ; ефект визначається енергоменеджментом і станом АКБ, що потребує адаптації керування до профілів експлуатації [7].

Для зниження кінцевих викидів вирішальним є включення теплового стану SCR/DPF у прогноз і в обмеження; керування «сирими» викидами має бути узгоджене з можливостями нейтралізації [4].

Ефект MPC і цифрового двійника необхідно підтверджувати на профілях реальної експлуатації з перевіркою стійкості до невизначеностей (деградація, зміна палива, температурні варіації) [5].

Найбільш практичним є поетапне впровадження: від цифрового двійника як моніторингу/діагностики до MPC у вибраних контурах із чітко визначеними обмеженнями та критеріями валідації [2, 6, 8].

Література

1. **Макаренко М. Г., Пиріжок В. І.** Використання штучного інтелекту у вбудованих системах сільськогосподарських тракторів. *Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті* : матеріали XX міжнар. форуму молоді (Харків, 04–05 квіт. 2024 р.). Харків : ДБТУ, 2024. С. 192.

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].