

## Секція 1. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 629.33:621.43:621.31

### СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ МОБІЛЬНИХ МАШИН: ПЕРЕХІД ВІД ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ДО ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

**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

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

**Калашник Єгор Анатолійович**, магістр,  
Державний біотехнологічний університет,  
e-mail: Kalashnikegor0904@gmail.com

Енергетика мобільних машин (автомобілів, тракторів, дорожньо-будівельної та спеціальної техніки) перебуває у фазі системної трансформації, зумовленої сукупністю чинників: (1) жорсткішими вимогами до викидів NO<sub>x</sub>, твердих частинок (PM) і CO<sub>2</sub>; (2) підвищенням вимог до енергоефективності та зменшенням питомих витрат палива в реальній експлуатації; (3) ускладненням експлуатаційних профілів, у яких зростає частка перехідних режимів, а тепловий стан силової установки часто не відповідає умовам, за яких досягнуто «паспортні» показники [4, 6].

Ключова проблема полягає у розходженні між оптимізацією ДВЗ на стандартизованих режимах і фактичною роботою в реальних циклах. У реальній експлуатації навантаження змінюється швидко, відбуваються часті переходи «низьке–високе» навантаження, значні періоди часткового навантаження та холостого ходу, а також специфічні технологічні режими (тягові операції, робота від валу відбору потужності, динамічні навантаження гідросистеми у тракторів). Саме ці режими формують найбільшу частку втрат (через роботу поза зоною мінімальної питомої витрати) і короткочасні «піки» утворення NO<sub>x</sub>/PM, які важко усунути виключно внутрішньодвигунними заходами [4].

Подальше підвищення ефективності ДВЗ [10] через посилення рециркуляції відпрацьованих газів (EGR), підвищення наддуву, корекцію фазування згоряння та моменту упорскування [11] дає суттєвий ефект, але одночасно загострює компроміс «ефективність–викиди–ресурс» і підвищує чутливість до перехідних процесів та теплових режимів [4]. Додаткові обмеження формують

системи після обробки відпрацьованих газів: селективне каталітичне відновлення (SCR) та сажовий фільтр (DPF). Їхня ефективність має виражені температурні «вікна», а відхилення теплового режиму в реальній експлуатації призводить до потреби в компенсаційних стратегіях (зокрема регенераційних), що може збільшувати витрати палива та впливати на ресурс компонентів [6].

За цих умов гібридизація силових установок розглядається як еволюційний шлях розвитку енергетики мобільних машин: не як «відмова» від ДВЗ, а як інструмент перерозподілу енергопотоків, покриття пікових навантажень та стабілізації теплового режиму після обробки. Такий підхід забезпечує додаткові ступені свободи для системної оптимізації у реальних умовах експлуатації і створює підґрунтя для впровадження розвинених алгоритмів керування та діагностики, що відповідає сучасним напрямкам розвитку вбудованих систем керування мобільними машинами [1-5].

Мета досліджень – виконати науково обґрунтований аналіз тенденцій переходу від традиційних енергетичних установок на базі ДВЗ до гібридних систем енергопостачання мобільних машин з акцентом на реальні експлуатаційні режими та компроміс «ефективність–викиди–ресурс».

Завдання:

- проаналізувати системні обмеження подальшого розвитку ДВЗ у контексті реальних режимів експлуатації;
- визначити чинники, що роблять гібридизацію технологічно доцільною для різних класів мобільних машин;
- аргументувати взаємозв'язок параметрів робочого процесу ДВЗ із працездатністю та ефективністю SCR/DPF у реальних теплових режимах;
- узагальнити перспективні архітектури гібридних систем для автомобільної, аграрної та спеціальної техніки;
- оцінити очікувані наслідки впровадження гібридизації для економічності, екологічності та ресурсу з позицій практичної реалізації в блоках керування (ECU/VCU).

Об'єктом є енергетичні системи мобільних машин, що включають ДВЗ, електричні машини, системи накопичення енергії та комплекси післяобробки (SCR/DPF), інтегровані з електронними системами керування.

Предметом є тенденції розвитку конструктивних і функціональних рішень у зазначених системах у напрямі гібридизації та системної оптимізації, зумовлені домінуванням перехідних режимів і теплових обмежень у реальній експлуатації. Наукова новизна полягає у формуванні системного погляду на перехід «ДВЗ → гібридна енергетична система» як на засіб керованого розв'язання багатокритеріальної задачі «ефективність–викиди–ресурс» у реальних режимах, де визначальними стають: узгодження керування ДВЗ із тепловими режимами SCR/DPF, перерозподіл пікових навантажень електричною складовою, а також підвищення ролі алгоритмів енергоменеджменту й діагностики в ECU/VCU [1-3, 5-7].

Методологічну основу становить поглиблений огляд монографій і науково-практичних джерел з двигунобудування, моделювання та керування

силовими установками і гібридними трансмісіями [6, 7], а також узагальнення матеріалів з електронних систем керування та оптимізації алгоритмів керування ДВЗ для транспортних застосувань [1-4]. Аналіз виконано у межах системного підходу «силова установка як енергетична система», де показники ДВЗ розглядаються разом із впливом після обробки, теплових процесів, електричної підсистеми та обмежень ресурсу.

У практичному аспекті враховано розподіл функцій: блок керування двигуном (ECU) реалізує швидкі контури регулювання ДВЗ і після обробки, тоді як блок керування гібридною силовою установкою/енергоменеджментом (VCU) забезпечує координацію енергопотоків, контроль обмежень і узгодження режимів у реальних циклах експлуатації [2, 3].

Ключовими результатами роботи є наступні.

1. Домінування перехідних процесів у реальній експлуатації змінює «центр ваги» оптимізації. Перехідні режими є критичними, оскільки саме у транзієнтах виникає невідповідність між вимогою до моменту/потужності та можливістю підтримувати оптимальні параметри газообміну, упорскування й згоряння. У таких умовах збільшуються втрати (робота поза зоною мінімальної питомої витрати), а також виникають короточасні погіршення екологічних показників [4]. Це означає, що подальший прогрес не може забезпечуватися лише «покращенням ДВЗ як окремого агрегату» – потрібна оптимізація на рівні системи.

2. Заходи для зниження викидів посилюють взаємні обмеження. Розширення застосування EGR і наддуву, а також активне керування фазуванням згоряння і моментом упорскування дозволяють керувати NOx/PM, однак підвищують чутливість до перехідних режимів, теплового стану та якості керування. У межових режимах зростає ризик підвищених термічних навантажень, збільшення сажеутворення та деградаційних явищ, що напряму впливає на ресурс [5, 8, 9].

3. Післяобробка SCR/DPF переходить із «підсистеми очищення» у ключовий обмежувальний фактор силової установки. Ефективність SCR і DPF істотно залежить від температури, протитиску та режимів регенерації; у реальній експлуатації забезпечити стабільний тепловий режим складно. Як наслідок, ДВЗ нерідко працює у компромісних налаштуваннях, які підтримують працездатність післяобробки, але можуть погіршувати економічність і ресурс окремих компонентів (термічні напруження, каталізаторні деградації, збільшення витрат палива на регенерацію) [7]. Таким чином, екологічні вимоги фактично змушують переходити до системного енергоменеджменту, де тепловий режим післяобробки є об'єктом керування на рівні всієї енергетичної системи.

4. Гібридизація створює додаткові ступені свободи для розв'язання компромісу «ефективність–викиди–ресурс». Електрична машина та накопичувач енергії дозволяють: (а) покривати короточасні піки потужності без виведення ДВЗ у «критичні» транзієнти; (б) вирівнювати навантаження ДВЗ та наближати його роботу до зон кращої економічності; (в) поліпшувати керуваність теплового режиму після обробки (опосередковано – через стабілізацію режимів ДВЗ)

[6, 7]. Важливо, що для мобільних машин з високою питомою енергоємністю задач (особливо тракторів і спецтехніки) гібридизація виступає прагматичним компромісом між повною електрифікацією та «традиційним» ДВЗ, знижуючи бар'єри інфраструктури і масо-габаритні обмеження накопичувачів [6].

5. Кількісні ефекти слід трактувати як очікувані за літературними даними й залежні від профілю роботи. У профільних джерелах для транспортних застосувань наводяться оцінки потенційного зниження витрати палива для «м'яких» гібридних рішень порядку 5–10 % у циклах з високою часткою перехідних режимів (за умови реалізації рекуперації та ефективного енергоменеджменту) [6]. Для екологічних показників ключовим є не «абстрактне» зниження NOx/PM, а зменшення частоти та амплітуди критичних транз'єнтів і забезпечення придатних температурних режимів SCR/DPF; фактичний ефект визначається калібруванням і конфігурацією системи [7]. Твердження про зростання ресурсу потребують підтвердження експлуатаційними даними, однак механізм зниження динамічних навантажень і термічних перевантажень у гібридних архітектурах є фізично обґрунтованим [5-7].

Перспективи розвитку мають системний характер і визначаються цифровізацією керування. Найбільш перспективними напрямками є: електрифікація допоміжних приводів (як швидкий шлях до виграшу без радикальної зміни силового контуру); інтегроване теплове керування післяобробкою як частина загальної оптимізації; розвиток енергоменеджменту на рівні VCU із контролем обмежень; уніфікація даних ECU/VCU та розвиток діагностичних функцій і адаптивного калібрування в реальній експлуатації [1-3, 7]. У науково-методичному плані це підсилює роль моделей і прогнозного керування; однак практичне впровадження має спиратися на прості й робастні алгоритми, придатні для обчислювальних ресурсів ECU/VCU та для відтвореного калібрування.

Результати узагальнення можуть бути використані при проектуванні та модернізації енергетичних систем автомобілів, тракторів і спецтехніки. Для дорожніх транспортних засобів гібридизація є ефективним інструментом покращення економічності та зменшення викидів у режимах частих транз'єнтів (міський рух, змішані маршрути) [6]. Для аграрної та спеціальної техніки [12] гібридизація перспективна як спосіб підвищення керованості енергосистеми у змінних тягових режимах [13] і як інструмент стабілізації теплового режиму SCR/DPF в умовах реальної експлуатації [1-3, 7]. Для реалізації доцільним є архітектурний розподіл: ECU – керування ДВЗ/після обробкою, VCU – енергоменеджмент і контроль обмежень та узгодження режимів [2, 3].

### **Висновки**

1. Реальні експлуатаційні режими визначають сучасні вимоги до енергетики мобільних машин через домінування перехідних процесів і теплових інерцій.

2. Потенціал «локальної» оптимізації ДВЗ обмежений компромісом «ефективність–викиди–ресурс», що загострюється у транз'єнтах та при розширенні EGR/наддуву.

3. SCR/DPF формують критичні температурні та режимні обмеження; керованість їх теплових режимів стає складовою загальної оптимізації силової установки.

4. Гібридизація є еволюційно доцільним шляхом підвищення ефективності у реальній експлуатації за рахунок покриття піків навантаження та вирівнювання режимів ДВЗ.

5. Перспективи розвитку визначаються електрифікацією допоміжних приводів, системним енергоменеджментом на рівні VCU та поглибленням функцій керування/діагностики на основі експлуатаційних даних.

#### Література

1. **Макаренко М. Г., Пиріжок В. І.** Використання штучного інтелекту у вбудованих системах сільськогосподарських тракторів. *Матеріали XX міжнародного форуму молоді «Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті»* (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. *Збірник тез та доповідей міжнародної конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії»* (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. *Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії»* (Харків, 11–12 берез. 2024 р.). Харків : ХНАДУ, 2024. С. 271–274.

4. **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.

5. **Heywood J. B.** Internal Combustion Engine Fundamentals. New York : McGraw-Hill, 1988.

6. **Guzzella L., Sciarretta A.** Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization. 3rd ed. Berlin : Springer, 2013.

7. **Eriksson L., Nielsen L.** Modeling and Control of Engines and Drivelines. Chichester : Wiley, 2014.

8. **Макаренко М. Г., Шевченко І. О., Калашник Є. А.** Підвищення ефективності автомобільного двигуна шляхом застосування мехатронної системи адаптивного наддуву. *Збірник тез та доповідей міжнародної конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії»* (Харків, 11–12 берез. 2025 р.). Харків : ХНАДУ, 2025. С. 112–116.

9. **Макаренко М. Г. та ін.** Оптимізація параметрів роботи дизельних двигунів сільськогосподарської техніки як засіб зниження екологічного навантаження. *Інноваційні аспекти систем безпеки праці, цивільного захисту та захисту інтелектуальної власності* : матеріали X Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конф. (Полтава, 08–09 квіт. 2025 р.). Полтава : ПДАУ, 2025. С. 150–155.

10. **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.

11. **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.

12. **Корогодський В. А., Хандримайлов А. А., Грайворонський Є. С.** Модернізація вітчизняного двигуна 2Ч 6,8/7,8 з іскровим запалюванням системою безпосереднього

вприскування палива. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2010. Вип. 119. С. 117–122.

13. **Корогодський В. А., Василенко О. В., Діденко В. В.** Особливості електронної системи керування двотактним двигуном з іскровим запалюванням та безпосереднім впорскуванням палива. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2007. Вип. 80. С. 135–141.

УДК 621.315

## СУЧАСНІ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

**Латвинський Владислав Дмитрович**, асистент кафедри автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: latvin2000@gmail.com, ORCID ID 0009-0002-4891-2925

Зниження витрати енергії електромобілів та підвищення їхньої ефективності є важливим завданням на сучасному етапі розвитку транспорту. Електромобілі поступово замінюють автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння та впевнено займають своє місце як у міському, так і в міжміському русі. Тому їх подальше технічне вдосконалення залишається актуальним.

Одним із ключових практичних завдань є забезпечення пробігу не менше 200 км при русі зі швидкістю 80–100 км/год на одному заряді батареї. Досягти цього можна шляхом зменшення дорожніх опорів, скорочення втрат енергії у допоміжних системах, а також підвищення коефіцієнта корисної дії акумуляторів, електродвигунів, трансмісії та електричних з'єднань.

Основна увага має приділятися зниженню енерговитрат на подолання опору руху, мінімізації втрат потужності у допоміжному обладнанні та вдосконаленню гальмівної системи. Бажано, щоб коефіцієнт аеродинамічного опору електромобіля не перевищував 0,2–0,3 – це складне, проте цілком досяжне завдання.

Ефективним рішенням з погляду економії енергії є застосування рекуперативного гальмування [1]. У цьому випадку кінетична енергія під час гальмування перетворюється на електричну та повертається до акумуляторної батареї. Незважаючи на активні розробки нових типів акумуляторів, сьогодні найпоширенішими в сучасних електромобілях залишаються літій-іонні батареї [2]. Хоча вони значно легші та ефективніші за старі свинцево-кислотні акумулятори, маса батарей все ще становить значну частину загальної ваги автомобіля, тому зменшення ваги акумуляторів залишається важливою конструктивною та інженерною проблемою [3].

Використання електродвигунів постійного струму з послідовним збудженням має низку переваг порівняно з іншими типами двигунів. Вони забезпечують високий крутний момент на малих швидкостях і нижчий — на великих.