

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ
УНІВЕРСИТЕТ
KHARKIV NATIONAL AUTOMOBILE AND HIGHWAY UNIVERSITY**

**Кафедра двигунів внутрішнього згоряння
Department of Internal Combustion Engines**



**ЗБІРНИК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ
III МІЖНАРОДНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
«ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ
ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ»
11–12 березня 2026 року
(Посвідчення УкрІНТЕІ від 11 грудня 2025 р. № 973)**

**BOOK OF ABSTRACTS:
3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON
"ENERGY SYSTEMS AND ALTERNATIVE
ENERGY SOURCES" (ESAES – 2026)
March 11–12, 2026**



**Харків 2026
Kharkiv 2026**

УДК 620.9:621.43
3 41

*Рекомендовано до друку вченою радою автомобільного факультету
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
(Протокол № 9/26 від 18 травня 2026 року)*

Редактори:
Д.М. Леонтєв, І.М. Нікітченко, В.А. Корогодський

Відібрані тези доповідей III міжнародної конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії» 11–12 березня 2026 року м. Харків, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна.

3 41 Збірник тез доповідей міжнародної конференції "Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії". 11–12 березня 2026 року / Редактори: Д.М. Леонтєв, І.М. Нікітченко, В.А. Корогодський. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2026. – 208 с.
ISBN 978-617-8587-56-7

У збірнику тез доповідей представлені матеріали III Міжнародної конференції, започаткованої кафедрою двигунів внутрішнього згоряння Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Розглянуто актуальні науково-технічні, екологічні та економічні питання проектування, виробництва, дослідження й експлуатації енергетичних систем і машин.

Особливу увагу приділено розвитку енергетики, удосконаленню робочих процесів і конструкцій енергетичних установок, електричним та гібридним системам, альтернативним джерелам енергії, автоматизації, діагностиці, комп'ютерному моделюванню та електронним системам керування транспортних засобів. Також висвітлено питання енергозбереження, екологізації енергетики, енергетичного аудиту та менеджменту.

Матеріали збірника представляють інтерес для науковців, інженерно-технічних працівників, викладачів, студентів і аспірантів.

УДК 620.9:621.43

ISBN 978-617-8587-56-7

© Д.М. Леонтєв, І.М. Нікітченко,
В.А. Корогодський, 2026
© ХНАДУ, 2026

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

КЕРІВНИКИ ОРГКОМІТЕТУ

Богомолів Віктор Олександрович – ректор ХНАДУ, д.т.н., професор, Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії України, академік Транспортної академії України, голова організаційного комітету конференції;

Дмитрієв Ілля Андрійович – проректор ХНАДУ з наукової роботи, д.е.н., професор, Заслужений діяч науки і техніки України, академік Транспортної академії України, заступник голови організаційного комітету конференції;

Леонтьєв Дмитро Миколайович – декан автомобільного факультету ХНАДУ, д.т.н., професор, заступник голови організаційного комітету конференції;

Нікітченко І.М. – завідувач кафедри двигунів внутрішнього згорання, ХНАДУ, к.т.н., доцент, заступник голови організаційного комітету конференції;

Корогодський В.А. – професор кафедри двигунів внутрішнього згорання, ХНАДУ, д.т.н, професор, відповідальна особа за організацію та проведення конференції, відповідальний секретар конференції.

ЧЛЕНИ ОРГКОМІТЕТУ

Воронков О.І. – професор кафедри двигунів внутрішнього згорання, ХНАДУ, д.т.н., професор, Харків, Україна;

Грицюк О.В. – професор кафедри двигунів внутрішнього згорання, ХНАДУ, д.т.н., професор, Харків, Україна;

Манойло В.М. – професор кафедри двигунів внутрішнього згорання, ХНАДУ, д.т.н., доцент, Харків, Україна;

Авраменко А.М. – завідувач відділу водневої енергетики Інституту енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного НАН України, д.т.н., пров. наук. співр., Харків, Україна;

Кузьменко А.П. – доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання, ХНАДУ, к.т.н., доцент, Харків, Україна;

Подригало М.А. – завідувач кафедри технології машинобудування і ремонту машин, ХНАДУ, д.т.н, професор, Харків, Україна;

Клименко В.І. – завідувач кафедри автомобілів ім. А.Б. Гредескула, ХНАДУ, д.т.н., професор, Харків, Україна;

Шиндерук С.О. – завідувачка кафедри фізики, ХНАДУ, к.т.н., доцент, Харків, Україна;

Гнатов А.В. – завідувач кафедри автомобільної електроніки, ХНАДУ, д.т.н., професор, Харків, Україна;

Волков В.П. – завідувач кафедри технічної експлуатації і сервісу автомобілів ім. проф. Говорущенка М.Я., ХНАДУ, д.т.н., професор, Харків, Україна;

Воропай О.В. – завідувач кафедри деталей машин і теорії механізмів і машин, ХНАДУ, д.т.н., професор, Харків, Україна;

Глушкова Д.Б. – завідувач кафедри технології металів та матеріалознавства, ХНАДУ, д.т.н., професор, Харків, Україна;

Бугаєвський С.О. – декан дорожньо-будівельного факультету ХНАДУ, д.т.н., професор, Харків, Україна;

Гутаревич Ю.Ф. – професор кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, д.т.н., професор, Київ, Україна;

Криштопа С.І. – завідувач кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, д.т.н., професор, Івано-Франківськ, Україна;

Грицук І.В. – професор кафедри автомобільного транспорту і галузевого машинобудування, Національний університет “Чернігівська політехніка”, д.т.н., професор, Чернігів, Україна; Katedra strojného inžinierstva, Alexander Dubček University of Trenčín; prof., DrSc., Slovakia;

Варбанець Р.А. – завідувач кафедри суднові енергетичні установки і технічна експлуатація, Одеський національний морський університет, д.т.н., професор, Одеса, Україна;

Роговий А.С. – завідувач кафедри гідравлічні машини ім. Г.Ф. Проскури (Навчально-науковий інститут механічної інженерії і транспорту), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), д.т.н., професор, Харків, Україна;

Лісовал А.А. – професор кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, д.т.н., професор, Київ, Україна;

Гогоренко О.А. – завідувач кафедри двигунів внутрішнього згорання, установок та технічної експлуатації, к.т.н., доцент, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, к.т.н., доцент, Миколаїв, Україна;

Слинько Г.І. – професор кафедри двигунів внутрішнього згорання, Національний університет «Запорізька політехніка», д.т.н., професор, Запоріжжя, Україна;

Полив’ячук А.П. – професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, д.т.н., професор, Вінниця, Україна;

Лебедєв С.А. – директор Харківської філії Державної наукової установи «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого», к.т.н., Харків, Україна;

Калінін Є.І. – професор кафедри тракторів, автомобілів та біоенерго-ресурсів, Національний університет біоресурсів і природокористування України (НУБІП), д.т.н., професор, Київ, Україна;

Krzysztof Górski – DSci, Prof., Head of the Department of Automotive Transport, Kazmierz Pulaski University of Technology and Humanities, Radom, Poland;

Ruslans Šmigins – DSci., Professor of the Latvia University of Life Sciences and Technologies, Latvia Powertrain Institute;

Albina Tropina – DSci., Research Professor Aerospace Engineering, Texas A&M University, TX 77843, United States;

Otar Gelashvili – Dean of transport and Faculty of Mechanical Engineering, Department of Road Transport and Logistics, DSci., Prof. Georgian technical University, Tbilisi, Georgia;

Marta Kianicová – Assoc. Prof.; Dean of the Faculty of Special Technology, Alexander Dubček University of Trenčín, Slovakia;

Alena Breznická – Vice-Dean for Quality, Development and Promotion of Studies, Department of Design and Special Engineering, Faculty of Special Technology, Alexander Dubček University of Trenčín, Slovakia;

Valery Topalidi – Associate Prof., Ph.D of Tashkent University Automobile and Road University, Tashkent, Uzbekistan;

Dimitrov Angel – prof. Technical University, Varna, Bulgaria;

Roland Lachmeier – Doctor of Engineering, Technical University, Hanover, Germany;

Alexey Antoshkiv – Doctor of Philosophy, Doctor of Eng., Brandenburg University of Technology, Germany;

Yuliya Gorb – Associate Professor, Department of Mathematics, University of Houston;

Oleg Sergienko – Associate Professor, Engineering Institute of Universidad Autonoma de Baja California.

ЗМІСТ**Секція 1. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ***Корогодський В. А., Макаренко М. Г., Калашник Є. А.*

Сучасні тенденції розвитку енергетики мобільних машин:
перехід від двигунів внутрішнього згоряння до гібридних систем
енергопостачання..... 12

Латвинський В.Д.

Сучасні та перспективні джерела енергії для електромобілів..... 17

Natalia Smetankina

Developing an approach to improving energy efficiency with the
use of electric motors..... 21

**Секція 2. РОБОЧІ ПРОЦЕСИ, ДИНАМІКА І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ
ПОКАЗНИКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА МАШИН***Макаренко М.Г., Шевченко І.О., Щербінський І.О.*

Цифровий двійник і модельно-прогнозне керування робочим
процесом дизельного ДВЗ у гібридних силових установках тракторів і
автомобілів 23

Макаренко М.Г., Корогодський В.А., Хомутов М.А., Стрижак Г.О.

Оптимізація паливної економічності та NO_x/PM у газодизельному
ДВЗ FPT NEF 6.7 на нестаціонарних навантаженнях на основі
системного моделювання..... 27

Шатохін В.М., Красніков С.В.

Синтез параметрів муфти із попереднім натягом для обмеження
крутильних коливань двовальних дизелів 32

Євсєєва Н.О., Тимошенко В.О., Сухонос Р.Ф.

Методика дослідження впливу динамічного наддуву
на показники бензинового двигуна швидкісного мотоцикла 37

Нерубацький В.П.

Підвищення енергоефективності роботи тягових електродвигунів
локомотивів на основі рекуперативного гальмування та інтеграції
систем накопичення енергії 39

Нікітченко І.М., Трофіменко Д.О.

Дослідження взаємозв'язку між тепловими втратами та часом
роботи пневмодвигуна із золотниковим механізмом газорозподілу 42

Мінчев Д.С., Кузьменко А.П., Пашков В.Г., Швидич В.А.

Особливості моделювання робочого процесу двигуна 6ЧН8,4/8,96
(BMW M54B30) online засобом Blitz-Pro 46

Авраменко А.М., Нікітченко І.М., Тесленко Е.В., Круговий А.О.

Спосіб роботи поршневого теплового двигуна 51

<i>Афонін В.М., Авраменко А.М., Кривда В.В., Колеснікова Т.М.</i> Розпилювач паливної форсунки дизельного двигуна	53
<i>Авраменко А.М., Воронков О.І., Філатова Г.Є., Яцкевич О.О., Воробйов Д.В.</i> Зниження температури відпрацьованих газів двигуна	55
<i>Корогодський В.А., Макаренко М.Г., Стрижак Г.О.</i> Аналіз впливу зміни ходу поршня на показники газообміну та ефективні показники двигуна 1Д 8,2/8,7	57
<i>Тарандушка Л.А., Шльончак І.А., Тарандушка І.П., Ключко Р.В.</i> Розробка алгоритму визначення пасажирських поїздок та кореспонденцій в умовах безготівкового розрахунку	62

Секція 3. КОНСТРУКЦІЯ МЕХАНІЗМІВ, МАШИН ТА КОНСТРУКЦІЙНИ МАТЕРІАЛИ

<i>Лалазарова Н.О, Литовка Д.Є., Афанасьєва О.В.</i> Підвищення експлуатаційних властивостей колінчастих валів з високоміцного чавуну	65
<i>Нерубацький В.П., Геворкян Е.С., Комарова Г.Л.</i> Метрологічне забезпечення контролю якості та аналіз фізико- механічних властивостей композитів ZrO_2-WC і ZrO_2-SiC для підвищення надійності тягових електродвигунів	67
<i>Нерубацький В.П., Геворкян Е.С., Комарова Г.Л., Волошина Л.В., Лобойко М.О.</i> Розроблення енергоефективних конструкційних матеріалів на основі наноструктурної кераміки $ZrO_2(3 \text{ мол.}\% Y_2O_3)-WC$ методом електроконсолідації для потреб промисловості.....	71

Секція 4. ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА, ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ЕНЕРГОСИСТЕМ, ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

<i>Воропай О.В., Єгоров П.А., Карпенко В.О.</i> Забезпечення безперебійної роботи FDM 3D принтерів в умовах нестабільного централізованого енергопостачання	75
<i>Фурсова Т.М.</i> Формалізація завдань експлуатаційного забезпечення енергетичних установок електростанцій для оптимізації їх роботи	80

Секція 5. НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ДІАГНОСТИКА, ВИПРОБУВАННЯ, ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА НАДІЙНІСТЬ ЕНЕРГОСИСТЕМ. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Яцела С.В., Синенко В.В.

Оптимізація режимів роботи систем електропостачання на основі діагностики технічного стану елементів розподільчих мереж 82

Тхор Є.А., Слинько Г.І.

Методика діагностики режимів роботи двигуна внутрішнього згорання за аудіосигналом з використанням нейронної мережі..... 84

Орищенко С.В.

Діагностика технічного стану двигуна внутрішнього згорання..... 87

Семененко Ю.О.

Оцінка необхідності застосування моделей для аналізу режимів роботи розподільних мереж..... 90

Секція 6. ЕЛЕКТРИЧНІ, ГІБРИДНІ, АЛЬТЕРНАТИВНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ, ЛОГІСТИЧНІ МЕРЕЖІ ТА ІНФРАСТРУКТУРА, ГЕНЕРАЦІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

Багач Р.В., Смирнов О.П.

Інтелектуальна система автоматичного заряджання електромобілів із застосуванням самокерованих роботів 96

Смирнов О.П., Борисенко А.О., Мовчан Н.Г.

Дослідження методів терморегулювання акумуляторних батарей електромобілів..... 100

Авраменко А.М., Кривда В.В., Левтеров А.М.

Вплив режиму роботи паливного елемента з протоно-обмінною мембраною на його характеристики 103

Нікітченко І.М., Кляузер С.А.

Дослідження роботи чотиритактного пневмодвигуна для малогабаритних транспортних засобів 106

Петренко А.В., Забіяка Д.О.

Підвищення енергоефективності промислових електромереж шляхом інтелектуального керування накопичувачами 109

Задіранов В.С.

Комплексна 3D модель для аналізу теплового впливу тунелю метрополітену на роботу вертикальних ґрунтових теплообмінників 113

Селіванов І.О.

Аналіз теплових режимів акумуляторних батарей електромобілів у міських умовах експлуатації..... 118

Балака М.М., Лисак С.І., Федішин Б.М.

Оптимізація гібридних енергетичних систем будівельної техніки..... 122

**Секція 7. ПРОЦЕСОРИ І МІКРОЕЛЕКТРОНІКА В ЕНЕРГЕТИЧНИХ
УСТАНОВКАХ. ПРОГРАМУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК І ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.
ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. ЕЛЕКТРОННЕ ОБЛАДНАННЯ
ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ І ІНШИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

<i>Нечаус А.О., Алієв Б.М.</i>	
Перспективні напрями вдосконалення тягових двигунів електромобілів	125
<i>Нечаус А.О., Божко А.В.</i>	
Дослідження способів підвищення питомої потужності тягових інверторів електромобілів	127
<i>Нечаус А.О., Журавльов Є.І.</i>	
Дослідження інтегрованого бортового зарядного пристрою електромобіля	129
<i>Нечаус А.О., Корощенко А.Ю.</i>	
Дослідження резонансних компенсаційних схем трифазних бездротових зарядних пристроїв електромобілів	131
<i>Нечаус А.О., Красильников Є.В.</i>	
Порівняльний аналіз технічних рішень суміщених дротових/ бездротових зарядних пристроїв електромобілів	133
<i>Нечаус А.О., Кушнарєнко М.Є.</i>	
Порівняльний аналіз схемних рішень двонаправлених неізовльованих перетворювачів зарядних систем електромобілів	135
<i>Нечаус А.О., Сербінов І.А.</i>	
Дослідження ізовльованих двонаправлених перетворювачів гібридних електричних систем електромобілів	137
<i>Грицук В.Ю., Грицук Ю.В.</i>	
Формування бази даних Logged Vehicle Data для машинного навчання в автомобільному сервісі	140
<i>Ярута В.О.</i>	
Двонапрявлені DC-DC перетворювачі: особливості та перспективи	144

**Секція 8. ТРАДИЦІЙНІ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ПАЛИВА
ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ**

<i>Худяков І.В., Грицук І.В., Погорлецький Д.С., Черненко В.В.</i>	
Традиційні та альтернативні види палива для автотранспорту: порівняльний аналіз та технологічний прогноз на 2026 рік	147
<i>Шалапко Д.О., Тарандушка Л.А., Тарандушка І.П., Мельник О.Г.</i>	
Вплив надмалих добавок водню в паливопроводі високого тиску на фазування згоряння дизельного двигуна	149

<i>Oleksii Lysytsia, Illia Petukhov, Taras Mykhailenko, Artem Kovalov</i> CFD modeling of hydrogen leakage in the fuel system of an aircraft hydrogen engine.....	151
---	-----

**Секція 9. КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ. СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО
ПРОЄКТУВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТНИХ
ЗАСОБІВ. КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ
СИСТЕМАХ І МАШИНАХ**

<i>Кононихін О.С., Малік Д.О., Моїсеєнко Р.С.</i> Структурно-логічна схема інформаційної технології вибору сенсорних вузлів для інтелектуальних паркувальних систем на основі методів FUZZY BWM і FUZZY MARCOS	154
<i>Янютін Є.Г., Горлов Я.В., Воронай О.В., Шарапата А.С., Єгоров П.А.</i> Програмне торпедування свердловин з метою ліквідації прихватів бурових колон.....	158
<i>Плахотний О.П., Йовченко А.В., Костьян Н.Л.</i> Визначення теплофізичних параметрів призматичних LiFePO ₄ акумуляторів на основі зворотної задачі тепло переносу	163

**Секція 10. ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ.
ЕНЕРГЕТИКА І НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ.
ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ**

<i>Гарбуз М.О.</i> Аналіз перспектив розвитку автономних систем освітлення пішохідних переходів в Україні	167
<i>Чернихівська А.В.</i> Інтеграція альтернативних джерел енергії та енергозберігаючих технологій у готельному секторі в контексті сталого розвитку	170
<i>Погорлецький Д.С., Гришук І.В., Худяков І.В.</i> Покращення екологічних показників транспортних засобів під час використання системи теплової підготовки.....	174
<i>Кириллова О.В., Кириллова В.Ю.</i> Методологічні передумови формування інвестиційної асиметрії декарбонізації транспорту: роль підходів TTW та WTW	179
<i>Романов Б.М.</i> Методика оцінювання локального теплового впливу транспортних енергетичних установок у щільній забудові	184

Секція 11. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ КОНСТРУКЦІЇ, МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ В БУДІВНИЦТВІ

<i>Кузнєцов В.А., Пастухова С.В.</i> Особливості «теплових містків» та інженерно-конструктивні методи зниження їх впливу на енергоефективність житлових будівель	188
<i>Гапонова Л.В.</i> Системний аналіз методів та прийомів, що реалізують мінімізацію експлуатаційних енерговитрат житлової будівлі	194
<i>Орел Є.Ф., Никитинський А.В., Ковальов М.О.</i> Теплотехнічна ефективність будівельних конструкцій: сучасні матеріали та технології пасивного й активного домобудування	197
<i>Трикоз Л.В., Сташко М.В., Камчатна С.М.</i> Способи повторного використання мінеральної вати у виробництві енергоефективних конструкцій	200
<i>Oksana Pustovoitova, Armen Atynian, Oleksandr Gvozdiuk</i> Strengthening reinforced concrete structures with composite materials	203

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_x, твердих частинок (PM) і CO₂; (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_x/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.

Такі двигуни зручні в керуванні та можуть безпосередньо підключатися до акумуляторів. Регулювання швидкості здійснюється за допомогою перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією. Крім того, механічне регулювання швидкості, наприклад із використанням коробки передач, також сприяє зменшенню втрат електроенергії.

Разом із вдосконаленням електродвигунів, перспективним напрямом розвитку електротранспорту є застосування паливних елементів як альтернативного джерела електричної енергії [4]. Принцип їхньої роботи близький до принципу дії акумуляторів: у процесі застосовується чистий водень як паливний компонент і чистий кисень як окисник (рис. 1).

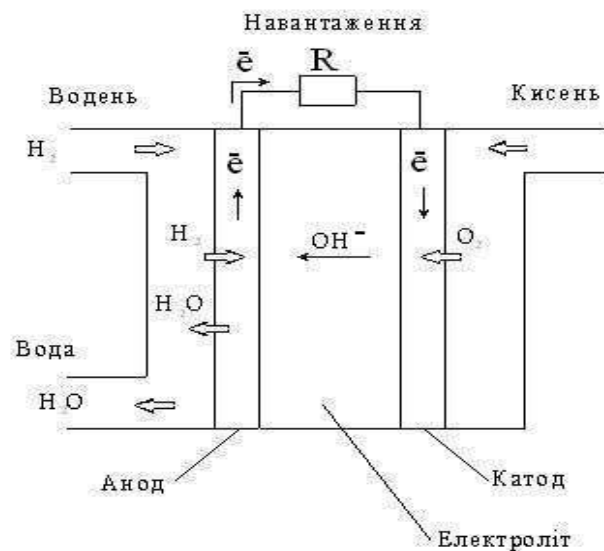


Рисунок 1 – Схема роботи паливного елемента

Гази проходять крізь пористий матеріал і взаємодіють в електролітному середовищі, у результаті чого утворюється постійний електричний струм. Кінцевим продуктом реакції є вода, при цьому також виділяється тепло.

Застосування паливних елементів в електромобілях має низку переваг. Паливо не згорає, а безпосередньо перетворюється на електричну енергію, що сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля. Відсутня потреба у складній системі охолодження, а сам процес роботи відбувається практично безшумно. Крім того, можливість створення установок різної потужності значно розширює сферу їх використання [5].

Сьогодні коефіцієнт корисної дії (ККД) паливних елементів перевищує 35 %. Це означає, що більше третини енергії, закладеної у використаному паливі, перетворюється на корисну електричну енергію, а не втрачається у вигляді тепла. Якщо до системи додатково застосовувати тепловий насос для повторного використання виділеного під час роботи тепла, сумарний ККД енергетичної установки може сягати вражаючих 94 %. Такий підхід дозволяє значно підвищити ефективність використання палива і робить паливні елементи більш привабливими для широкого впровадження в електротранспорті. У

перспективі також розглядається можливість використання альтернативних видів палива для цих елементів, таких як водень, метанол або біопаливо, що може зменшити залежність від викопних джерел енергії та знизити шкідливі викиди.

Сучасні електромобілі здебільшого оснащуються літій-іонними батареями, які відрізняються високою енергетичною щільністю, тривалим ресурсом циклів заряджання та відносно невеликою вагою, а також оснащені передовими системами термостабілізації для підтримання продуктивності в широкому діапазоні температур [6]. Це дозволяє електромобілям забезпечувати більший пробіг на одному заряді та підтримувати динамічні характеристики, порівнянні з автомобілями на традиційних двигунах внутрішнього згоряння. Проте науковці продовжують шукати ще більш ефективні і економічні рішення для акумуляторів, і серед найбільш перспективних варіантів для електромобілів майбутнього розглядаються натрій-сірчані батареї. Вони відзначаються високим ККД, стійкістю до екстремальних температур, великою кількістю циклів заряджання та потенційно нижчою собівартістю виробництва у порівнянні з літій-іонними батареями.

Під час роботи електродвигуна, коли електричний струм проходить через коло акумулятора, відбуваються хімічні реакції, що забезпечують накопичення і вивільнення енергії всередині батареї. Наприклад, у натрій-сірчаніх акумуляторах утворюється полісульфід натрію як кінцевий продукт реакції, що дозволяє підтримувати стабільну роботу електромотора та ефективно перетворення електричної енергії на механічну (рис. 2). Дослідження цих процесів допомагають оптимізувати конструкцію батарей і підвищувати їхню загальну ефективність та безпеку.

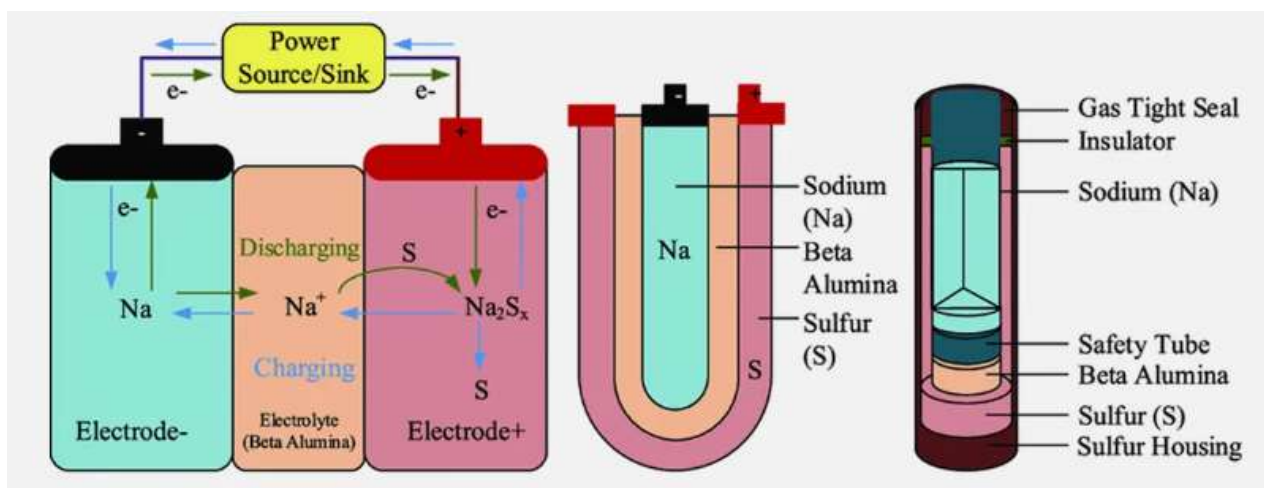


Рисунок 2 – Схема будови та принципу роботи натрій-сірчаної (Na-S) акумуляторної батареї

Конструкція натрій-сірчаної акумуляторної батареї (Na-S) включає електрохімічну систему з рідким натрієм як анодом і рідкою сіркою як катодом, розділеними твердим керамічним електролітом на основі β -алюмінію. Цей електроліт проводить виключно іони Na^+ та є електронним ізолятором.

Під час розряду натрій окиснюється з утворенням іонів Na^+ , які мігрують через електроліт до катодної області та взаємодіють із сіркою з утворенням полісульфідів натрію (Na_2S_x). Електрони при цьому проходять через зовнішнє коло, забезпечуючи живлення навантаження. У режимі заряджання процеси відбуваються у зворотному напрямку.

Батарея має конструктивні елементи, такі як внутрішня трубка з β -алюмінію, зони для розміщення натрію і сірки, ізоляційні елементи та герметичний корпус. Для нормальної роботи батареї необхідна підвищена температура експлуатації (приблизно 300–350 °C), що підтримує реагенти в рідкому стані та забезпечує високу іонну провідність.

Завдяки цій будові та електрохімічним процесам Na–S акумулятор відзначається високою енергетичною щільністю та ефективністю перетворення енергії. Дорожні випробування показали, що електрофургон із натрій-сірчанним акумулятором може на одній зарядці долати від 96 до 120 км, залежно від стану дороги та умов руху. На даний момент питома енергія одного елемента натрій-сірчаного акумулятора становить 550 Вт·год. Для повного живлення електромобіля достатньо 90 таких елементів.

У провідних автомобільних країнах, серед яких США, Японія, Німеччина та Франція, вже пройшли випробування гібридних електромобілів, що поєднують роботу бензинового та електричного двигунів.

Висновки

З усього вищезгаданого можна зробити висновок, що в майбутньому паливні елементи можуть стати перспективним джерелом електричної енергії. Принцип їхньої роботи подібний до акумулятора: як паливо використовується чистий водень, а як окислювач – чистий кисень.

Література

1. Двадненко В. Удосконалення системи рекуперативного гальмування м'якого гібридного автомобіля. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2025. № 28. С. 58–65. DOI: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2025.28.0.62>.
2. Латвинський В. Д., Багач Р. В. Дослідження літій-іонних батарей для експлуатації електромобілями при різних температурних умовах. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»*. 2024. № 1 (30). С. 58–64. DOI: <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2024-1-58-64>.
3. Латвинський В. Д., Багач Р. В. Порівняльний аналіз характеристик тягових акумуляторів для сучасних електромобілів. *Сучасне автомобілебудування, автотехнічна експертиза, експлуатація автомобільного транспорту та підготовка фахівців галузі транспорт* : зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 22–23 жовт. 2024 р.). Харків, 2024. С. 267–271.
4. Латвинський В. Д. Перспективи і розвиток водневих електромобілів. *Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії* : зб. тез та доп. міжнар. конф. (Харків, 11–12 берез. 2024 р.). Харків : ФОП Бровін О. В., 2024. С. 224–227. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/21368>.
5. Кравчик Ю., Каткова Т. Інноваційні рішення для енергоефективного виробництва водню: перспективи для України. *Herald of Khmelnytskyi National University*.

Economic Sciences. 2024. Vol. 336, no. 6. P. 613–618. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-336-92>.

6. Латвинський В. та ін. Дослідження та оптимізація температурного режиму літій-іонних акумуляторів у складі тягової батареї електромобіля. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2025. № 27. С. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2025.27.0.7>.

UDC 621.311

DEVELOPING AN APPROACH TO IMPROVING ENERGY EFFICIENCY WITH THE USE OF ELECTRIC MOTORS

Natalia Smetankina, DSc, Professor, Head of Department of Vibration and Thermostability Studies, Anatolii Pidhornyi Institute of Power Machines and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine,
e-mail: nsmetankina@ukr.net, ORCID: [0000-0001-9528-3741](https://orcid.org/0000-0001-9528-3741)

The level of energy efficiency is influenced by the quality of electricity supply and the way energy is used. The problem of increasing the efficient and rational use of resources requires an integrated approach to energy saving and energy efficiency management [1–3]. It is also related to environmental safety [4–6], taking into account the reliability control of the system as a whole [7, 8]. The reliability calculation model taking into account control actions is based on the following assumptions and preconditions. Calculation of reliability indicators is carried out in accordance with the design documentation. Power equipment elements of serial production are considered. In case of failure to achieve the required level or other technical characteristics and when the cause of failure is identified, design changes are carried out. Changes in structural elements are complex, i.e. they affect not only the element, the cause of failure of which is identified, but also other elements of the design, directly related to each other by functional dependence. It should be taken into account that new changes in design parameters correlate with the element whose cause of failure is known and directly affect the output characteristic of this element and, thus, indirectly affect the output characteristic of the product as a whole.

The purpose of the study is to assess the efficiency of electricity use by compensating for reactive power, and to consider the ways and methods of compensation, taking into account the exclusion of resonant phenomena in the network.

In order to increase the efficiency of electricity use with the aim of minimizing losses under conditions of restrictions on maximum power consumption, new technical means are used to improve energy characteristics. Methods of optimizing the power supply system to improve energy efficiency: ensuring sufficient cable diameter, appropriate power to reduce active losses, operating transformers at a sufficient load (more than $40 \div 50\%$ of the rated power), using transformers with

increased efficiency or reduced losses, placing equipment requiring high current as close as possible to power sources. The following methods for improving the energy efficiency of electric motors are proposed: use of energy efficient motors, selection of optimal rated motor power and control of power supply quality.

Conclusions

Replacing existing motors with energy-efficient and variable-speed motors is one of the ways to improve the energy efficiency of energy-consuming installations. The first step is to optimize the entire system that uses electric motors as a whole. The second step is to optimize the individual motors within the system based on the newly defined power requirements using one or more methods as applicable.

References

1. **Kuznetsov B. I. et al.** Method for design of two-level system of active shielding of power frequency magnetic field based on a quasi-static model. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2024. No. 2. P. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.05>.
2. **Malykhina A. I. et al.** Stationary problem of heat conductivity for complex-shape multilayer plates. *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series “Mathematical modeling. Information technology. Automated control system”*. 2019. Vol. 41. P. 46–54. DOI: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2019-41-05>.
3. **Гонтаровський П. П. та ін.** Дослідження напружено-деформованого стану паливного бака вафельної конструкції ракети-носія. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. Дніпро, 2019. Вип. 29. С. 91–102.
4. **Smetankina N. V. et al.** Optimal design of layered cylindrical shells with minimum weight under impulse loading. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) : Conference Proceedings (13–17 September, 2021)*. IEEE, 2021. P. 506–509. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.956998>.
5. **Alyokhina S. et al.** Methodology for determining the thermal and thermal-stress states of a concrete storage container for spent nuclear fuel for assessment of its service life. *Nuclear and Radiation Safety*. 2021. Vol. 4, no. 6. P. 33–39. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4\(92\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4(92).05).
6. **Kurennov S., Smetankina N.** Stress-strain state of a double lap joint of circular form. Axisymmetric model. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering-2021. ICTM 2021 : Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham : Springer, 2022. Vol. 367. P. 36–46. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_4.
7. **Merculov V. et al.** Improving the accuracy of the behaviour simulation of the material of the turbojet aircraft engine fan rotor blades in the event of a bird strike by using adapted finite element computational model. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 59, part 3. P. 1797–1803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.381>.
8. **Merculov V. et al.** Peculiarities of the modelling of the bird dynamic impact on fan blades of an aircraft turbojet engine at operating modes. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering-2021. ICTM 2021 : Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham : Springer, 2022. Vol. 367. P. 462–473. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_39.

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 турбонадуву 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 транзєнта. 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 NOx та PM на перехідних режимах стає ще більш загостреним. З одного боку, EGR знижує NOx 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 NOx 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 $SR_{max} = 70\%$ 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 короточасних 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 транзйентного 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 рампи-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 транзйентно-орієнтовану задачу багатокритеріальної оптимізації газодизельного режиму з урахуванням динаміки систем EGR і VGT у межах system-level моделі; обґрунтовано доцільність введення транзйентних 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.pecs.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: vsevavr@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

недосконалістю моделей самих пристроїв, специфікою моделей машинних агрегатів з ДВЗ як багатомасових систем з кількома нелінійностями. Використовувані методи аналізу нелінійних коливань не враховують особливостей зазначених моделей, що ускладнює розв'язання задач синтезу та оптимізації.

2. У доповіді запропоновано вільний від зазначених недоліків метод синтезу параметрів пружної муфти з попереднім натягом як засобу обмеження надмірних коливань у нелінійних моделях машинних агрегатів із двовальними дизелями. У його основі лежить ефективний алгоритм розв'язання задач аналізу, що використовує гармонічну лінеаризацію для інтегральних рівнянь руху, записаних за допомогою імпульсно-частотних характеристик (ІЧХ) [1]. Головна перевага такого підходу для розв'язання задач синтезу та оптимізації в тому, що кількість рівнянь руху дорівнює числу нелінійностей та трудомісткість розв'язання задачі аналізу практично не залежить від числа степенів вільності моделі. Розроблений метод використано для вибору оптимальних параметрів муфти дизеля ЗТД з метою зниження небезпечних динамічних навантажень у його силовому ланцюзі. Наведено результати експериментальних досліджень.

3. У більшості випадків моделі силових передач транспортних машин з ДВЗ мають значну кількість степенів вільності, декілька нелінійних елементів, знаходяться під періодичним впливом складного негармонічного характеру. Застосування ІЧХ лінеаризованих моделей дозволяє записати рівняння руху зазначених систем у формі інтегральних рівнянь типу Гаммерштейна, відносно кутів закручування нелінійних з'єднань [1]

$$\mathbf{y}(t) = \int_0^T \mathbf{\Phi}(t - \tau) \mathbf{f}(\mathbf{y}) d\tau + \mathbf{g}(t), \quad (1)$$

де $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_s(t)]^T$ – вектор кутів закручування нелінійних з'єднань; $\mathbf{f}(\mathbf{y}) = [f_1(y_1), f_2(y_2), \dots, f_s(y_s)]^T$ – нелінійна вектор-функція; $\mathbf{\Phi}(t - \tau)$ – матриця ІЧХ лінеаризованої моделі; $\mathbf{g}(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_s(t)]^T$ – вектор-функція реакцій лінеаризованих нелінійних з'єднань на зовнішнє збудження

$$g_j(t) = \sum_{i=1}^k \int_0^T \psi_{j,i}(t - \tau) M_i(\tau) d\tau; \quad (2)$$

$M_i(\tau)$ ($i = \overline{1, k}$) – збурюючі моменти; $\psi_{j,i}(t - \tau)$ ($i = \overline{1, k}; j = \overline{1, s}$) – ІЧХ від i -ї маси до j -го лінеаризованого з'єднання; k – число збурюючих моментів; T – період коливань.

4. У динаміці машин широко розповсюджений метод гармонічної лінеаризації, що дозволяє визначати розв'язки з прийнятною для практики

точністю у разі моногармонічного збудження, якщо тільки система має резонансні або фільтруючі властивості. Використання рівнянь руху в інтегральній формі, записаних за допомогою ІЧХ, дозволяє набути економічної форми методу гармонічної лінеаризації. Як і при традиційному підході, розв'язки нелінійних інтегральних рівнянь при моногармонічному збудженні розшуковуються у вигляді

$$y_j(t) = A_j^0 + A_j^c \cos \omega t + A_j^s \sin \omega t \quad (j = \overline{1, s}), \quad (3)$$

де A_j^0 – середня деформація; A_j^c , A_j^s – відповідно косинусна і синусна амплітуди основної гармоніки деформації j -го нелінійного з'єднання.

Побудовано алгоритм знаходження A_j^0 , A_j^c , A_j^s . Принциповим є те, що при кожному обчисленні, так званої функції нев'язки [1], необхідно розв'язувати систему лінійних алгебраїчних рівнянь порядку $2s$. При традиційному підході це необхідно робити для системи порядку $2n$, де n – число узагальнених координат.

5. Конструкція використовуваної в двигунах 5ТДФ, 6ТД, 3ТД муфти з попереднім натягом в передачі між колінчастими валами така, що при підходящому виборі параметрів її можна використовувати як демпфер коливань [2]. Для цього необхідно, щоб точка зриву коливань зі збільшенням обертів лежала правіше точки зриву при зниженні обертів. Пружна характеристика такої муфти з урахуванням зазору, обумовленого технологічними зазорами в зубцях шестерень головної передачі, показана на схемі механічної моделі двигуна 3ТД (рис. 1).

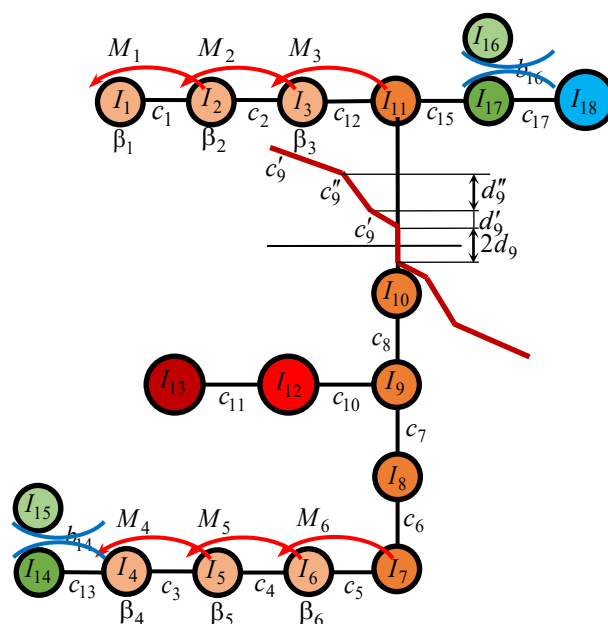


Рисунок 1 – Механічна модель машинного агрегату із дизелем 3ТД

З графіків рис. 2, а видно як реалізуються обмеження амплітуд коливань при зростанні та зниженні обертів. Тут ω^* і ω^{**} – частоти, при яких відбуваються стрибки відповідно з першої стійкої ділянки на другу (збільшення обертів) і з другої на третю (зменшення обертів). Представлено граничний випадок, коли $\omega^{**} = \omega^*$; штриховими лініями показані нестійкі гілки розв’язків.

На рис. 1. прийнято такі позначення: $I_1 \div I_3$, $I_4 \div I_6$ – відповідно циліндрові маси випускного і впускного валів; $I_7 \div I_{11}$ – шестерні головної передачі; I_{12} – компресор; I_{13} – турбіна; I_{14} – ступиця демпфера впускного валу; I_{15} , I_{16} – маховики демпферів; I_{17} – маховик двигуна у зборі зі зчепленням та жорстко пов’язана з ним ступиця демпфера випускного валу; I_{18} – гідрогальмо.

6. Сформульовано задачу динамічного синтезу параметрів муфти як задачу нелінійного програмування: варіюючи вектор її параметрів $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ (елементами вектора можуть бути і параметри моделі) необхідно домогтися того, щоб максимальна амплітуда пружного моменту в нелінійній муфті на частоті ω^{**} стала мінімальною

$$\min_{x \in X} A_M^{(3)}(x, \omega^{**}), \quad (4)$$

де X – область пошуку допустимих розв’язків, що задається у вигляді лінійних та нелінійних обмежень відносно параметрів, що варіюються.

7. Застосування демпферів дозволяє зменшити небезпечні динамічні навантаження рис. 2, б. Суттєвого ж зниження небезпечних коливань можна, проте, домогтися дешевшими і найпростішими конструкторськими заходами, якщо скористатися викладеним вище методом синтезу параметрів муфти.

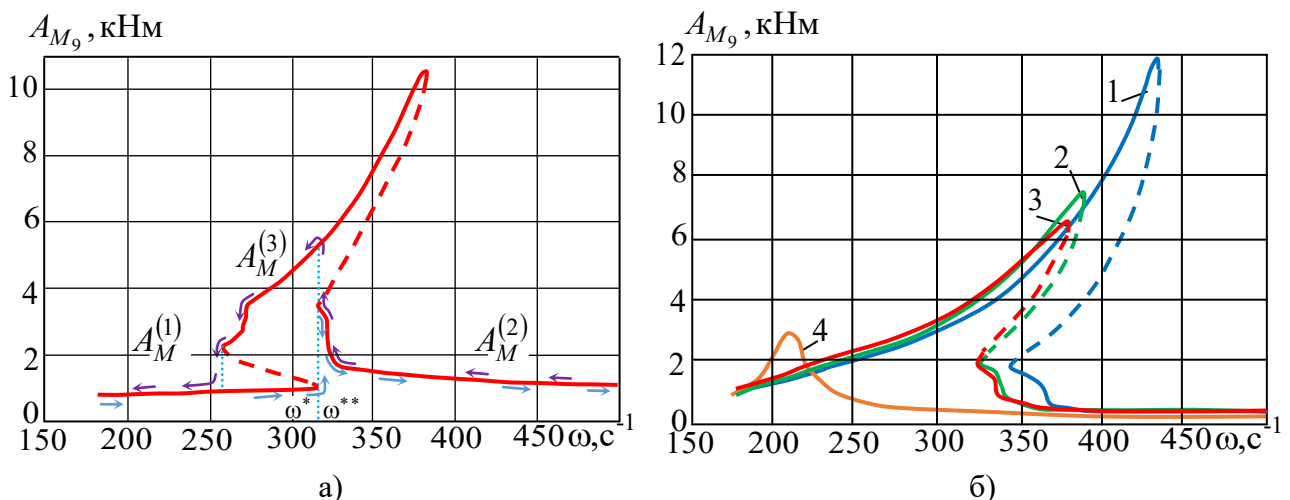


Рисунок 2 - Пружні моменти у нелінійній муфті: а) – при зростанні та зниженні обертів; б) – при відсутності демпферів 1; демпфер на впускному валу 2; два демпфера на впускному та випускному валах 3; лінійна модель без демпферів 4

На рис. 2, а представлені відповідні криві, що ілюструють зміну пружного моменту в муфті. Тепер і при збільшенні та при зниженні оборотів має місце обмеження амплітуд коливань. Без використання демпферів максимальний момент в цьому випадку вдається знизити до 5500 Нм, що підтверджує ефективність викладеного конструктивного прийому для зниження рівня небезпечних динамічних процесів.

Висновки

1. Запропоновано метод синтезу параметрів муфти із попереднім натягом як засобу обмеження крутильних коливань двовальних дизелів.

2. Задача динамічного синтезу зведено до розв'язання задачі нелінійного програмування.

3. Розроблено метод гармонічної лінеаризації для рівнянь руху нелінійних моделей машинних агрегатів з ДВЗ, записаних в інтегральній формі, який особливо ефективний при розв'язанні задач аналізу ітераційними способами а також синтезу та оптимізації.

4. Побудовано достовірну нелінійну динамічну модель машинного агрегату з дизелем ЗТД та здійснено оптимальний синтез її параметрів з метою зниження динамічних навантажень.

5. Наведено результати експериментальних досліджень та їх зіставлення з даними розрахунків.

Література

1. **Шатохін В. М.** Аналіз та параметричний синтез нелінійних силових передач машин : монографія. Харків : НТУ «ХПІ», 2008. 456 с.

2. **Шатохін В. М., Гранько Б. Ф., Соболев В. М.** Про вибір параметрів нелінійної пружної муфти як гасителя коливань у двовальних транспортних дизелях. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2021. Вип. 93. С. 118–127.

УДК 621.43.052

**МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ
ДИНАМІЧНОГО НАДДУВУ
НА ПОКАЗНИКИ БЕНЗИНОВОГО ДВИГУНА
ШВИДКІСНОГО МОТОЦИКЛА**

Євсєєва Наталія Олексіївна, канд. техн. наук, доцент кафедри АТДтаГЕУ,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
e-mail: korskovanat@ukr.net, ORCID 0000-0002-3398-6537

Тимошенко Владислав Олександрович, магістр, Національний університет
«Запорізька політехніка», e-mail: vladtimoaha0@gmail.com

Сухонос Роман Федорович, старший викладач кафедри АТДтаГЕУ,
Національний університет «Запорізька політехніка», e-mail: romevs@zp.edu.ua,
ORCID 0000-0001-9683-3389

Динамічний (швидкісний) наддув – це спосіб підвищення тиску у впускному тракті ДВЗ за рахунок набігаючого потоку повітря. Для його реалізації потрібні: власне швидкісний натиск (набігаючий потік); правильно спрофільований і розташований повітрозбірник.

Використання динамічного наддуву найбільш ефективно на атмосферних двигунах внутрішнього згорання наземних і літальних транспортних засобів, що рухаються на великих швидкостях (понад 140...200 км/год) [1–2].

Актуальність дослідження зумовлена потребою підвищення ефективності силових установок за умов одночасного зменшення їхніх масогабаритних характеристик, що набуває особливої важливості для потреб оборонно-промислового комплексу України. В сучасних умовах збройної агресії пріоритетного значення набуває розроблення та вдосконалення силових установок для військової техніки, зокрема безпілотних літальних апаратів, засобів розвідки та спеціальної техніки, де високі показники енергоефективності, надійності та мобільності є критично важливими для забезпечення обороноздатності держави.

Для дослідження впливу динамічного наддуву на показники бензинового двигуна швидкісного мотоцикла обрано двигун мотоцикла Kawasaki Ninja ZX-10R. Двигун рядний чотирициліндровий з рідинним охолодженням об'ємом 998 куб. см, розташованого поперек рами мотоцикла. Вісь колінчастого вала, вхідний вал та вихідний вал двигуна Ninja ZX-10R розташовані у трикутній формі, щоб зменшити довжину двигуна, тоді як генератор розміщений за рядом циліндрів, щоб зменшити ширину двигуна. Система випуску відпрацьованих газів зменшеного опору. Система впуску свіжого повітря зменшеного опору, з реалізацією динамічного наддуву. Фільтруючий елемент – віскозний паперовий. Система мащення з сухим картером [3].

Методика визначення впливу динамічного наддуву на показники бензинового ДВЗ швидкісного мотоцикла полягає в наступному:

– розрахувати величину динамічного наддуву шляхом знаходження динамічного тиску повітря при можливих швидкостях руху мотоцикла від 0 до 350 км/год;

– побудувати графік залежності динамічного тиску повітря рД від швидкості руху транспортного засобу v та апроксимацією знайти квадратичне рівняння, яке описує дану функцію;

– виконати тепловий розрахунок двигуна при роботі на номінальному режимі в комп'ютерній програмі Engine Calculation, а також при його наявності, при швидкості руху мотоцикла 100 км/год, 200 км/год, 300 км/год; розрахувати індикаторні та ефективні показники двигуна [4–5].

Динамічний наддув доцільно використовувати на транспортних засобах, які їздять/літають зі швидкістю понад 150 км/год. При менших швидкостях приріст динамічного тиску, а отже і ефективної потужності двигуна складають менше 1 %, а повітрязбірник значно погіршує аеродинамічний опір корпусу/кузова/фюзеляжу транспортного засобу, нівелюючи додаткову потужність. За результатами досліджень авторами встановлено, що при швидкості руху мотоцикла Kawasaki Ninja ZX10R $v = 300$ км/год на номінальному режимі, у порівнянні з $v = 0$ км/год, показники двигуна змінюються наступним чином – ефективна потужність двигуна N_e та середній ефективний тиск p_e збільшуються на 4,2 %; ефективна питома витрата палива g_e та ефективний ККД η_e залишаються незмінні; максимальний тиску робочого тіла за цикл p_{max} збільшується на 0,597 МПа (на 4,2 %); максимальна температура T_{max} робочого тіла за цикл залишається незмінною.

Література

1. Parry L., Könözy L., Temple C. Airbox design, analysis and improvement for a highperformance road racing sidecar. *Lect. Notes Mech. Eng.* 2018. P. 545–562. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-75677-6_48.
2. Kee R. J. et al. Prediction of Formula 1 Engine and Airbox Performance using Coupled Virtual 4-Stroke and CFD Simulations. *SAE Technical Papers.* 2003. DOI: <https://doi.org/10.4271/2002-01-3318>.
3. Kawasaki Ninja ZX-10R, Ninja ZX-10R ABS Motorcycle Service Manual. Kawasaki Heavy Industries, Ltd., 2015. 787 p.
4. Слинько Г. І., Сухонос Р. Ф., Слинько В. В. Тепловий і динамічний розрахунок ДВЗ : навч. посіб. з курс. проєктування. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2024. 130 с.
5. Тимошенко В. О. Дослідження впливу динамічного наддуву на показники бензинового двигуна швидкісного мотоцикла : магістерська робота. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2025. 71 с.

УДК 621.313

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ НА ОСНОВІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЇ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки,
Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: nerubatskyi@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4309-601X

Підвищення ефективності експлуатації тягових електродвигунів локомотивів є одним із найбільш актуальних напрямів розвитку сучасного залізничного транспорту, оскільки енергетичні витрати на тягу становлять істотну частку загальних експлуатаційних затрат. В умовах зростання вимог до енергоощадності, економічної доцільності та екологічної сталості транспортних систем особливого значення набувають технології, що забезпечують раціональне використання енергії в динамічних режимах руху [1].

Експлуатаційна ефективність тягових електродвигунів визначається не лише їхніми номінальними характеристиками, але й здатністю тягового електропривода функціонувати з мінімальними втратами в широкому діапазоні режимів, характерних для локомотивної тяги. Реальні умови роботи локомотивів супроводжуються частими змінами навантаження, переходами між режимами тяги, вибігу та гальмування, що зумовлює суттєвий вплив перехідних процесів на загальний енергетичний баланс [2]. За таких умов традиційні підходи, орієнтовані переважно на оптимізацію режимів тяги, не дозволяють повною мірою реалізувати потенціал підвищення енергоефективності. Значні резерви зниження енергоспоживання пов'язані з використанням кінетичної енергії рухомого складу, яка в класичних системах гальмування переважно розсіюється у вигляді теплових втрат. Саме тому застосування рекуперативного гальмування та інтеграція енергетичних накопичувачів розглядаються як перспективний шлях удосконалення тягових електроприводів локомотивів [3, 4].

Енергетичний потенціал режиму рекуперативного гальмування визначається не лише здатністю тягових електродвигунів працювати у генераторному режимі, але й умовами інтеграції цього процесу в загальну структуру тягового електропостачання. Реалізація рекуперації супроводжується складними електромагнітними та енергетичними процесами, пов'язаними з перерозподілом потужності між рухомим складом і контактною мережею, обмеженнями за рівнем напруги, а також нерівномірністю навантаження в межах тягових підстанцій [5, 6]. У практичних умовах частина відновлюваної енергії може залишатися невикористаною через недостатню здатність мережі приймати надлишкову потужність або через вимоги щодо забезпечення її стабільності.

Це знижує інтегральну ефективність рекуперативного гальмування та актуалізує необхідність пошуку технічних рішень, спрямованих на підвищення ступеня утилізації енергії, що генерується під час гальмування [7, 8].

У цьому контексті інтеграція енергетичних накопичувачів розглядається як системний інструмент підвищення ефективності керування енергетичними потоками в тяговому електроприводі. Накопичувальні пристрої виконують функцію буферизації енергії, забезпечуючи узгодження між її генерацією в процесі гальмування та подальшим використанням у режимах тяги, компенсації пікових навантажень або стабілізації параметрів контактної мережі [9, 10]. Такий підхід дозволяє мінімізувати втрати, пов'язані з вимушеним переходом до неенергоєфективних режимів розсіювання, а також створює передумови для реалізації адаптивних стратегій енергоменеджменту. У поєднанні з інтелектуальними системами керування це забезпечує можливість формування енергоєфективних тягових комплексів нового покоління, здатних у реальному часі оптимізувати режими роботи електродвигунів, силових перетворювачів і накопичувачів відповідно до змін експлуатаційних умов та інфраструктурних обмежень [11].

Слід також відзначити, що застосування накопичувальних систем має важливі експлуатаційні наслідки, які виходять за межі суто енергетичного ефекту [12, 13]. Зменшення навантаження на гальмівні резистори та механічні гальмівні пристрої сприяє підвищенню їхнього ресурсу та зниженню витрат на технічне обслуговування. Одночасно оптимізується робота тягових електродвигунів у перехідних режимах, оскільки накопичувачі можуть виконувати функцію буфера потужності, згладжуючи пікові струмові навантаження та підвищуючи стабільність роботи електропривода. Таким чином, інтеграція накопичувачів формує підґрунтя для комплексного підвищення надійності та ефективності тягових систем, що є особливо важливим для локомотивів, які працюють в умовах інтенсивних експлуатаційних циклів.

Технологічний розвиток силової електроніки, систем керування та накопичувальних елементів суттєво розширює можливості практичного впровадження таких рішень [14, 15]. Сучасні накопичувачі характеризуються здатністю працювати в режимах швидкого заряду-розряду, що є критично важливим для залізничного транспорту з його високою динамікою енергетичних процесів [16, 17]. Використання інтелектуальних алгоритмів керування потоками енергії дає змогу координувати роботу тягового електропривода на основі поточного стану системи, прогнозування навантажень і оптимізації енергетичних режимів. У результаті підвищується не лише ефективність рекуперативних процесів, але й загальна стійкість функціонування тягової мережі, що має важливе значення для розвитку енергоощадних залізничних коридорів та впровадження локомотивів нового покоління.

Отже, застосування рекуперативного гальмування у поєднанні з інтеграцією енергетичних накопичувачів є одним із найбільш ефективних напрямів підвищення експлуатаційної результативності тягових електродвигунів локомотивів. Такий підхід забезпечує зменшення питомих витрат електроенергії,

підвищення ступеня утилізації кінетичної енергії руху та оптимізацію режимів роботи тягового електропривода в умовах змінних навантажень. Крім безпосереднього енергетичного ефекту, інтеграція накопичувачів сприяє зниженню теплових і механічних навантажень на гальмівні системи, підвищенню ресурсу обладнання та покращенню надійності локомотивів у процесі тривалої експлуатації. У перспективі розвиток цих технологій, особливо в поєднанні з інтелектуальними системами керування та цифровими стратегіями оптимізації енергетичних потоків, створює підґрунтя для формування адаптивних, енергоефективних і технічно досконалих тягових систем нового покоління, що відповідають сучасним вимогам залізничного транспорту.

Література

1. **Нерубацький В. П.** Огляд технологічних рішень підвищення енергоефективності роботи безколекторних тягових двигунів локомотивів. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'2025* : зб. матеріалів XI міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 18–20 листоп. 2025 р.). Київ : НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2025. С. 118–119.
2. **Nerubatskyi V. P.** Analysis of the operating conditions and modes of locomotive traction motors. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Т. 30, № 4. С. 3–21. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i4.351425>.
3. **Ceraolo M. et al.** Energy storage systems to exploit regenerative braking in DC railway systems: Different approaches to improve efficiency of modern high-speed trains. *Journal of Energy Storage*. 2018. Vol. 16. P. 269–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.01.017>.
4. **Fayad A. et al.** Energy recovering using regenerative braking in diesel–electric passenger trains: Economical and technical analysis of fuel savings and GHG emission reductions. *Energies*. 2022. Vol. 15, iss. 1. 37. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010037>.
5. **Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A.** Features of the use recuperation braking on electric rolling stock of DC railways. *Рухомий склад нового покоління: із XX в XXI сторіччя* : тези III міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 22–23 листоп. 2023 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2023. С. 83–85.
6. **Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А., Веренко Л. І.** Особливості використання рекуперативного гальмування на електричному рухомому складі електрифікованих залізниць постійного струму. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. № 3 (додаток). С. 26–27.
7. **Hu H. et al.** A comprehensive protection scheme for regenerative braking energy utilization system in electrified railways. *Railway Engineering Science*. 2025. Vol. 33. P. 441–457. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00366-0>.
8. **Пієв І. et al.** Modeling of energy recovery processes in railway traction power supply systems. *Energy Reports*. 2024. Vol. 11. P. 5163–5171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2024.05.012>.
9. **Ghaviha N. et al.** Review of application of energy storage devices in railway transportation. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. P. 4561–4568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980>.
10. **Malozyomov B. V. et al.** Mathematical model for the study of energy storage cycling in electric rail transport. *World Electric Vehicle Journal*. 2025. Vol. 16, iss. 7. 357. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj16070357>.
11. **Gao Z. et al.** Energy-storage-based smart electrical infrastructure and regenerative braking energy management in AC-fed railways with neutral zones. *Energies*. 2019. Vol. 12, iss. 21. 4053. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12214053>.
12. **Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Khoruzhevskyi H. A.** Improving the traction properties of electric locomotives through the application of capacitive energy stores.

Інтелектуальні транспортні технології : матеріали 3-ї міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 22–23 листоп. 2022 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2022. С. 190–191.

13. **Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A.** Application of energy storages on suburban electric rolling stock. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2024)* : матеріали XVI міжнар. наук.-практ. конф. (Одеса, 29–31 травня 2024 р.). Одеса : ХДМА, 2024. С. 383–384.

14. **Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A.** Energy efficient ways of using energy accumulators in the Smart Grid concept. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України.* 2023. Вип. 66. С. 11–15. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.66.011>.

15. **Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A.** Scheme for the transmission of recovery electrical energy between rolling stock with energy storages. *Технологія-2024* : матеріали XXVII міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 24 травня 2024 р.). Київ : СНУ імені В. Даля, 2024. С. 178–179.

16. **Lin L. et al.** Train regenerative braking energy management strategy considering battery state of charge. *Sustainable Energy, Grids and Networks.* 2025. Vol. 43. 101786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101786>.

17. **Szelağ A. et al.** Hybrid energy storage system for regenerative braking utilization and peak power decrease in 3 kV DC railway electrification system. *Electronics.* 2025. Vol. 14, iss. 9. 1752. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14091752>.

УДК 641.43

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТЕПЛОВИМИ ВТРАТАМИ ТА ЧАСОМ РОБОТИ ПНЕВМОДВИГУНА ІЗ ЗОЛОТНИКОВИМ МЕХАНІЗМОМ ГАЗОРОЗПОДІЛУ

Нікітченко Ігор Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри ДВЗ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: igor.nikitchenko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0741-3177

Трофіменко Дмитро Олександрович, асис. Кафедри ДВЗ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: trofimenko.dmytro2002@gmail.com, ORCID: 0009-0003-5480-0775

Тема теплових втрат у пневмодвигуні є малодослідженою у зв'язку із відсутністю універсальних розрахункових методик, які враховують конструкційні особливості кожного двигуна [1, 2]. Таким чином, відсутнє підґрунтя для подальшого зменшення теплових втрат, що характеризують кількість теплоти, що не перетворюється у корисну роботу.

Метою є визначення ефективних режимів роботи пневмодвигуна завдяки встановленню залежності частки теплових втрат від часу та ККД механічних втрат.

Предметом дослідження є вплив часу, необхідного для здійснення 1 повного робочого циклу, та ККД механічних втрат на частку теплових втрат у пневмодвигуні.

Дане дослідження є продовженням наукової роботи, яка зосереджена на темі теплопередачі у пневматичному двигуні. У межах даної роботи, колектив авторів [3] провів розрахункове дослідження на основі закону Джоуля для визначення кількості теплоти, яка надходить до стінок робочої камери пневматичного двигуна.

На основі відомого значення кількості теплоти, що надходить у стінки робочої камери здійснюється розрахунок частки теплових втрат, яка вказує кількість теплоти, що не перетворюється у корисну роботу, %

$$\varphi_{ст} = \Sigma Q_{Дж} / l_{ад} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $\Sigma Q_{Дж}$ – сумарна кількість теплоти, що надійшла до стінок робочої камери пневмодвигуна протягом 1 повного робочого циклу за законом Джоуля, Дж

$l_{ад}$ – адіабатична робота за 1 повний робочий цикл пневмодвигуна, Дж.

Автори встановили, що α -моделі Г. Вошні є найбільш точною, тому прийнято рішення використати цю модель для дослідження залежності частки теплових втрат від часу та механічних втрат у пневмодвигуні.

У результаті розрахунку отримано значення сумарної кількості теплоти $\Sigma Q_{Вошні}$, що надійшла до стінок робочої камери за 1 повний робочий цикл (рис. 1).

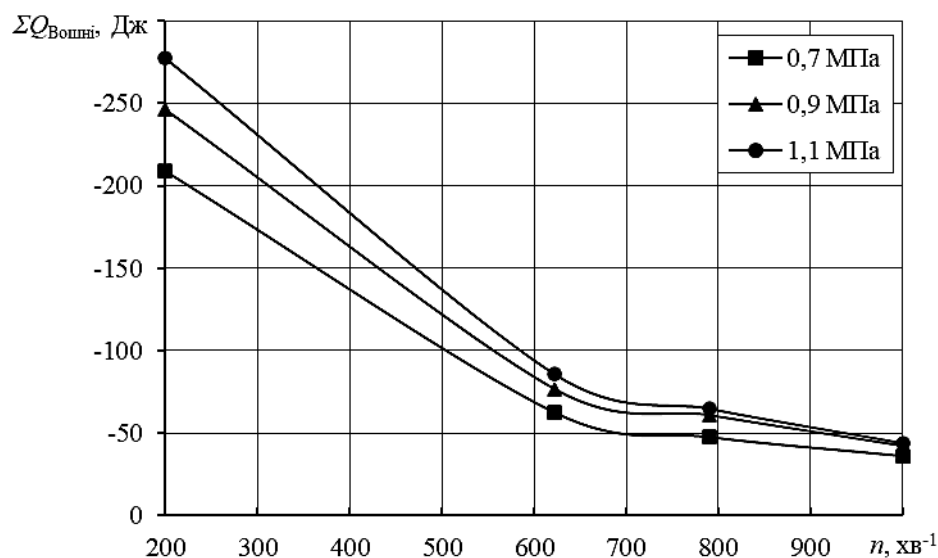


Рисунок 1 – Графік залежності кількості теплоти за α -моделлю Г. Вошні відповідно до режиму роботи пневматичного двигуна

Як видно із рис. 1, кількість теплоти, що надійшла до стінок робочої камери, зменшується зі збільшенням частоти обертання вала пневмодвигуна із золотниковим газорозподілом повітря.

Із використанням рівняння (1) розраховано частку теплових втрат для кожного режиму роботи пневмодвигуна (рис. 2).

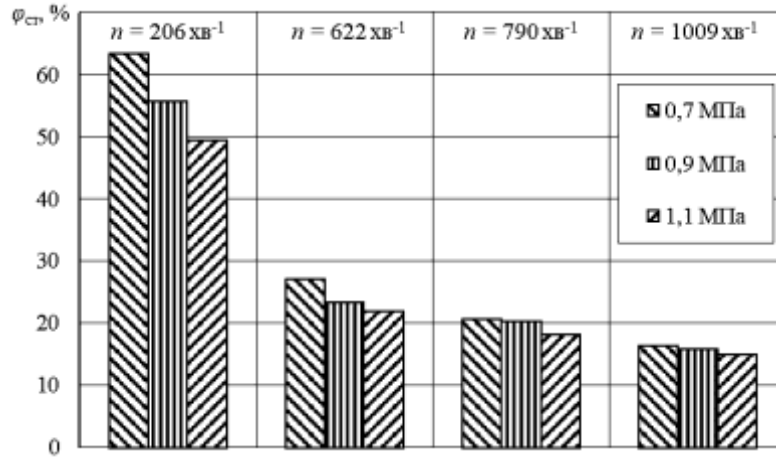


Рисунок 2 – Графік залежності частки теплових втрат $\varphi_{ст}$ від режиму роботи пневматичного двигуна

Для встановлення взаємозв'язку між процесами, вирішено провести розрахунок часу, необхідного для виконання пневмодвигуном повного робочого циклу [2, 4], с

$$\tau = 360 / (n \cdot \delta), \quad (2)$$

де n – частота обертання колінчастого валу, $хв^{-1}$.

У результаті розрахунку, встановлено, що частка теплових втрат зменшується зі зменшенням часу, необхідного для здійснення 1 повного робочого циклу рис. 3.

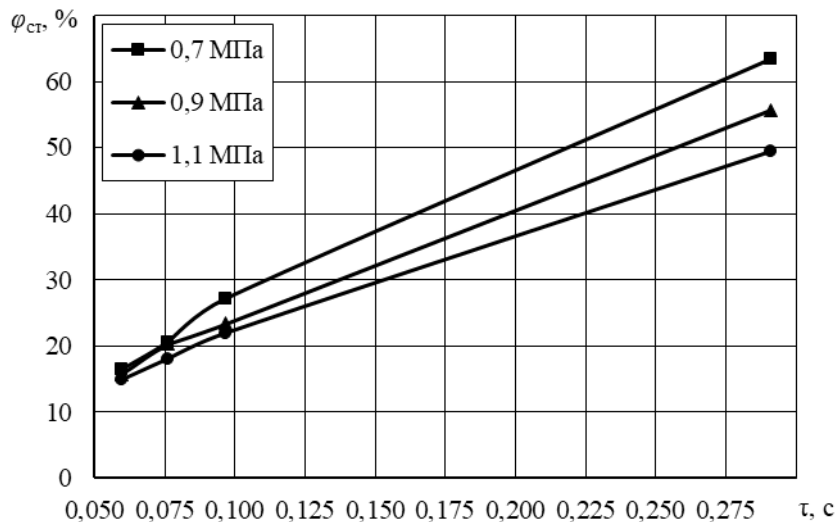


Рисунок 3 – Графік залежності частки теплових втрат $\varphi_{ст}$ від часу, необхідного для виконання 1 повного робочого циклу на різних режимах роботи

Таким чином, зі збільшенням частоти обертання колінчастого валу зменшується тривалість 1 повного робочого циклу і, відповідно, зменшується

проміжок часу, протягом якого відбувається теплообмін між робочим тілом та стінками робочої камери.

Також відомо, що під час роботи пневмодвигуна із золотниковим механізмом виникають деякі гідравлічні втрати у каналі, що сполучає об'єм циліндру із золотником, та механічні втрати на тертя. Для дослідницької роботи вирішено дослідити залежність частки теплових втрат від ККД механічних втрат [2, 4]

$$\eta_M = N_e / N_i. \quad (3)$$

де N_e – ефективна потужність пневмодвигуна, кВт;

N_i – індикаторна потужність пневмодвигуна, кВт.

Результати розрахунку наведено на рис. 4.

Як видно із рис. 4, частка теплових втрат зростає зі збільшенням ККД механічних втрат на тертя деталей пневмодвигуна із золотниковим механізмом газорозподілу.

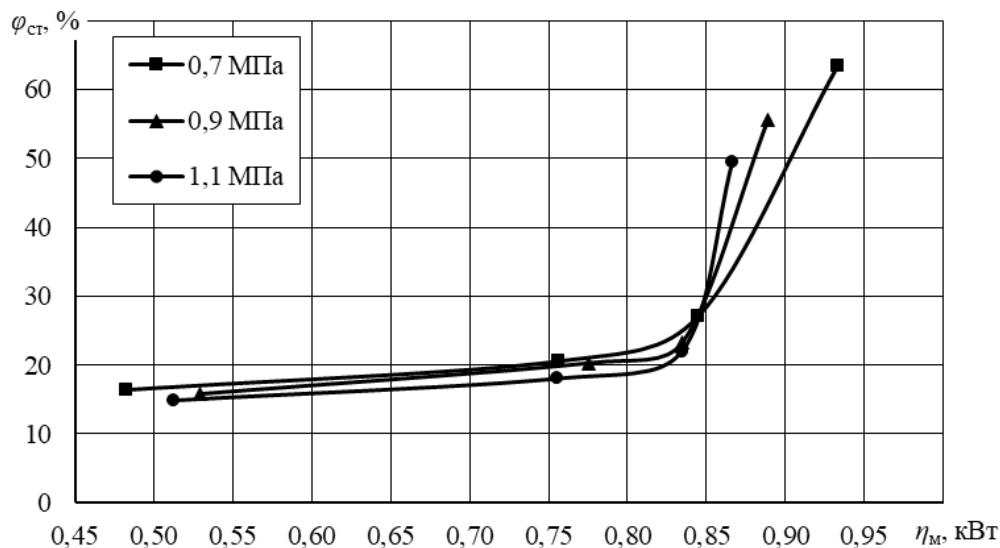


Рисунок 4 – Графік залежності частки теплових втрат $\varphi_{ст}$ від ККД механічних втрат пневмодвигуна на різних режимах роботи

Висновки

Розрахункове дослідження дає змогу стверджувати, що частка теплових втрат у пневмодвигуні із золотниковим механізмом газорозподілу повітря безпосередньо залежить від часу, за який здійснюється 1 повний робочий цикл.

Результати дослідження дозволяють встановити взаємозв'язок між кількістю теплоти робочого тіла, що не перетворюється у корисну роботу, та тривалістю робочого циклу пневмодвигуна, а також ККД механічних втрат.

Дані дослідження дають змогу покращити робочий процес пневмодвигуна з точки зору теплових втрат за рахунок використання найбільш ефективних режимів роботи.

Література

1. **Воронков А. И., Никитченко И. Н.** Рабочий процесс автомобильного пневмодвигателя : монография. Харьков : ХНАДУ, 2015. 200 с. ISBN 978-966-303-549-9.
2. **Brejaud P. et al.** Convective Heat Transfer in a Pneumatic Hybrid Engine. *Oil & Gas Science and Technology*. 2011. Vol. 66, no. 6. P. 1035–1051.
3. **Nikitchenko I., Trofimenko D., Abramchuk F.** Heat transfer from the working fluid in an air motor with a spool air distribution mechanism. *Automobile transport*. 2025. № 57. P. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2025.57.0.05>.
4. **Воронков О. І.** Методологія організації робочого процесу пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки міського автомобіля : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03. Харків, 2017. 393 с.

УДК 621.4

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВИГУНА 6ЧН8,4/8,96 (BMW M54B30) ONLINE ЗАСОБОМ BLITZ-PRO

Мінчев, Дмитро Степанович, док. техн. наук, професор кафедри «Суднові енергетичні системи і комплекси», Одеський морський національний університет Міністерства освіти і науки України,

e-mail: misaidima@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5960-3063

Кузьменко Анатолій Петрович, канд. техн. наук, доцент кафедри ДВЗ,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

e-mail: kuzmatolja@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4029-4010

Пашков Вадим Геннадійович, магістр,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

e-mail: motocrosspart@gmail.com

Швидич Володимир Анатолійович, здобувач-магістрант,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

e-mail: vladymyr.shvydych@gmail.com

Одним із важливих етапів проектування або доводки двигуна є дослідження робочого процесу. При цьому можуть застосовуватися широко відомі фізичні або математичні моделі і методи, які відрізняються складністю, ресурсними витратами та ін. В цьому контексті, математичні моделі, які знайшли відображення в сучасних програмних комплексах таких як AVL [1], Amesim [2], Blitz-Pro [3], мають суттєві переваги з точки зору економії часових та матеріальних ресурсів.

Програмний комплекс Blitz-PRO призначений для онлайн-розрахунків робочих циклів двигунів внутрішнього згоряння. Рішення базується на моделі SaaS (програмне забезпечення як сервіс), що виключає потребу в локальній інсталяції. Весь масив вхідних даних та результатів обчислень зберігається в

інтегрованої базі даних із доступом через персоналізований обліковий запис. Використання зумовлених галузевих шаблонів дозволяє оптимізувати процес підготовки проектів і скоротити час до отримання фінальних результатів.

Метою даної роботи є налаштування математичної моделі в програмному комплексі Blitz-PRO для розрахункового визначення показників автомобільного двигуна 6СН8,4/8,96 що використовується під час змагань Drag Racing.

Прототипом проектованого двигуна є двигун BMW M54B30 – це атмосферний рядний шестициліндровий бензиновий двигун з іскровим запалюванням, що належить до сімейства M54 [4]. Особливістю конструкції є те що блок циліндрів та головка блоку циліндрів (ГБЦ) виготовлені з алюмінієвого сплаву. Для забезпечення зносостійкості дзеркала циліндрів використовуються чавунні гільзи. В конструкції газорозподільного механізму використовується Double-VANOS забезпечує безступінчатє регулювання фаз газорозподілу як для впускних, так і для випускних клапанів. Система охолодження з електронно-керованим термостатом для точної оптимізації робочої температури двигуна залежно від навантаження. На рис. 1 наведено конструктивну схему та характеристики базового двигуна.

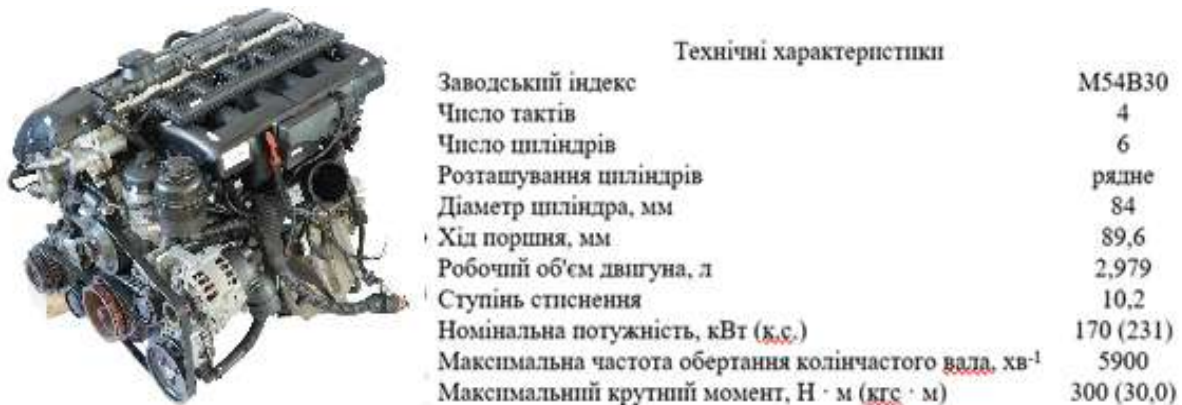


Рисунок 1 – Загальний вигляд та технічні характеристики двигуна BMW M54B30 [4]

Blitz-PRO пропонує синтез робочого циклу для різних конфігурацій двигунів ДВЗ. Проте для будь-якої конфігурації двигуна основний підхід залишається незмінним: двигун розділений на пару відкритих термодинамічних систем (ВТС), які взаємодіють одна з одною за допомогою процесів енерго- та масообміну [3] (рис. 2).

Після запуску програми з'являється робоче вікно, де відображені основні елементи налаштування вихідних даних ДВЗ і варіанти розрахунку (рис 3). При внесенні даних необхідно точно вказати конструктивні параметри ДВЗ, що розраховується, режим розрахунку, наявність і характеристики конструкції додаткових механізмів і систем.

Особливу увагу приділено налагодженню параметрів газоповітряних шляхів, при якому враховуються як конструктивні параметри, так і умови роботи елементів конструкції.

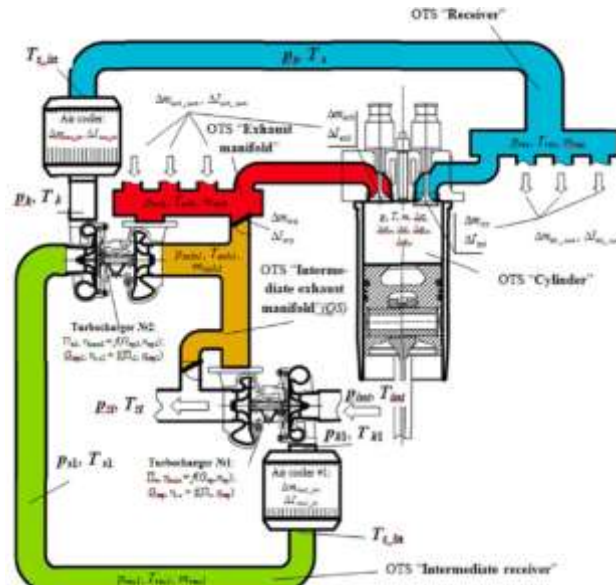


Рисунок 2 – Поділ компоновки двигуна на взаємодіючі відкриті термодинамічні системи для випадку дизеля з регульованим двоступеневим турбонадувом



Рисунок 3 – Розрахункове вікно програми

Програмний комплекс Blitz-PRO дозволяє проводити обчислювальні дослідження практично будь-якого процесу роботи двигуна внутрішнього згоряння. Математична модель фізичних процесів у програмі, яка відображає характер процесів, що відбуваються в двигуні, дозволяє отримати високу точність результатів чисельних експериментів [3].

Процес згоряння розраховується за математичною моделлю, що запропонована І. І. Вібе [5]. Викиди оксидів азоту розраховуються за тепловим механізмом на основі схеми Зельдовича [6]. Склад продуктів згоряння визначається 18 компонентами.

Для визначення температур використовується зонна модель (методика проф. В.А. Звонова) [7].

Параметри газу в циліндрах і колекторах двигуна визначаються шляхом покрокового рішення системи різничних рівнянь збереження енергії, маси, а також рівняння стану, записаних для відкритих термодинамічних систем. Метод різничних рівнянь перевершує традиційні методи по точності і швидкості в 5 разів. Враховується залежність властивостей робочого тіла від складу і температури.

Теплообмін моделюється окремо для різних поверхонь, визначених розв'язуванням задачі теплопередачі. Коефіцієнт тепловіддачі від газу до стінки циліндра визначається рівнянням Вошні.

Після введення всіх параметрів ДВЗ і вихідних даних для розрахунку можна приступати до розрахунку.

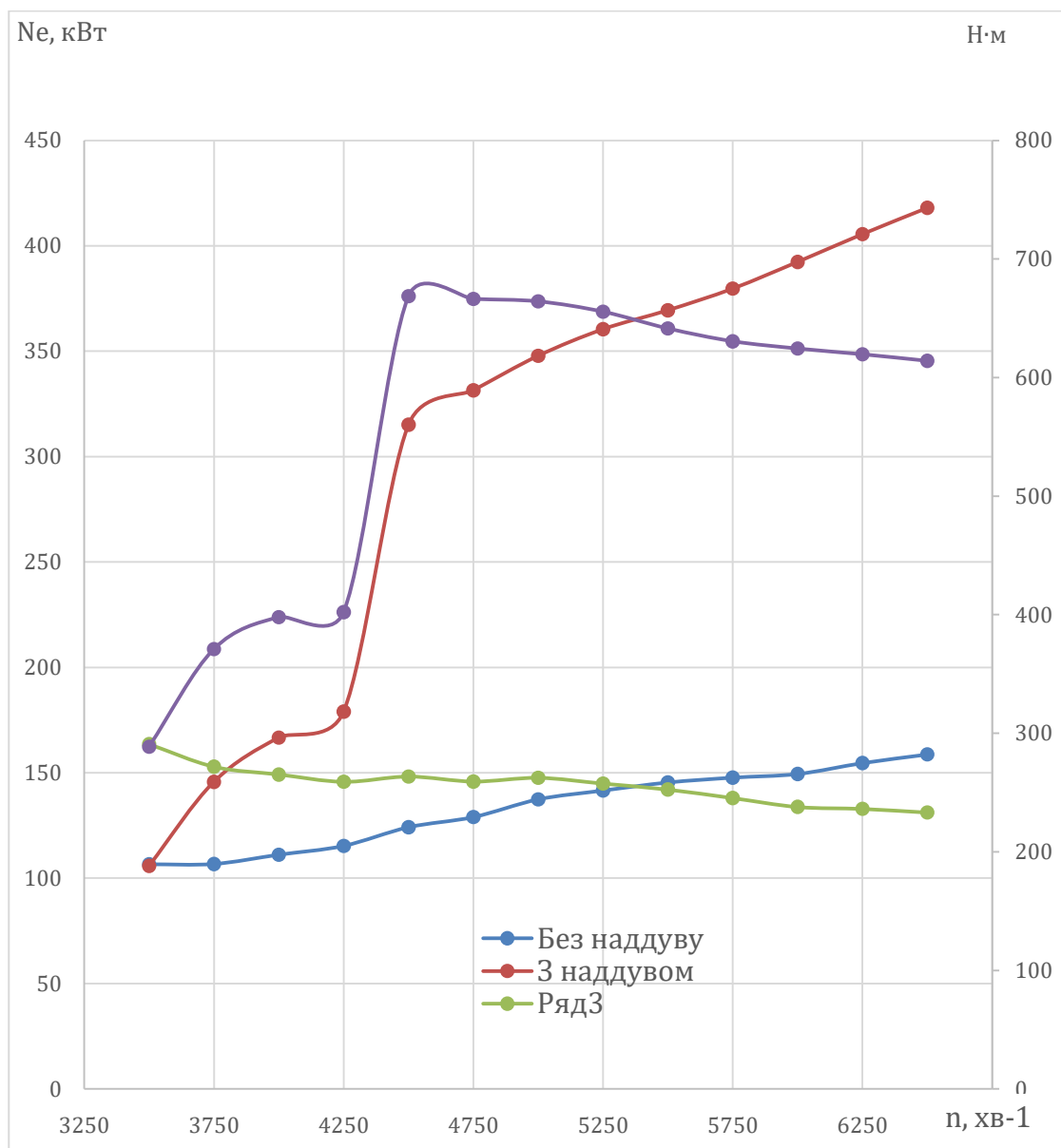


Рисунок 4 – Результати розрахунків крутного моменту та потужності за швидкісною характеристикою дослідного двигуна

Результатом розрахункового дослідження є масив даних, що може бути представлений як у табличній, так і у графічній формі. Результати можна зберегти в текстовий файл у табличній формі для подальшої обробки або у вигляді графіків для візуалізації процесів.

Для коректної побудови моделі двигуна було опрацьовано всі необхідні параметри які потрібно застосовувати в програмному комплексі, першочергово була розроблена коректна модель в атмосферному варіанті після чого на базі цієї моделі проводилися розрахунки з урахуванням наддуву.

Для максимального наближення розрахункової моделі виконувався обмір всіх необхідних геометричних розмірів для внесення реальних величин в програмний комплекс.

За результатами розрахунку було побудовано швидкісну характеристику для безнаддувного варіанту двигуна BMW M54B30 та з застосуванням наддуву (Рис. 4)

Висновки

В результаті проведеної роботи було виконано налаштування двох розрахункових моделей у вітчизняному програмному комплексі Blitz-PRO для двигуна BMW M54B30. Перша модель налаштована для розрахунку робочого процесу двигуна прототипу, а друга для модернізованого двигуна.

За допомогою програмного комплексу було виконано вибір параметрів наддуву для модернізованого двигуна. Слід відзначити, що Blitz-PRO є потужним засобом для розрахунку робочого процесу двигунів внутрішнього згоряння.

Література

1. Simulation solutions for internal combustion engines : [Електронний ресурс]. URL: <https://www.avl.com/en/simulation-solutions/ice-simulation> (дата звернення: 04.03.2026).
2. Simcenter Systems Simulation : [Електронний ресурс]. URL: <https://www.siemens.com/en-us/products/simcenter/systems-simulation/> (дата звернення: 01.02.2026).
3. Розрахунок робочого процесу : [Електронний ресурс]. URL: <http://blitzpro.onmu.odessa.ua/application/index/signin> (дата звернення: 01.02.2026).
4. Двигун BMW M54B30 : [Електронний ресурс]. URL: <https://uk.avtotachki.com/dvigatel-bmw-m54b30/> (дата звернення: 02.10.2025).
5. **Вибе І. І.** Нове про робочий цикл двигунів. Москва : Машгіз, 1962. 271 с.
6. **Зельдович Я. Б., Полярний А. І.** Розрахунки теплових процесів за високої температури. Москва : НДІ № 1, 1947. 67 с.
7. **Звонов В. А.** Токсичність двигунів внутрішнього згоряння : навч. посіб. для ВНЗ. 2-ге вид., перероб. і допов. Москва : Машинобудування, 1981. 154 с.

УДК 621.48

СПОСІБ РОБОТИ ПОРШНЕВОГО ТЕПЛОВОГО ДВИГУНА**Авраменко Андрій Миколайович**^{1,2},

1 – д.т.н., пров. наук. співр. ІПМаш НАН України, 2 – професор кафедри ДВЗ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: an0100@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8130-1881

Нікітченко Ігор Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри ДВЗ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: igor.nikitchenko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2744-7948

Тесленко Едуард Вікторович, канд. техн. наук, асис. кафедри ДВЗ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: teslenkoev21@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8833-1733

Круговий Андрій Олегович, аспірант кафедри ДВЗ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: luckykrug@gmail.com, ORCID: 0009-0001-6765-8486

Актуальність теми роботи пов'язана з покращенням екологічних показників теплового двигуна.

Метою дослідження є підвищення економічних та екологічних показників пневматичного двигуна з зовнішнім підігрівом стиснутого повітря.

Об'єктом дослідження є трициліндровий пневматичний двигун.

Предметом дослідження є оцінка впливу підігріву стиснутого повітря на показники пневматичного двигуна.

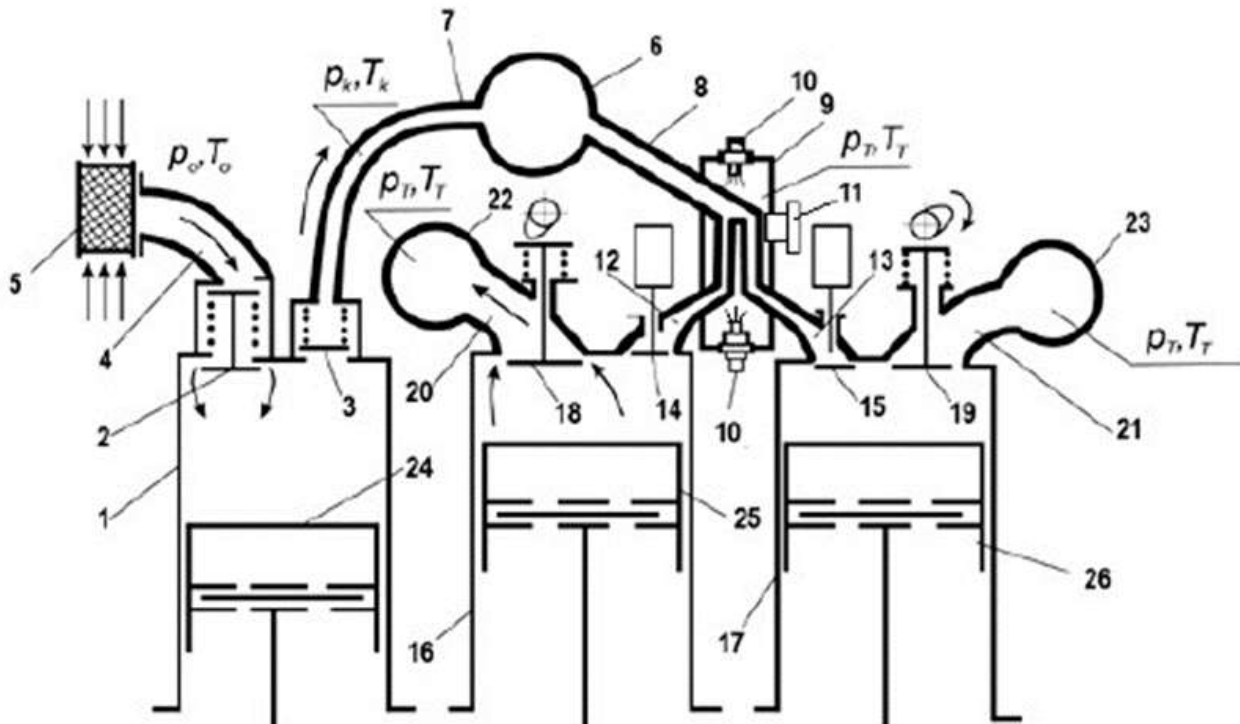
В роботі наведено конструкцію пневматичного двигуна з зовнішнім підігрівом стиснутого повітря [1, 2].

На такті впуску в компресорному циліндрі, повітря з навколишнього середовища через повітряний фільтр надходить в надпоршневу порожнину компресорного циліндра, а при зворотньому русі поршня здійснюють стиск повітря.

Стиснуте повітря подається для зниження коливань тиску стиснутого повітря до акумуляторної камери стиснутого повітря, з'єднаної каналом з зовнішньою камерою згоряння. Підігрів здійснюється при згорянні палива, яке впорскується форсунками, і підпалюється свічкою запалення. Нагріте повітря подають до робочих циліндрів.

Розширення стисненого повітря в робочих циліндрах здійснюють переміщенням поршнів в робочих циліндрах. Відпрацьоване повітря витискується через випускні клапани і випускні канали до випускних колекторів.

Таким чином, робочий процес здійснюють в даному випадку в трьох циліндрах, один з яких компресорний і два робочих, за один оберт колінчатого валу.



1 – компресорний циліндр, 2 – впускний клапан, 3 – випускний клапан, 4 – впускний канал, 5 – повітряний фільтр, 6 – акумуляторна камера стиснутого повітря, 7 – канал, 8 – канал підігріву стисненого повітря, 9 – зовнішня камера згоряння, 10 – пристрій для підігріву повітря (паливні форсунки), 11 – свічка запалення, 12 та 13 – впускні канали, 14 та 15 – впускні клапани, 16 та 17 – робочі циліндри, 18 та 19 – випускні клапани, 20 та 21 – випускні канали, 22 та 23 – випускними колекторами, 24 – поршень компресорного циліндра, 25 і 26 – поршні робочих циліндрів.

Рисунок 1 – Загальний вигляд поршневого теплового двигуна

Висновки

У роботі вирішені поставлені науково-практичні задачі. Підігрів стиснутого повітря підвищує енергетичну здатність повітря. Запропонований спосіб роботи теплового двигуна, забезпечує, зниження експлуатаційних витрат палива, на 20-30 відсотків, зниження викидів токсичних хімічних сполук з відпрацьованими газами на 50-60 відсотків. а також значно зменшує звукове випромінювання (за рахунок згоряння збідненої паливоповітряної суміші у зовнішній камері згоряння).

Література

1. Авраменко А. М. та ін. Спосіб роботи поршневого теплового двигуна : пат. 161743 Україна : МПК (2025.01); опубл. 31.12.2025, Бюл. № 53.
2. Maamri R. et al. Development of External Combustion Engine. *American Journal of Vehicle Design*. 2013. Vol. 1, no. 2. P. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.12691/ajvd-1-2-2>.

УДК 621.43

РОЗПИЛЮВАЧ ПАЛИВНОЇ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА

Афонін Валентин Миколайович, генеральний директор, Приватна фірма «ПРОМЕНЕРГО», e-mail: v_afonin@ukr.net, ORCID 0009-0006-5695-4796
Авраменко Андрій Миколайович^{1,2}, 1 – д.т.н., пров. наук. співр. ІПМаш НАН України, 2 – професор кафедри ДВЗ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: an0100@ukr.net, ORCID 0000-0001-8130-1881

Кривда Віталій Валерійович, канд. техн. наук, доцент кафедри автомобілів і автомобільного господарства, Національний ТУ «Дніпровська політехніка»,
e-mail: krivda.v.v@nmu.one, ORCID: [0000-0002-8304-2016](https://orcid.org/0000-0002-8304-2016)

Колеснікова Татьяна Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Український державний університет науки і технологій ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» e-mail: tnk1403@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8568-4688

Актуальність теми роботи пов'язана з удосконаленням процесу упорскування у дизельному двигуні [1, 2].

Метою дослідження є забезпеченні оптимальних кутів для розкриття паливних факелів під час процесу упорскування палива, за рахунок чого паливо рівномірно розподіляється по об'єму камери згоряння, що сприятиме повному згорянню палива, підвищення економічних та екологічних показників.

Об'єктом дослідження є розпилювач форсунки, який має два ряди соплових отворів на різних рівнях.

Предметом дослідження є процес розподілу паливних факелів по об'єму камери згоряння дизельного двигуна на всіх режимах роботи.

Мета дослідження досягається тим, що дві групи соплових отворів паливної форсунки дизельного двигуна містяться на різних рівнях. [3].

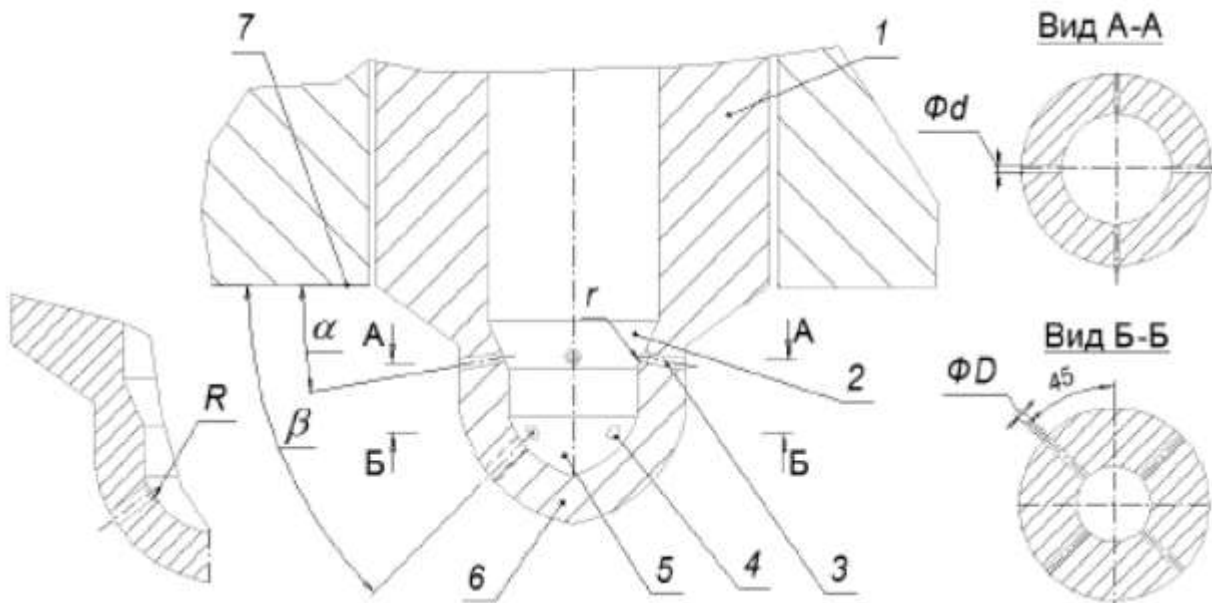
Менший кут нахилу відносно площини головки циліндра має верхня група соплових отворів (рис. 1). На запираючому конусі корпусу розпилювача розташовані соплові отвори верхньої групи. Через ці отвори розпилюється частина палива.

Залежно від діаметра отворів d та згідно із залежністю: $r = (0,00001 \div 1) \cdot d$ вони мають закруглення вхідної кромки радіусом r . В залежності: $A = (1 \div 12) \cdot B$ від кількості отворів другої групи B знаходиться кількість соплових отворів верхньої групи A .

Діаметри соплових отворів верхньої групи d і діаметри соплових отворів нижньої групи D знаходяться у межах 0,1 до 10.

Більший кут нахилу відносно площини головки циліндра (рис. 1) має нижня група отворів. У об'ємі під голкою розпилювача форсунки розташовані соплові отвори нижньої групи. Через них проходить інша частина палива. Залежно від діаметра отворів D та згідно із залежністю: $R = (0,00001 \div 1) \cdot D$,

соплові отвори розпилювача нижньої групи мають закруглення вхідної кромки радіусом R .



1 – корпус розпилювача, 2 – запірний конус, 3 – соплові отвори верхньої групи в кількості A , діаметром d , 4 – соплові отвори нижньої групи в кількості B , діаметром D , 5 – об'єм під голкою (колодязь розпилювача), 6 – носик розпилювача, 7 кут α – між сопловими отворами розпилювача верхньої групи 3 і площиною головки циліндра, 7 кут β – між сопловими отворами розпилювача нижньої групи 4 і площиною головки циліндра

Рисунок 1 – Розпилювач паливної форсунки дизельного двигуна

Висновки

У роботі вирішені поставлені науково-практичні задачі. Запропонована конструкція забезпечує раціональні умови для розвитку паливних факелів в об'ємі камері згоряння під час упорскування палива. Оптимально розподілено паливо по об'єму камери згоряння впливає на збільшення повноти згоряння, підвищенню економічних та екологічних показників.

Література

1. Wang C. et al. Hole-to-hole variations in coupled flow and spray simulation of a double-layer multi-holes diesel nozzle. *International Journal of Engine Research*. 2020. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1177/1468087420963986>.
2. Charles L. G., Pickney M. I. Розпилювач форсунки : пат. 20080142622 A1 США : МПК F02M 61/18, B05B 1/14; опубл. 19.06.2008.
3. Авраменко А. М. та ін. Розпилювач паливної форсунки дизельного двигуна : пат. на корисну модель 158442 UA : МПК F02M 61/18, B05B 1/14; опубл. 05.02.2025, Бюл.№ 6.

УДК 621.43

ЗНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДВИГУНА

Авраменко Андрій Миколайович^{1,2}, 1 – д.т.н., пров. наук. співр.
ІПМаш НАН України, 2 – професор кафедри ДВЗ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: an0100@ukr.net, ORCID 0000-0001-8130-1881

Воронков Олександр Іванович^{1,2}, 1 – докт. техн. наук, професор кафедри
автомобілів і автомобільного господарства, Національний ТУ «Дніпровська
політехніка», 2 – професор кафедри ДВЗ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: dralexadi@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2744-7948

Філатова Ганна Євгенівна, докт. техн. наук, професор кафедри комп'ютерної
інженерії та програмування, Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут" (НТУ "ХПІ"),
e-mail: filatova@khpі.edu.ua, [ORCID.org/0000-0003-1982-2322](https://orcid.org/0000-0003-1982-2322)

Яцкевич Олена Олександрівна, старший викладач кафедра видобування
нафти, газу та конденсату, Національний Технічний Університет
«Харківський політехнічний інститут»,
e-mail: yatskevich47@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4310-2800

Воробйов Дмитро Володимирович, аспірант. кафедра ДВС,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: vorobiovdmitro@ua.fm, ORCID: 0009-0003-4383-2923

Актуальність теми роботи пов'язана з покращенням ефективності охолодження вихлопних газів теплових двигунів об'єктів техніки спеціального призначення [1,2].

Метою дослідження є зниження температури відпрацьованих газів двигуна техніки спеціального призначення із забезпеченням ефективної роботи систем ежекційного охолодження та видалення пилу з нижньої частини повітряного фільтра.

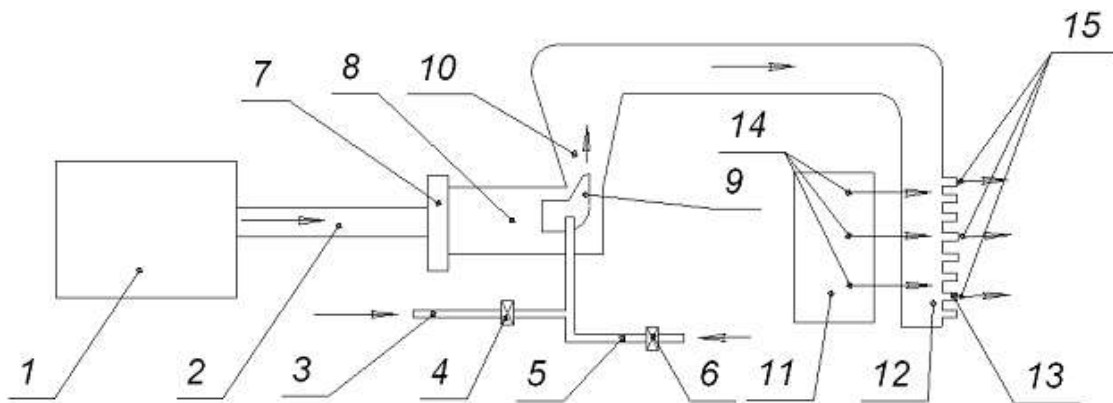
Об'єктом дослідження є ежекційний газоповітряний охолоджувач.

Предметом дослідження є оцінка впливу зниження температури відпрацьованих газів двигуна шляхом їх розбавлення атмосферним повітрям при його подачі за допомогою штатного сопла ежектора систем ежекційного охолодження та видалення пилу з нижньої частини повітряного фільтру без додаткових витрат енергії.

Гарячі відпрацьовані гази в процесі роботи двигуна надходять в ежектор газової турбіни через випускний колектор [3]. Потік відпрацьованих газів при проходженні між соплом, яке у поєднанні з камерою змішування формує проточну порожнину зменшеного перерізу. Потік відпрацьованих газів збільшує швидкість, що призводить до зниження їх тиску нижче атмосферного. При цьому атмосферне повітря, яке має значно нижчу температуру відносно

гарячих відпрацьованих газів, проходить крізь сопло і патрубок підводу атмосферного повітря через відкритий клапан. До зниження температури відпрацьованих газів в камері змішування призводить інтенсивне перемішування атмосферного повітря. Клапан встановлений на патрубку відсмоктування пилу з нижньої частини повітряного фільтра. Клапан при цьому знаходиться у закритому положенні. До вихідного ресивера надходить потік розбавлених відпрацьованих газів меншої температури.

Потік розбавлених відпрацьованих газів меншої температури з великою швидкістю витікає в атмосферу. Завдяки ежекційному ефекту в області вихідних сопел знижується тиск (нижче атмосферного). Це сприяє прокачуванню потоку атмосферного повітря 14 крізь радіатори системи охолодження (рис 1). Також відбувається змащування двигуна. Їх температура знижується (ежекційне охолодження).



1 – двигун внутрішнього згоряння, 2 – випускний тракт (колектор), 3 – патрубок відсмоктування пилу, 4 – клапан, 5 – патрубок підводу атмосферного повітря, 6 – клапан, 7 – газова турбіна, 8 – ежектор системи ежекційного охолодження та видалення пилу з нижньої частини повітряного фільтра, 9 – сопло, 10 – камера змішування, 11 – радіатори систем охолодження та змащення двигуна, 12 – вихідний ресивер, 13 – сопла, 14 та 15 напрям потоків атмосферного повітря

Рисунок 1 – Пристрій ежекційного газоповітряного охолоджувача

Висновки

У роботі вирішена поставлена науково-практична задача. Результат запропанованого пристрою досягається завдяки застосуванню атмосферного повітря для розбавлення гарячих відпрацьованих газів та зниження їх температури.

При цьому зменшується помітність об'єктів техніки спеціального призначення у інфрачервоному спектрі випромінювання. Додатковою перевагою пристрою ежекційного газоповітряного охолоджувача є можливість видалення пилу з повітряного фільтра системи повітроочищення та підвищення ефективності його роботи та без додаткових енерговитрат.

Література

1. Гнедаш М. Ф., Зарянов В. А., Кудров В. М. Газоповітряний тракт ежекційної системи охолодження силової установки бронемашини : пат. 633 Україна : МПК F01P 5/08, F41H 5/00, F41H 7/00 ; опубл. 16.10.2000, Бюл. № 5.
2. Волошин А. Ю., Щербак Ю. Г. Ежекційний газоповітряний охолоджувач : пат. на корисну модель 147503 Україна : МПК F01N 13/00 ; опубл. 12.05.2021, Бюл. № 19.
3. Авраменко А. М. та ін. Пристрій ежекційного газоповітряного охолоджувача : пат. на корисну модель 156699 Україна : МПК F01N 3/02, F01N 13/00; опубл. 24.07.2024, Бюл. № 30.

УДК 621.486

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗМІНИ ХОДУ ПОРШНЯ НА ПОКАЗНИКИ ГАЗООБМІНУ ТА ЕФЕКТИВНІ ПОКАЗНИКИ ДВИГУНА 1Д 8,2/8,7

Корогодський Володимир Анатолійович, докт. техн. наук,
професор кафедри двигунів внутрішнього згорання,
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
Стрижак Гліб Олександрович, магістрант,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: strizakgleb29@gmail.com

Вступ. Двотактні двигуни внутрішнього згорання широко застосовуються у транспортній техніці, малогабаритній енергетиці та спеціалізованих силових установках завдяки простоті конструкції, високій питомій потужності та компактності [1]. Разом з тим їх експлуатаційні характеристики значною мірою визначаються ефективністю процесів газообміну [2, 3], які в двотактному циклі відбуваються одночасно з випуском відпрацьованих газів та наповненням циліндра свіжим зарядом [4].

Особливістю двотактних двигунів є висока чутливість процесів наповнення та продувки до геометричних параметрів кривошипно-шатунного механізму, серед яких одним із визначальних є хід поршня. Зміна ходу поршня впливає на середню швидкість поршня, тривалість відкриття продувних і випускних вікон, а також на гідродинамічні умови руху робочого тіла у циліндрі [5, 6].

Це, у свою чергу, визначає ступінь очищення циліндра від залишкових газів і рівень наповнення свіжим зарядом [7].

Актуальність теми. Підвищення ефективності та екологічності двигунів внутрішнього згоряння є одним із ключових напрямів розвитку сучасного машинобудування. Для двотактних двигунів особливо актуальною є проблема оптимізації процесів газообміну, оскільки неповне витіснення залишкових газів і втрати свіжого заряду через випускні органи призводять до зниження потужності, погіршення економічності та підвищення токсичності відпрацьованих газів [1, 8].

Одним із шляхів покращення цих процесів є оптимізація геометричних параметрів двигуна, зокрема ходу поршня. Тому дослідження впливу цього параметра на показники газообміну та експлуатаційні характеристики двигуна є актуальним науково-технічним завданням.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження впливу ходу поршня на показники газообміну та основні експлуатаційні характеристики двотактного двигуна внутрішнього згоряння.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити залежність коефіцієнта наповнення циліндра від ходу поршня;
- визначити зміну коефіцієнта залишкових газів при зміні ходу поршня;
- проаналізувати вплив цього параметра на ефективну потужність двигуна;
- дослідити зміну питомої витрати палива;
- визначити найбільш раціональне значення ходу поршня з точки зору ефективності газообміну та економічності.

Об'єкт дослідження. Процес газообміну у двотактному двигуні внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням.

Предмет дослідження. Вплив зміни ходу поршня на показники газообміну (коефіцієнт наповнення та коефіцієнт залишкових газів), а також на ефективну потужність і питому витрату палива двигуна.

Методи дослідження. У роботі використано методи теоретичного аналізу робочого процесу двигуна, розрахункове моделювання параметрів газообміну та графічний аналіз отриманих залежностей. Основними показниками оцінювання процесу газообміну обрано коефіцієнт наповнення (η_v) та коефіцієнт залишкових газів (γ) [1, 4].

Саме через аналіз цих показників здійснюється оцінка впливу зміни ходу поршня на ефективність процесів наповнення та продувки циліндра.

Результати дослідження. Аналіз показників газообміну

У роботі основними показниками газообміну було обрано коефіцієнт наповнення (η_v) та коефіцієнт залишкових газів (γ). Саме через аналіз цих

показників буде спостерігатися вплив зміни ходу поршня на характеристики газообміну (рис. 1).

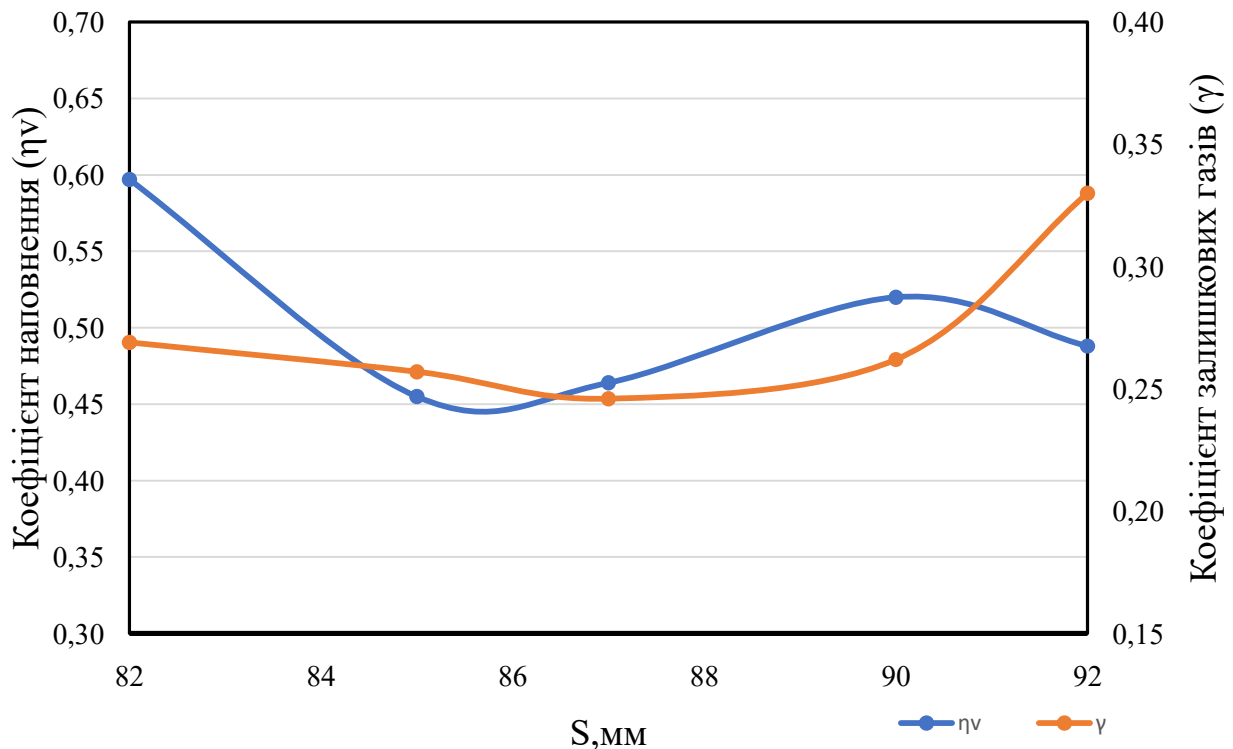


Рисунок 1 – Графік залежності коефіцієнту наповнення (η_v) та коефіцієнту залишкових газів (γ) від ходу поршня (S)

На досліджуваному графіку наведено залежності двох ключових параметрів, що визначають якість газообміну в двотактному двигуні внутрішнього згоряння: коефіцієнта наповнення циліндра η_v та коефіцієнта залишкових газів γ від ходу поршня S (мм).

Оскільки у двотактних двигунах процеси наповнення та продувки відбуваються одночасно з випуском, а не в окремий такт, як у чотиритактних двигунах, ефективність цих процесів особливо чутлива до зміни геометричних та гідродинамічних параметрів, зокрема ходу поршня [1].

Аналіз графіка показує, що при зменшенні ходу поршня до $S = 82$ мм спостерігається максимальне значення коефіцієнта наповнення – близько 0,60. Водночас коефіцієнт залишкових газів у цій точці становить приблизно 0,27, що свідчить про достатньо ефективну продувку циліндра.

Подальше збільшення ходу до $S = 85$ мм призводить до різкого зниження коефіцієнта наповнення до 0,45, що є мінімальним значенням у досліджуваному діапазоні. При цьому коефіцієнт залишкових газів зменшується до 0,25. Така комбінація параметрів може свідчити про недостатню інтенсивність продувки.

При $S = 87$ мм спостерігається мінімальне значення коефіцієнта залишкових газів – близько 0,24, що характеризує найкращу здатність системи продувки

ки витіснити продукти згоряння. Однак коефіцієнт наповнення при цьому становить лише 0,47, що може бути наслідком втрат свіжого заряду через випускні органи – типової проблеми двотактних двигунів [9].

При $S = 90$ мм коефіцієнт наповнення зростає до 0,52, а коефіцієнт залишкових газів становить 0,27, що вказує на певне покращення гідродинамічних умов руху робочого тіла.

При $S = 92$ мм спостерігається погіршення процесу газообміну: коефіцієнт наповнення знижується до 0,49, а коефіцієнт залишкових газів досягає максимального значення 0,32. Це свідчить про погіршення очищення циліндра від продуктів згоряння.

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок, що найбільш ефективний режим газообміну досягається при $S = 82$ мм, де забезпечується максимальний коефіцієнт наповнення.

Аналіз енергетичних та економічних показників. На досліджуваному графіку (рис. 2) представлена залежність ефективної потужності двигуна та питомої витрати палива від ходу поршня.

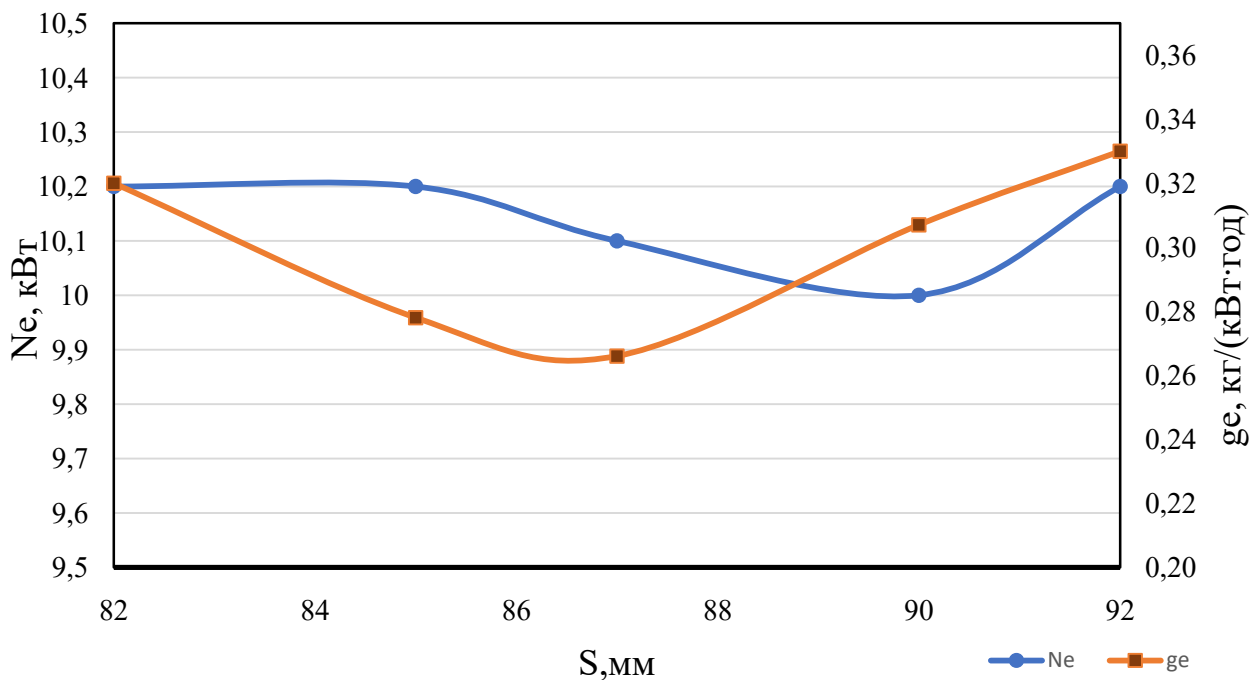


Рисунок 2 – Графік залежності ефективної потужності (N_e , кВт) та питомої витрати палива (g_e , кг/(кВт·год)) від ходу поршня (S , мм)

Аналіз показує, що ефективна потужність не зростає монотонно зі збільшенням ходу поршня. Залежність має виражений U-подібний характер, що пов'язано зі зміною умов наповнення циліндра та механічних втрат у двигуні [1].

При $S = 82$ мм та $S = 85$ мм ефективна потужність становить 10,2 кВт. При $S = 87$ мм вона знижується до 10,1 кВт, а при $S = 90$ мм до 10,0 кВт, що є

мінімальним значенням. Подальше збільшення ходу до $S = 92$ мм призводить до повторного зростання потужності до 10,2 кВт.

Питома витрата палива має V-подібний характер залежності. При $S = 82$ мм вона становить 0,32 кг/(кВт·год). При збільшенні ходу до 85 мм витрата зменшується до 0,29 кг/(кВт·год), а при $S = 87$ мм досягає мінімального значення 0,28 кг/(кВт·год), що відповідає найбільш економічному режиму роботи двигуна. Подальше збільшення ходу призводить до погіршення економічності: при $S = 90$ мм витрата становить 0,31 кг/(кВт·год), а при $S = 92$ мм – 0,34 кг/(кВт·год).

Практичне значення одержаних результатів

Отримані результати можуть бути використані при оптимізації геометричних параметрів двотактних двигунів внутрішнього згоряння на етапі їх проектування. Визначені закономірності впливу ходу поршня на показники газообміну, ефективну потужність та паливну економічність дозволяють обґрунтувати вибір раціональних конструктивних параметрів двигуна.

Висновки

1. Встановлено, що зміна ходу поршня суттєво впливає на процеси газообміну у двотактному двигуні.

2. Максимальне значення коефіцієнта наповнення спостерігається при ході поршня 82 мм.

3. Мінімальне значення питомої витрати палива досягається при $S = 87$ мм.

4. Найгірші умови газообміну спостерігаються при $S = 92$ мм, де коефіцієнт залишкових газів має максимальне значення.

Подальші дослідження можуть включати апроксимацію отриманих залежностей аналітичними функціями, а також розширення аналізу з урахуванням частоти обертання колінчастого вала, навантаження та температурного режиму роботи двигуна.

Література

1. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2018. 1056 p.

2. Корогодський В. А. та ін. Порівняння показників газообміну двотактного двигуна з іскровим запалюванням при зовнішньому та внутрішньому сумішоутворенні тіла. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2023. Вип. 102. С. 25–36. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.102.1.25>.

3. Корогодський В. А., Осетров О. О., Обозний С. В. Оцінка процесу газообміну двотактного двигуна при зовнішньому та внутрішньому сумішоутворенні. *Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури* : зб. тез доп. Всеукр. наук.-практ. конф. Київ : ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2022. С. 295–299.

4. Корогодський В. А. Визначення раціонального циклу та способу організації робочого процесу двигуна за навантажувальною характеристикою. *Вісник ХНАДУ*. 2020. Вип. 90. С. 80–94.

5. Korohodskiy V. et al. Determination of properties of the working medium in the cylinder of a two-stroke engine with spark ignition during combustion of a stratified fuel-air

charge. *AIP Conf. Proc.* 2025. Vol. 3428, iss. 1. Art. 020006. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.20038597>.

6. **Корогодський В. А. та ін.** Визначення термічного ккд циклу двигуна з іскровим запалюванням з урахуванням властивостей та складу реального робочого тіла. *Сучасне автомобілебудування, транспорт і дорожня інфраструктура '2025 (MAITRI 2025)* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 30–31 жовт. 2025 р.). Харків : ФОП Бровін О. В., 2025. С. 209–215.

7. **Корогодський В. А. та ін.** Визначення теплофізичних властивостей робочого тіла у двотактному двигуні з іскровим запалюванням при зовнішньому та внутрішньому сумішоутворенні на такті стиску. *Marine Power Plants and Operation (MPP&O-2025)* : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. морської конф. (Одеса, 4 берез. 2025 р.). Одеса, 2025. С. 191–197.

8. **Ferguson C., Kirkpatrick A.** *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences*. New York : Wiley, 2016. 416 p.

9. **Taylor C. F.** *The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice*. Cambridge : MIT Press, 1985. 652 p.

УДК 656.072.1:004.421

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ПОЇЗДОК ТА КОРЕСПОНДЕНЦІЙ В УМОВАХ БЕЗГОТІВКОГО РОЗРАХУНКУ

Тарандушка Людмила Анатоліївна, д-р. техн. наук, професор кафедри АТЕ,
Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: Tarandushka@ukr.net, ORCID ID 0000-0002-1410-9088

Шльончак Ігор Анатолійович, канд. техн. наук, доцент кафедри АТЕ
Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: igor_shlionchak@ukr.net, ORCID ID 0000-0002-5096-2414

Тарандушка Іван Павлович, старший викладач кафедри АТЕ,
Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: i.tarandushka@chdtu.edu.ua, ORCID ID 0000-0002-5182-3811

Ключко Руслан Валерійович, канд. техн. наук, доцент кафедри техніки та засобів цивільного захисту

Національний університет цивільного захисту України,
e-mail: kliuchko_ruslan@chipb.org.in, ORCID ID 0009-0003-9645-564X

Одним із можливих способів збору інформації про пасажиропотоки є отримання даних про результати безготівкової оплати проїзду в пасажирському транспорті (транзакції). У цій сфері бракує систематичних знань про способи обробки отриманих даних та точність моніторингу. Одним із можливих методів обробки даних, що надходять від джерела зберігання інформації про транзакції, є розрахунок матриці міжрайонного кореспонденційного зв'язку. У зв'язку з цим, це наукове дослідження присвячене оцінці пасажиропотоків

громадського міського транспорту на основі даних про безготівкову оплату проїзду [1, 2].

Основним поняттям теорії пасажирських перевезень, яке характеризує транспортні потреби населення, є кореспонденція. Кореспонденції – це переміщення людей, пов'язані з роботою, соціальними, культурними та побутовими цілями. Загалом, мобільність розуміється як сукупність кореспонденцій, які доставляють одній людині певна група людей за певний розрахунковий період часу (зазвичай рік, день або годину пікового навантаження транспортної мережі) [3].

Внаслідок проведеної роботи було розроблено алгоритм визначення пасажирських поїздок та пасажирських кореспонденцій, реалізація якого було здійснено в комп'ютерній програмі мовою програмування Delphi.

Результатом розробленого алгоритму були визначені відповідності, на основі яких апроксимуються параметри генеральної множини відповідностей. Для оцінки генеральної сукупності пасажирських відповідностей у дослідженні використовуються такі параметри лінійної апроксимації: коефіцієнт безготівкової оплати, коефіцієнт переказу, коефіцієнт розпізнавання транзакцій, набір оцінок коефіцієнта безготівкової оплати. На основі опитування розраховано кількість пасажирів, перевезених на маршруті за добу. З урахуванням отриманих коефіцієнтів лінійної апроксимації можна запропонувати модель для розрахунку параметрів генеральної сукупності пасажирських відповідностей. В результаті обробки транзакцій безготівкової оплати за запропонованим алгоритмом отримуємо вибіркочну множину поїздок із генеральної множини транспортних відповідностей та пасажирських відповідностей із генеральної множини пасажирських відповідностей.

Під час оплати проїзду на початку поїздки транзакція дозволяє встановити початкову точку, а в кінці поїздки – кінцеву. Інша точка подорожі визначається на основі пов'язаної транзакції. Для розрахунку відстані між зупинками ми використовуємо їх глобальні координати. Підмножину зупинок на маршруті поточної транзакції з відстанню до зупинки наступної або попередньої транзакції можна обчислити за допомогою SQL-запиту будь-якої реляційної системи управління базами даних. Дві послідовні поїздки, що входять до пасажирської кореспонденції, повинні відповідати наступним вимогам: зупинка в кінці попередньої поїздки повинна знаходитися в пішій доступності від зупинки на початку наступної поїздки. Також враховувався момент, коли час між закінченням попередньої поїздки та початком наступної поїздки не перевищує інтервалу часу пересадки. Для аналізу ефективності та адекватності запропонованого алгоритму було оброблено безготівкові платіжні операції за проїзд у міському пасажирському транспорті. В результаті обробки отриманих даних було встановлено, що алгоритм має досить високу ефективність: він дозволяє інтерпретувати близько 72% транзакцій. Зменшення частки розпізнаних транзакцій до кінця місяця пояснюється відсутністю в базі даних цих транзакцій подальших поїздок, здійснених у наступному місяці, тобто є пасажирів, які здійснюють поїздки з перервою в кілька днів.

Висновки

Множина пасажирських поїздок та множина пасажирських кореспонденцій дозволили визначити параметри генеральної сукупності пасажирських кореспонденцій за допомогою коефіцієнтів лінійної апроксимації. Підмножина, що використовується для визначення параметрів генеральної сукупності пасажирських кореспонденцій, визначається через відповідну характеристичну функцію.

Література

1. **Matseliukh Y., Lytvyn V.** Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries. *Information Technology*. 2024. No. 1 (27). DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.109>.
2. **Lytvyn V. et al.** Visual simulation technology for passenger flows in the public transport field at smart city. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2021. No. 4. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-4-10>.
3. **Ishchenko V., Kharuta V.** Analysis of the features of passenger transportation projects. *Management of Development of Complex Systems*. 2024. Vol. 57. P. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.57.27-35>.

**Секція 3.
КОНСТРУКЦІЯ МЕХАНІЗМІВ, МАШИН ТА КОНСТРУКЦІЙНІ
МАТЕРІАЛИ**

УДК 621.785.53:669.131.7

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ З ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ**

Лалазарова Наталія Олексіївна, канд. техн. наук, доцент кафедри ТМтаМ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: lalaz1932@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>

Литовка Денис Євгенійович, магістр, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: litovkad134@gmail.com

Афанасьєва Ольга Валентинівна, канд. техн. наук, доцент кафедри фізичних основ електронної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: 7584839@ukr.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7852-7385>

Високоміцний чавун з кулястим графітом (ВЧКГ) характеризується високим рівнем експлуатаційних властивостей і з успіхом використовується при виготовленні колінчастих валів, що працюють в умовах великих контактних напружень, циклічних навантажень, а опорні поверхні шийок – в умовах інтенсивного тертя і зношування [1]. Високий рівень експлуатаційних властивостей колінчастих валів забезпечує надійну роботу двигуна.

ВЧКГ в литому стані характеризується певною структурною і хімічною неоднорідністю, що не дозволяє отримувати необхідний комплекс властивостей – міцності, пластичності, ударної в'язкості, зносостійкості – у вихідному стані. Для отримання необхідних властивостей запропоновано використовувати комплексний підхід – мікролегування, термічну обробку, азотування.

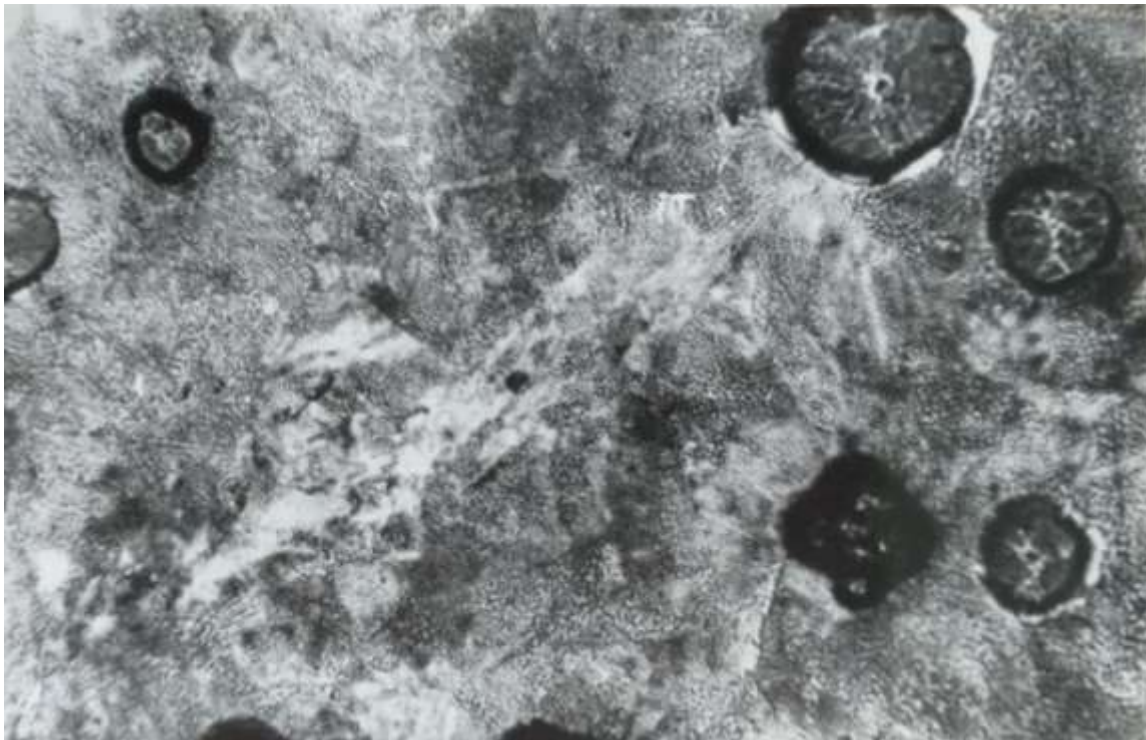
Мікролегування нікелем і молібденом (3,35 % С; 2,85 % Si; 0,0055 % S; 0,7% Mn; 0,065 % P; 0,6 % Ni; 0,075 % Mg; 0,31 % Mo) забезпечує незначну зворотну ліквідацію кремнію, збільшує прогартовуваність чавуну, в структурі збільшується частина перліту, відбувається подрібнення включень кулястого графіту, що сприяє підвищенню механічних властивостей. Структура чавуну в литому стані наведена на рис. 1.

Структура чавуну – перліт + 5 % фериту + кулястий графіт.

Дослідження показали достатньо високий рівень механічних властивостей чавуну вже в литому стані (табл. 1).

Реалізація термічної обробки дає змогу підвищити рівень механічних властивостей, зокрема втомну міцність. Була запропонована нормалізація з міжкритичного інтервалу (МКІ), що забезпечує зменшення ліквідації кремнію, легувальних елементів (молібдену в місцях евтектичних зерен), хімічних

з'єднань по границях зерен, збільшується однорідність структури. Свідомством ефективності нормалізації з МКІ є збільшення міцності, ударної в'язкості і втомної міцності (табл. 1).



збільшення $\times 340$

Рисунок 1 – Мікроструктура досліджуваного чавуну в литому стані

Таблиця 1 – Властивості легованого чавуну

Стан чавуну	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	КС, Дж/см ²	НВW	σ_{-1} , МПа
Литий	780	2,9	30	277	275
Після нормалізації	900	3	40	295-300	300

Для підвищення зносостійкості поверхонь тертя використовували азотування.

Насичення чавуну азотом через вихід на поверхню графітних включень і неоднорідну мікроструктуру утруднене (на відміну від сталі). Мікролегування чавуну і нормалізація з МКІ забезпечили формування однорідної дрібнодисперсної мікроструктури перліту з рівномірно розташованими включеннями кулястого графіту.

Азотування високоміцного чавуну виконували в середовищі дисоційованого аміаку – ступінь дисоціації аміаку 30 – 45 % при оптимальній температурі азотування – 650 – 700 °С. Шар товщиною 0,25 мм формується після витримки на протязі 12 год; мікротвердість шару – до $H_{50}=10000-12500$ МПа. Надзвичайно важливою є підвищена пластичність азотованого шару на високоміцному чавуні, що позитивно впливає на роботу шийок в умовах значних

контактних напружень. В азотованому шарі виникають залишкові напруження стискання, величина яких на поверхні за літературними даними складає 600 – 700 МПа. Це підвищує границю витривалості на 30 – 40 % і переносе осередок втомного руйнування під азотований шар [2].

Висновки

Таким чином, комплексний підхід забезпечує високий рівень експлуатаційних властивостей колінчастого валу з високоміцного чавуну з кулястим графітом.

Література

1. **Волощенко С. М.** Створення наукових засад структуроутворення в чавуні для підвищення зносостійкості змінних деталей сільгосптехніки та транспорту : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.02. Київ, 2017. 236 с.
2. **Hasegawa T., Narita H.** A Study on Finished Surface Roughness of a Nitriding Spheroidal Graphite Cast Iron. *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century (LEM21)*. 2017. Vol. 9. 151. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsmelem.2017.9.151>.

УДК 621.313:006.91

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ТА АНАЛІЗ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТІВ ZrO_2-WC І ZrO_2-SiC ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки,

Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: nerubatskyi@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4309-601X

Геворкян Едвін Спартакович, доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції,

Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: edsgev@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0521-3577

Комарова Анна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції,

Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: komarova@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8597-5891

Сучасні тенденції розвитку транспортного машинобудування характеризуються постійним зростанням вимог до ефективності, надійності та довговічності рухомого складу. У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження інноваційних конструкційних матеріалів, які здатні витримувати складні

експлуатаційні умови та стабільно функціонувати навіть за наявності екстремальних механічних, термічних та динамічних навантажень. Особливо це стосується тягових електричних двигунів локомотивів, які є ключовими компонентами енергетичної системи залізничного транспорту. Надійність їх роботи безпосередньо впливає на ефективність перевезень, економічність експлуатації локомотивів та безпеку руху пасажирських і вантажних поїздів [1].

Найбільш уразливими вузлами у конструкції тягових двигунів є механізми тертя, підшипникові вузли, а також елементи передачі крутного моменту, які піддаються значним циклічним та абразивним навантаженням. Традиційні металеві сплави, що широко використовуються для виготовлення цих елементів, часто демонструють обмежену стійкість до зносу, корозії та втомних руйнувань, що зумовлює потребу у частому технічному обслуговуванні та заміні деталей. Це, у свою чергу, підвищує експлуатаційні витрати і знижує загальну надійність рухомого складу.

Сучасні наукові дослідження спрямовані на розробку та впровадження високотехнологічних композитних матеріалів, здатних значно підвищити експлуатаційні характеристики тягових електродвигунів. особливий інтерес представляють композити на основі діоксиду цирконію (ZrO_2), які мають високу твердість, зносостійкість та термостійкість, а також здатні витримувати великі механічні навантаження без суттєвої деградації властивостей. Використання таких матеріалів у критичних вузлах двигунів відкриває перспективи значного подовження терміну служби компонентів, зниження частоти ремонту та підвищення надійності експлуатації локомотива у цілому.

Унікальність ZrO_2 полягає в його здатності до трансформаційного зміцнення, що дозволяє матеріалу протидіяти поширенню магістральних тріщин [2–4]. Додавання тугоплавких карбідів, таких як карбід вольфраму (WC) та карбід кремнію (SiC), дає змогу поєднати в одному матеріалі високу твердість, хімічну інертність та виняткову в'язкість руйнування [5–7]. Реалізація таких властивостей вимагає не лише новітніх методів спікання, а й суворого метрологічного супроводу для забезпечення точності геометричних параметрів та стабільності фазового складу на нанорівні. Для розробки композитів високої щільності застосовується метод електроконсолідації [8, 9], який дозволяє контролювати кінетику ущільнення з високою точністю. Метрологічний контроль процесу базується на безперервному моніторингу температури та тиску, що мінімізує похибку при формуванні дрібнозернистої структури.

Ключовим показником надійності матеріалу є в'язкість руйнування (K_{1C}), яка визначає здатність вузла тягових електричних двигунів протистояти раптовому руйнуванню. Метрологічна оцінка цього параметра проводиться за методом індентування (метод Палмквіста) з використанням розрахункової моделі Касвілла–Еванса:

$$K_{1C} = 0,016 \cdot (E/H)^{0,5} \cdot (P/c)^{1,5},$$

де E – модуль Юнга, ГПа; H – твердість за Віккерсом, ГПа; P – навантаження на індентор, Н; c – напівдовжина тріщини, що виходить з кута відбитка, м.

Дослідження показують, що оптимальний вміст ZrO_2 у твёрдосплавній матриці WC–Co становить 6 мас.%. Це забезпечує максимальний приріст міцності. Порівняльні характеристики матеріалів, отримані в результаті прецизійних вимірювань, наведено в таблиці.

Таблиця – Фізико-механічні характеристики композиційних матеріалів

Склад матеріалу	Відносна щільність, %	Мікротвердість, ГПа	Міцність на згин, МПа	В'язкість руйнування, МПа·м ^{0,5}
Чиста матриця WC–Co	94,8	15,2	1935	11,5
Композит ZrO_2 –WC (6 %)	99,0	17,8	2660	16,2
Композит ZrO_2 –SiC (submicron)	99,4	14,5	609	8,4
Кераміка ZrO_2 (стабілізована CeO_2)	99,8	12,0	580	10,2

Використання композитів системи ZrO_2 –SiC характеризується високою термічною стабільністю [10, 11]. Метрологічне підтвердження фазової стабільності методом рентгеноструктурного аналізу свідчить про збереження тетрагональної фази навіть після багаторазових циклах нагріву, що характерно для режимів роботи тягових електричних двигунів при частих пусках та гальмуваннях. Введення SiC сприяє утворенню міжкристалічних зв'язків, які знижують швидкість зношування поверхонь тертя в умовах граничного змащування [12, 13].

Особлива увага приділяється метрологічному забезпеченню якості обробки поверхонь. Оскільки наноструктурні композити мають високу твердість, контроль шорсткості після фінішної обробки є критичним для забезпечення мінімального коефіцієнта тертя в підшипникових вузлах.

Застосування композиційних матеріалів на основі ZrO_2 із добавками WC та SiC є науково обґрунтованим підходом до радикального підвищення експлуатаційної надійності тягового електрообладнання [14]. Завдяки реалізації механізму трансформаційного зміцнення та досягненню високої щільності методом електроконсолідації, вдалося отримати матеріали з міцністю на стиск до 5600 МПа та значно підвищеною в'язкістю руйнування.

Таким чином, метрологічна складова досліджень забезпечує високу достовірність отриманих даних, що дозволяє прогнозувати ресурс деталей тягових електричних двигунів з високою точністю. Впровадження таких матеріалів у конструкції локомотивів дозволить не лише збільшити міжремонтні терміни, а й зменшити витрати на технічне обслуговування за рахунок виключення раптових відмов крихкого характеру. Перспективи подальшого

розвитку напрямку полягають у створенні гібридних вузлів, де поєднуються електроізоляційні властивості ZrO_2-SiC з надвисокою зносостійкістю ZrO_2-WC , що забезпечить комплексний захист тягових систем у довгостроковій перспективі.

Література

1. **Nerubatskyi V. P.** Analysis of the operating conditions and modes of locomotive traction motors. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Т. 30, № 4. С. 3–21. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v30i4.351425>.
2. **Nerubatskyi V. P. et al.** Investigation of phase and structural states in nanocrystalline powders based on zirconium dioxide. *Low Temperature Physics*. 2023. Vol. 49, no. 11. P. 1277–1282. DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0021374>.
3. **Jiang W. et al.** Toughening cemented carbides by phase transformation of zirconia. *Materials & Design*. 2021. Vol. 202. 109559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109559>.
4. **Hevorkian E. S. et al.** Comparative qualitative analysis of hot pressing of zirconium dioxide nanopowders. *Functional Materials*. 2025. Vol. 32, no. 1. P. 134–145. DOI: <https://doi.org/10.15407/fm32.01.134>.
5. **Zhang Z. et al.** SiC whisker toughened WC-Al₂O₃-ZrO₂ binderless cemented carbides via fast-hot-pressed sintering and DFT calculations. *Ceramics International*. 2024. Vol. 50, iss. 16. P. 27749–27757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.05.073>.
6. **Ratov B. T. et al.** Effect of the ZrO₂ content on the strength characteristics of the matrix material of Cdiamond-(WC-Co) composites synthesized by spark plasma sintering. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, iss. 3. P. 175–186. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457624030079>.
7. **Ratov B. T. et al.** Features structure of the Cdiamond-(WC-Co)-ZrO₂ composite fracture surface as a result of impact loading. *Journal of Superhard Materials*. 2023. Vol. 45, iss. 5. P. 348–359. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457623050088>.
8. **Hevorkian E. S. et al.** Electroconsolidation method for fabrication of fine-dispersed high-density ceramics. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20, no. 1. P. 100–113. DOI: <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v20i1.363>.
9. **Hevorkian E. S. et al.** Technological and innovative features of the electroconsolidation method as a kind of plasma sintering for refractory compounds. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, iss. 5. P. 364–375. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>.
10. **Mu Y. et al.** High-temperature-resistant ZrO₂ coating with SiC-whisker-enhanced interfacial bonding strength and improved emissivity for flexible silica fibre fabric. *Ceramics International*. 2023. Vol. 49, iss. 4. P. 6825–6833. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.276>.
11. **Zhang B. et al.** Flexible and high-temperature resistant ZrO₂/SiC-based nanofiber membranes for high temperature thermal insulation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 872. 159618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159618>.
12. **Zhang W.** Tribology of SiC ceramics under lubrication: Features, developments, and perspectives. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2022. Vol. 26, iss. 4. 101000. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2022.101000>.
13. **Yadav M. et al.** Synergistic evaluation of wear behaviour and microstructure in SiC/ZrO₂-aluminium metal matrix composites (AMMCs): Vacuum controlled sintering process. *Vacuum*. 2025. Vol. 239. 114433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114433>.
14. **Геворкян Е. С. та ін.** Наноструктуровані керамічні композити на основі SiC, ZrO₂ та WC для підвищення надійності та метрологічної стабільності транспортних систем. *Інтелектуальні транспортні технології : тези доп. 6-ї МНТК (Харків, 24–26 листоп. 2025 р.)*. Харків : УкрДУЗТ, 2025. С. 281–284.

УДК 620.22:621.762

**РОЗРОБЛЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ НАНОСТРУКТУРНОЇ КЕРАМІКИ
 $ZrO_2(3 \text{ мол. \% } Y_2O_3)$ –WC МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОКОНСОЛІДАЦІЇ
ДЛЯ ПОТРЕБ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки,

Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: nerubatskyi@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4309-601X

Геворкян Едвін Спартакович, доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції,

Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: edsgev@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0521-3577

Комарова Ганна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції,

Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: komarova@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8597-5891

Волошина Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри інженерії вагонів та якості продукції,

Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: vol@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2039-111X

Лобойко Максим Олександрович, здобувач вищої освіти,
Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: loboyko7@kart.edu.ua

Енергетична безпека та промислова стійкість країни безпосередньо визначаються рівнем розвитку та впровадження сучасних технологій виробництва конструкційних матеріалів, які здатні витримувати значні та критичні навантаження протягом тривалого часу експлуатації. Сучасні енергосистеми, що характеризуються високим ступенем автоматизації та інтенсивністю виробничих процесів, висувають нові вимоги до технічних параметрів обладнання, а саме до його довговічності, стійкості до зносу та надійності функціонування в умовах підвищених навантажень.

Особливо актуальним стає забезпечення надійної роботи деталей енергетичного обладнання, таких як насосні системи, запірні арматури, турбомашини та інші механізми, що функціонують в умовах постійного тертя, високих температур та впливу агресивних хімічних середовищ. В таких умовах традиційні металеві матеріали часто демонструють обмежений ресурс експлуатації, поступово вичерпуючи свій ліміт надійності та безпечності. Це, у свою чергу, стимулює розвиток і підвищує інтерес до перспективних альтернативних рішень, зокрема до наноструктурної кераміки, яка поєднує високу механічну міцність, термостійкість та хімічну інертність, забезпечуючи більш

стабільну та довготривалу роботу енергетичного обладнання в складних експлуатаційних умовах. Особливе місце у цьому напрямку посідає наноконпозиційна кераміка системи $ZrO_2(3 \text{ мол.}\% Y_2O_3)-WC$. Поєднання матриці діоксиду цирконію, яка має унікальний механізм трансформаційного зміцнення, з нанодисперсним карбідом вольфраму дає змогу створити поліфункціональний матеріал із високою в'язкістю руйнування та надзвичайною твердістю [1, 2].

Проте, отримання таких систем вимагає інноваційних підходів до консолідації, оскільки тривале термічне спікання не дозволяє зберегти нанорозмірну структуру зерен.

Метод електроконсолідації [3, 4] є ключовою енергоефективною технологією, що дозволяє суттєво скоротити час обробки та забезпечити формування безпористої структури. Для промисловості країни розробка таких матеріалів є стратегічним кроком до зниження експлуатаційних витрат та імпортозаміщення критичних вузлів енергетичного обладнання.

Сучасні тенденції в галузі нанотехнологій вказують на те, що властивості нанокристалічних матеріалів визначаються надзвичайно малим розміром зерен та великою протяжністю їхніх меж [5]. Встановлено, що введення органічних модифікаторів на етапі підготовки шихти дозволяє керувати процесами фазоутворення та отримувати консолідовані матеріали із заданими характеристиками [6]. Дослідження впливу різних нанодобавок (Al_2O_3 , WC , SiC) на матрицю ZrO_2 продемонстрували можливість створення функціонально-градієнтних матеріалів із покращеною мікроструктурою [7, 8].

Важливим аспектом є теоретичне обґрунтування процесів ущільнення. Моделі, що описують кінетику дифузійного масопереносу при гарячому пресуванні, підтверджують ефективність поєднання тиску та електричного поля для досягнення максимальної щільності [9, 10]. Вивчення особливостей структуроутворення багатокомпонентних композитів на основі силіцидів та карбідів вказує на перспективність використання ультрадисперсних домішок для підвищення фізико-механічних властивостей. Також доведено можливість отримання безкобальтових ріжучих вставок на основі наноструктурного WC , що має пряме відношення до розробки зносостійких деталей для машинобудування [11, 12]. Питання фазового складу та морфології плазмохімічних порошків ZrO_2 також залишаються актуальними для створення стабільних наноструктур.

Під час проведення експериментів з отримання енергоефективної наноконпозиційної кераміки $ZrO_2(3 \text{ мол.}\% Y_2O_3)-WC$ методом електроконсолідації для виготовлення зносостійких вузлів промислового обладнання використовувалися нанопорошки діоксиду цирконію, частково стабілізовані оксидом ітрію, та карбиду вольфраму з розміром частинок у діапазоні 40–80 нм. Процес підготовки сумішей включав планетарне подрібнення в спиртовому середовищі з додаванням поверхнево-активних речовин.

Електроконсолідація проводилася при температурі 1450 °C з витримкою протягом 5–8 хвилин під тиском до 60 МПа. Швидкість нагріву підтримувалася

на рівні 150–200 °С/хв. Такий режим дозволив мінімізувати термічну деградацію наноструктури та забезпечити високу щільність матеріалу.

Порівняно з вакуумним спіканням, метод електроконсолідації демонструє значне зниження енергоспоживання. Це досягається за рахунок того, що джерелом тепла є безпосередньо прес-форма та зразок, що пропускають струм. Математичне моделювання вказує на те, що ефективний тиск та в'язкість пористого середовища при електроактивації дозволяють досягти щільності > 99 % за значно менший час. Це зменшує питомі витрати електроенергії на одиницю готової продукції на 50–70 %.

Частинки карбиду вольфраму інтегруються в матрицю ZrO_2 , розташовуючись переважно по межах зерен. Це створює ефект «анкерування», що перешкоджає росту зерен діоксиду цирконію при високих температурах. Рентгенофазовий аналіз підтверджує стабільність тетрагональної фази, яка забезпечує високу тріщиностійкість матеріалу.

Отримані зразки кераміки $ZrO_2(3 \text{ мол.}\% Y_2O_3)$ –WC характеризуються твердістю до 20 ГПа. Матеріал виявляє високу стійкість до ерозійного зносу, що робить його ідеальним для запірної арматури енергоблоків та деталей насосів, які працюють з абразивними середовищами. Крім того, наявність WC забезпечує достатню електропровідність для проведення прецизійної електроерозійної обробки виробів складної форми.

Таким чином, розроблення наноструктурної кераміки $ZrO_2(3 \text{ мол.}\% Y_2O_3)$ – WC методом електроконсолідації є ефективним рішенням для забезпечення потреб сучасної промисловості країни. Встановлено, що дана технологія забезпечує поєднання високих механічних характеристик зі значною економією енергоресурсів при виробництві, що є критично важливим для відновлення промислового потенціалу. Застосування таких матеріалів у вітчизняних енергосистемах та машинобудуванні дозволить підвищити експлуатаційну надійність вузлів, суттєво зменшити частоту регламентних ремонтних робіт та гарантувати стабільну роботу обладнання в умовах екстремальних навантажень.

Це створює надійне науково-технологічне підґрунтя для впровадження високоресурсних конструкційних рішень у стратегічно важливих галузях промисловості країни.

Література

1. **Ratov B. T. et al.** Effect of the ZrO_2 content on the strength characteristics of the matrix material of Cdiamond–(WC–Co) composites synthesized by spark plasma sintering. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, iss. 3. P. 175–186. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457624030079>.
2. **Ratov B. T. et al.** Features structure of the Cdiamond–(WC–Co)– ZrO_2 composite fracture surface as a result of impact loading. *Journal of Superhard Materials*. 2023. Vol. 45, iss. 5. P. 348–359. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457623050088>.
3. **Gevorkyan E. et al.** Analysis of the electroconsolidation process of fine-dispersed structures out of hot pressed Al_2O_3 –WC nanopowders. *Materials*. 2021. Vol. 14, iss. 21. 6503. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14216503>.

4. **Hevorkian E. et al.** Microstructure and properties of binderless μ WC obtained using the electroconsolidation method. *Materials*. 2025. Vol. 18, iss. 20. 4646. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18204646>.
5. **Mamalis A. G. et al.** Effect of nanoadditives on the properties of partially stabilized zirconia. *Nanotechnology Perceptions*. 2023. Vol. 19, no. 3. P. 26–46. DOI: <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v19i3.325>.
6. **Nerubatskyi V. P. et al.** Peculiarities of obtaining nanocomposites with organic additives and consolidated nanomaterials with given properties. *Low Temperature Physics*. 2023. Vol. 49, no. 11. P. 1283–1288. DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0021375>.
7. **Sarmah P. et al.** Fabrication of novel hybrid Al-SiC-ZrO₂ composites via powder metallurgy route and intelligent modeling for their microhardness. *Ceramics*. 2025. Vol. 8, iss. 3. 91. DOI: <https://doi.org/10.3390/ceramics8030091>.
8. **Khan A. et al.** Structural and mechanical properties of Al-SiC-ZrO₂ nanocomposites fabricated by microwave sintering technique. *Crystals*. 2020. Vol. 10, iss. 10. 904. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst10100904>.
9. **Gevorkyan E. et al.** Theoretical model of the densification during hot pressing and its verification. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 1. P. 113–123. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-00805-4_10.
10. **Mamalis A. G. et al.** Peculiarities of obtaining nanostructured materials compacted by the method of hot pressing due to the passage of direct electric current. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20, no. 1. P. 61–71.
11. **Kurbanbekov S. et al.** Properties, advantages, and prospects of using cobalt-free composites based on tungsten carbide in industry. *Materials*. 2025. Vol. 18, iss. 1. 129. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18010129>.
12. **Gevorkyan E. et al.** Feasibility of cobalt-free nanostructured WC cutting inserts for machining of a TiC/Fe composite. *Materials*. 2021. Vol. 14, iss. 12. 3432. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123432>.

**Секція 4.
ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА, ОБСЛУГОВУВАННЯ
ТА РЕМОНТУ ЕНЕРГОСИСТЕМ, ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ
ТА ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

УДК 681.6

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕРЕБІЙНОЇ РОБОТИ FDM 3D ПРИНТЕРІВ
В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОГО ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО
ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ**

Воропай Олексій Валерійович, докт. техн. наук, зав. каф. ДМ та ТММ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: voropay.alexey@gmail.com, ORCID 0000-0003-3396-8803

Єгоров Павло Анатолійович, канд. техн. наук, доцент каф. ДМ та ТММ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: phd.egpavel@gmail.com, ORCID 0000-0001-6616-9966

Карпенко Володимир Олександрович, докт. техн. наук, професор каф. ДМ та
ТММ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: karpenko4dm@gmail.com, ORCID 0000-0001-7376-7585

Технології швидкого прототипування стали невід'ємною частиною сучасності. 3D друк використовується не тільки для отримання перших прототипів нових виробів, а й для дрібносерійного виготовлення затребуваних деталей. У складних умовах сучасності, коли серед іншого спостерігається нестабільне централізоване енергопостачання, особливо актуальною є проблема забезпечення безперебійної роботи 3D принтерів. Часті відключення енергопостачання призводять до неможливості друку габаритних прототипів: в одних 3D FDM принтерах при знеструмленні крокових двигунів відбувається самовільне опускання ще гарячого екструдера на прототип і спотворення його геометрії, в інших, хоч і можливе продовження друку після відновлення енергопостачання, все одно спостерігаються певні дефекти друку [1], які є неприпустимими для деяких прототипів, зокрема зубчастих коліс [2]. З іншого боку підвищення напруги в мережі може призвести до пошкодження електротехнічних складових принтера.

Існують стандартні технічні рішення у вигляді блоків безперебійного живлення та портативних акумуляторних електростанцій [3]. Однак, аналізуючи внутрішню конструкцію найбільш розповсюджених непромислових принтерів, знаходимо, що такі пристрої включають до свого складу блок живлення, що перетворює мережеву змінну напругу 230В (220В) в постійну напругу, в більшості випадків рівну 24В. Відповідно приводні двигуни, нагрівачі столу та екструдера, а також плати керування FDM 3D принтерів живляться від джерел з постійною напругою.

В поточному дослідженні оцінюється можливість використання альтернативних джерел живлення FDM 3D принтерів, зокрема з виключенням етапу отримання змінної напруги 230В, з метою забезпечення незалежності їх роботи від наявності та якості централізованого енергопостачання, а також ефективність деяких систем перетворення накопиченої енергії.

Таким чином в контексті поставленої проблеми розглядаються питання:

- оцінки енергоспоживання окремими виконавчими органами;
- вибору альтернативних джерел живлення;
- оцінки ефективності перетворення енергії.

Для досліджень обрано FDM 3D принтер Alfawise U20, в якому робочий стіл при друці рухається вздовж осі Y, а екструдер – вздовж осей X та Z. В принтері замінено комплектний екструдер (hotend) mk8 на екструдер TZ-E3 V2 з плоским керамічним нагрівальним елементом. Прошивка принтера Marlin 2.1.2.6. Виміри електричних величин здійснені ватметром з власним джерелом живлення (рис. 1). При вимірюваннях вихідна напруга комплекту блоку живлення відкоригована до значення 24В.

Оцінку потужності окремих виконавчих органів здійснено при установці ватметра між конкретним споживачем та джерелом живлення. Результати вимірів зведено до табл. 1.

Таблиця 1 – Результати виміру потужності

Виконавчий орган та умови	Потужність, Вт
Всі компоненти, керуюча програма не виконується	1,4
Нагрівач екструдера	32
Нагрівач робочого столу	223
Всі компоненти, окрім нагрівачів, при переміщенні екструдера вздовж осі X з подачею 50 мм/с	4,7
Всі компоненти, окрім нагрівачів, при переміщенні столу вздовж осі Y з подачею 50 мм/с	9,7
Всі компоненти, окрім нагрівачів, при переміщенні екструдера вздовж осі Z з подачею 10 мм/с	12,5
Всі компоненти, окрім нагрівачів, при одночасному переміщенні столу та екструдера з подачею 50 мм/с	9,7

В результаті вимірів потужності отримано, що найбільш потужним елементом є нагрівач робочого столу. Варто при цьому відзначити, що потужність нагрівачів екструдера та робочого столу не є постійними: на початку процесу нагріву спостерігається максимальна потужність, після досягнення заданої температури подальша підтримка температури здійснюється в режимі ШІМ.

Значення, наведені в табл. 1, є значеннями саме максимальної потужності. Відповідно оцінку енергоспоживання лише за величиною потужності проводити не коректно.

Оцінка енергоспоживання нагрівачем робочого столу здійснена в умовах друку тестового зразка в формі куба зі стороною 20 мм (рис. 2), модель якого можна завантажити за посиланням [4].

Матеріал – PETG,

діаметр отвору сопла – 0,4 мм.

Параметри друку:

товщина шару – 0,1 мм,

швидкість укладання нитки – 80 мм/с,

температура сопла – 240 °С,

товщина стінки – 1,6 мм (4 лінії),

товщина нижньої та верхньої оболонок – 0,8 мм (8 шарів),

заповнення з ліній зі щільністю – 30%.

Додаткове обдування моделі при друці вимкнене.



Рисунок 1 – Ватметр



Рисунок 2 – Надрукований тестовий зразок

Розглянуто три випадки: друк з нагрівом робочого столу до 70°C і підтримка сталої температури увесь час друку; друк з нагрівом робочого столу до 70°C і вимкнення нагріву після друку першого шару; друк без нагріву. Для виміру витраченої енергії було використано ватметр (рис.1). При цьому схема живлення була наступною: акумулятор LiFePO₄ (12В за схемою 4S) → **ватметр** → інвертор 12В DC-230В AC (чиста синусоїда) → комплектний блок живлення принтера → електротехнічні системи принтера. Результати вимірів зведено до табл.2.

Таблиця 2 – Результати виміру енергоспоживання

№	Нагрів столу	Час друку, хв	Споживання за час друку, Вт·год	Максимальна потужність, Вт
1	70 °С, весь час друку	84	183,4	305,8
2	70 °С, при друці лише першого шару	84	98,6	298,1
3	Без нагріву	74	64,2	81,2

За результатами дослідження отримано, що нагрів робочого столу є найбільш енерговитратним. Крім того на нагрів робочого столу до 70°C додатково було витрачено 10 хв. Безпосередньо нагрів столу необхідний для кращої адгезії перших шарів майбутнього прототипу до робочого столу, однак з використанням спеціальних адгезивів та текстурованих поверхонь проблема поганої адгезії матеріалу в багатьох випадках може бути усунута. Таким чином на годину друку при описаних умовах без нагріву робочого столу витрачається 52 Вт·г. Така кількість енергії може бути забезпечена зокрема малопотужною сонячною електростанцією.

Типовими для малопотужних сонячних електростанцій є системи з акумуляторними батареями з номінальною напругою 12 та 24В. Обидва види систем можуть бути використані для живлення 3D принтерів з використанням DC-AC інверторних перетворювачів. Однак подвійне перетворення (DC-AC за допомогою інвертора та AC-DC за допомогою комплектного блоку живлення) може негативно відобразитись на загальному ККД. Авторами дослідження пропонується для живлення розповсюджених непромислових FDM 3D принтерів від акумуляторних батарей використовувати DC-DC перетворювачі. Для 12В систем і 24В принтерів це можуть бути підвищуючі перетворювачі. Для 24В систем, що у випадку з'єднання акумуляторних комірок LiFePO_4 за схемою 8S забезпечують напругу 22,4В-29,2В, і 24В принтерів необхідне використання спеціальних boost-buck перетворювачів.

Порівняння ефективності перетворення накопиченої в акумуляторі енергії з використанням різних схем живлення здійснено при друці тестового зразка (рис. 2) за описаних раніше умов. Вимір спожитої з акумуляторної батареї електроенергії здійснено ватметром (рис. 1). У всіх випадках вхідна напруга живлення принтера була скоригована до значення 24В. Результати вимірювань зведено до табл.3.

Розглянуто такі 12В та 24В схеми живлення:

Схема живлення 1: акумулятор LiFePO_4 (12В за схемою 4S) → інвертор 12В DC-230В AC (чиста синусоїда) → комплектний блок живлення → електротехнічні системи принтера.

Схема живлення 2: акумулятор LiFePO_4 (12В за схемою 4S) → блок безперебійного живлення APC BK500I (модифікована синусоїда) → комплектний блок живлення → електротехнічні системи принтера.

Схема живлення 3: акумулятор LiFePO_4 (12В за схемою 4S) → DC-DC підвищуючий перетворювач (ШИМ-контролер TL494с, транзистор NCE8580, діод STPS20S100CT) → електротехнічні системи принтера.

Схема живлення 4: акумулятор LiFePO_4 (12В за схемою 4S) → синхронний boost-buck DC-DC перетворювач (ШИМ-контролер LTC3780EG, транзистори AOD4184A, діоди ss54) → електротехнічні системи принтера.

Схема живлення 5: акумулятор LiFePO_4 (24В за схемою 8S) → синхронний boost-buck DC-DC перетворювач (ШИМ-контролер LTC3780EG, транзистори AOD4184A, діоди ss54) → електротехнічні системи принтера.

Схема живлення 6: акумулятор LiFePO_4 (24В за схемою 8S) → блок безперебійного живлення APC SUA750I (чиста синусоїда) → комплектний блок живлення → електротехнічні системи принтера.

Схема живлення 7: акумулятор LiFePO_4 (24В за схемою 8S) → інвертор 24В DC-230В AC (чиста синусоїда) → комплектний блок живлення → електротехнічні системи принтера.

Таблиця 3 – Спожита електроенергія при друці тестового зразка та потужність при використанні різних схем живлення

Схема живлення	Споживання за час друку, Вт·год	Максимальна потужність, Вт	Потужність в простій, Вт
1	64,2	81,2	20,7
2	66,8	119,1	23,8
3	38	44,8	2,1
4	36,6	46,7	2,1
5	35,1	43	1,3
6	89,9	245,2	44
7	66,6	70,2	20,6

Висновки

За результатами дослідження можна зробити висновок, що використання DC-DC перетворювачів при живленні принтерів від акумуляторних батарей (схеми живлення 3-5) є найефективнішим. Використання інверторних DC-AC перетворювачів та повторне перетворення енергії комплектним блоком живлення суттєво знижує ефективність використання накопиченої енергії.

Таким чином, для забезпечення безперебійної роботи FDM 3D принтерів в умовах нестабільного централізованого енергопостачання пропонується комплексне рішення, що полягає у зниженні енерговитрат шляхом вимкнення нагріву столу при друці та використанні автономних систем живлення на основі акумуляторів та DC-DC перетворювачів. Накопичення енергії в акумуляторі при цьому може бути забезпечене малопотужною системою на основі сонячних панелей.

Література

1. Voropay A. et al. Optimization of machine parts models for 3D printing. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. 2022. Vol. 6, no. 3. P. 511–520. DOI: <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1187111>.
2. Voropay A. et al. Restoring the Functionality of Gears Using Rapid Prototyping. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2025. Vol. 1315. P. 173–183. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-85751-5_13.
3. Portable Power Stations : [Електронний ресурс]. URL: <https://eu.ecoflow.com/pages/portable-power-stations> (дата звернення: 04.03.2026).
4. Customizer Pin Tool : [Електронний ресурс]. URL: <https://www.thingiverse.com/thing:1278865> (дата звернення: 04.03.2026).

УДК 621.311:681.5

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАВДАНЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЇХ РОБОТИ

Фурсова Тетяна Миколаївна, канд. техн. наук, доцент каф. АМЕТ,
ННІ «Українська інженерно-педагогічна академія»
Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна,
e-mail: t.m.fursova@karazin.ua, ORCID ID 0000-0002-1423-0822

Підвищення надійності енергетичного обладнання електростанцій разом зі створенням резервів генерувальних потужностей є важливим фактором оптимізації режимів роботи енергетичних установок та забезпечення безаварійного електропостачання споживачів.

Важливе значення має розробка методів діагностування та прогнозування експлуатаційних показників надійності енергетичного обладнання, особливо установок із тривалим терміном служби, для яких оцінювання надійності здійснюється на основі результатів тривалої експлуатації.

З урахуванням зростання частки фізично та морально застарілого обладнання, актуальним є дослідження фізичних характеристик матеріалів, конструкцій і вузлів енергетичних установок із застосуванням методів фізичного та математичного моделювання, а також розроблення на цій основі нових методів і систем оцінки та прогнозування технічного стану устаткування.

Теоретичні оцінки надійності обладнання потребують періодичного уточнення на основі результатів вимірювання експлуатаційних параметрів. Важливим завданням є своєчасне виявлення та локалізація несправностей, оцінювання можливих наслідків дефектів і визначення оптимальних шляхів їх усунення із застосуванням засобів технічної діагностики.

Традиційно в енергетиці використовуються як автоматизовані, так і неавтоматизовані методи діагностування, які базуються на нормативній документації, досвіді та інтуїції обслуговуючого персоналу. До них належать перевірки механічної міцності елементів обладнання, вимірювання параметрів ізоляції, дефектоскопія елементів турбін, а також контроль змін вібрації, шуму та температури і т.п.

Експлуатаційне забезпечення сучасних енергетичних установок передбачає визначення параметрів технічної експлуатації та підготовку відповідної технічної документації. Схема організації експлуатаційного забезпечення містить наступні формалізовані постановки взаємопов'язаних завдань:

Перше завдання – оцінка фактичного рівня надійності і прогнозування на її основі міжремонтного циклу. Використовуються такі параметри, як час між відмовами, час відновлення, коефіцієнт готовності і т.п. Вихідна документація – форми збору і методи обробки інформації.

Друге завдання – планування технічного обслуговування. Використовуються такі параметри, як період і час перевірки та ремонту. Вихідна документація – план-графік та інструкції щодо проведення перевірок.

Третє завдання – планування запасних деталей, матеріалів, механізмів. Основні параметри – кількість елементів різних типів, час ремонту. Вихідною документацією є відомості та маршрутні карти.

Четверте завдання – розрахунок чисельності персоналу, визначення спеціалізації, розподіл персоналу на черговий та ремонтний підрозділи. Вихідною документацією є проєкт штатного розкладу.

Засоби технічної діагностики можуть використовуватись як під час ремонтів для перевірки його якості, так і в оперативному режимі. Вони виконують функцію раннього виявлення відмов та забезпечують підвищення ефективності використання обладнання зі зменшенням експлуатаційних втрат.

Особливістю ремонту сучасних енергоустановок є значний обсяг підготовчих операцій при обмеженості ремонтних майданчиків. Найбільша інтенсивність відмов, як правило, характерна для поверхонь нагріву парогенераторів, що часто приводить до позапланових ремонтів.

Висновки

Для підвищення ефективності роботи енергетичного обладнання необхідно скорочення тривалості ремонтів при одночасному забезпеченні його експлуатаційної надійності, зменшення недовипуску енергії та поєднання аналізу причин виникнення дефектів із контролем технологічних режимів роботи обладнання.

Важливим напрямом розвитку є створення галузевих систем технічного діагностування на основі автоматизованих методів обробки інформації. Перспективним підходом є застосування моделей, що базуються на порівнянні параметрів математичної моделі з відповідними параметрами реального об'єкта. У кожному енергоблоці доцільно виділяти групу найбільш відповідальних вузлів і елементів обладнання, для яких здійснюється поглиблений контроль надійності та ресурсу.

Література

1. Project of the Recovery Plan of Ukraine. Materials of the “Energy Security” working group : [Електронний ресурс] / Cabinet of Ministers of Ukraine. 2022. URL: <https://www.kmu.gov.ua/> (дата звернення: 04.03.2026).
2. **Канюк Г. І. та ін.** Розвиток і удосконалення діагностичного забезпечення енергоблоків АЕС : монографія. Харків : Мераш Publisher : О. А. Мірошніченко, 2022. 131 с.

Секція 5.**НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ДІАГНОСТИКА, ВИПРОБУВАННЯ,
ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА НАДІЙНІСТЬ ЕНЕРГОСИСТЕМ. ОПТИМІЗАЦІЯ
РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ**

УДК 621.311

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО
СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ**

Яцела Світлана Вікторівна, викладач спеціальних дисциплін,
Прилуцький технічний фаховий коледж, e-mail: sveta330@ukr.net
Синенко Вячеслав Віталійович, викладач спеціальних дисциплін,
Прилуцький технічний фаховий коледж, e-mail: sveta330@ukr.net

Сучасний розвиток енергетичного сектору України характеризується зростанням вимог до надійності, якості та безперервності електропостачання споживачів. В умовах значного фізичного зносу обладнання розподільчих мереж, підвищення навантажень, інтеграції відновлюваних джерел енергії та необхідності забезпечення енергоефективності особливої актуальності набувають наукові дослідження, спрямовані на діагностику технічного стану елементів систем електропостачання та оптимізацію режимів їх роботи. Надійність функціонування енергосистем безпосередньо залежить від технічного стану трансформаторних підстанцій, силових трансформаторів, повітряних і кабельних ліній електропередачі, комутаційної апаратури та систем релейного захисту й автоматики. Значна частина цього обладнання експлуатується понад нормативний термін, що призводить до зростання аварійності, збільшення технологічних втрат електроенергії та погіршення показників якості електроенергії.

Науково обґрунтована діагностика електротехнічного обладнання є ключовим етапом у забезпеченні його надійної експлуатації. Використання сучасних методів контролю, зокрема тепловізійного обстеження контактних з'єднань і струмопровідних частин, вимірювання опору ізоляції та тангенса кута діелектричних втрат, аналізу якості електроенергії, контролю навантажувальних режимів трансформаторів, дозволяє своєчасно виявляти приховані дефекти та запобігати аварійним ситуаціям.

Отримані результати досліджень формують інформаційну базу для прийняття оптимізаційних рішень щодо режимів роботи системи електропостачання.

Зокрема, аналіз графіків електричних навантажень дає змогу визначити пікові режими, перевантажені ділянки мережі та нерівномірність розподілу потужності між трансформаторами. Це створює передумови для перерозподілу

навантаження, вибору раціональних схем секціонування та резервування, а також модернізації окремих елементів мережі.

Важливим напрямом оптимізації є зниження втрат електроенергії, які виникають у лініях електропередачі та силових трансформаторах. Наукові дослідження показують, що оптимальний вибір перерізів провідників, балансування фазних навантажень, підтримання нормативного рівня напруги та компенсація реактивної потужності суттєво впливають на зменшення активних і реактивних втрат. Впровадження установок компенсації реактивної потужності, регулювання напруги під навантаженням, а також застосування енергоефективних трансформаторів нового покоління дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії системи електропостачання та покращити показники якості електроенергії.

Оптимізація результатів дослідження передбачає не лише констатацію технічного стану обладнання, а й розроблення математичних моделей режимів роботи мережі. Моделювання дозволяє прогнозувати поведінку системи при зміні навантаження, аварійних відключеннях або підключенні додаткових джерел генерації. Особливої актуальності це набуває в умовах інтеграції розподіленої генерації та відновлюваних джерел енергії, які впливають на баланс потужності та параметри напруги в мережі. Використання цифрових технологій, автоматизованих систем комерційного та технічного обліку електроенергії, а також елементів концепції Smart Grid забезпечує можливість оперативного моніторингу та адаптивного керування режимами електропостачання в реальному часі.

Окрему увагу слід приділити показникам надійності електропостачання, зокрема середній тривалості перерв у постачанні електроенергії та їх частоті. Систематичний аналіз причин відмов, статистична обробка даних експлуатації та оцінка залишкового ресурсу обладнання дозволяють формувати програми технічного обслуговування за фактичним станом, що є більш ефективним порівняно з регламентною системою.

Перехід до стратегії управління активами на основі ризик-орієнтованого підходу сприяє раціональному розподілу фінансових ресурсів та підвищенню експлуатаційної надійності енергосистем.

Таким чином, комплексний підхід, що поєднує наукові дослідження, сучасні методи діагностики, аналіз режимів роботи, моделювання та цифрові технології керування, є основою для оптимізації функціонування систем електропостачання.

Реалізація запропонованих заходів сприяє зменшенню втрат електроенергії, підвищенню якості електропостачання, продовженню ресурсу обладнання та забезпеченню стабільної роботи енергосистеми в умовах зростаючих навантажень і структурних змін галузі. Отримані результати можуть бути використані при розробленні програм модернізації розподільчих мереж, підвищенні енергоефективності підприємств та вдосконаленні систем управління електропостачанням на регіональному рівні.

Висновки

Підвищення надійності систем електропостачання можливе за умови комплексної діагностики технічного стану обладнання та оптимізації режимів його роботи. Своєчасне виявлення дефектів, балансування навантажень і зниження втрат електроенергії сприяють покращенню якості електропостачання та зменшенню аварійності. Впровадження цифрових технологій і автоматизованого моніторингу забезпечує ефективне управління режимами мережі та підвищує експлуатаційну стійкість енергосистеми.

Література

1. Гутаревич Ю. Ф. та ін. Транспортні енергетичні установки (традиційні, нетрадиційні та альтернативні) : навч. посібник. Київ : НТУ, 2015. 244 с.
2. Нікітченко І. М. Обґрунтування основних параметрів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03. Харків, 2016. 20 с.
3. Воронін Л. Г., Степанюк А. Р., Ружинська Л. І. Основні залежності та приклади розрахунків теплообмінних апаратів : навч. посіб. для студ. спец. «Обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів». Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 68 с.
4. Ковальчук О. О., Пилипенко В. П. Електропостачання промислових підприємств: теорія і практика. Харків : ХНУРЕ, 2018. 312 с.

УДК 621.43:004.932

МЕТОДИКА ДІАГНОСТИКИ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ ЗА АУДІОСИГНАЛОМ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Тхор Євген Анатолійович, аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», e-mail: e.tkhor@zpu.edu.ua, ORCID 0009-0003-9373-6753

Слинько Георгій Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри АТДтаГЕУ, Національний університет «Запорізька політехніка», e-mail: gslynko@zntu.edu.ua, ORCID 0000-0002-1954-8530

Сучасні методи діагностики двигунів внутрішнього згорання активно використовують цифрову обробку сигналів та алгоритми машинного навчання. Одним із перспективних напрямів є акустична діагностика, що базується на аналізі звукових сигналів, які виникають під час роботи двигуна. Звукові коливання містять значну кількість інформації про технічний стан двигуна, режим його роботи та навантаження. Розвиток методів штучного інтелекту та нейронних мереж дозволяє автоматизувати процес аналізу акустичних сигналів і здійснювати класифікацію режимів роботи двигуна з високою точністю. Використання таких підходів дозволяє створювати системи автоматичного

моніторингу технічного стану двигуна без необхідності встановлення складних датчиків [1-3].

Метою роботи є дослідження можливостей використання акустичної діагностики за допомогою нейронної мережі для виявлення станів і режимів роботи двигуна внутрішнього згоряння. А також уточнення роботи самописної нейронної мережі в середовищі Python з використанням бібліотек TensorFlow та librosa [4]. В попередніх дослідженнях [4-5] було виявлено, що нейромережа доволі точно діагностує різні режими, а також відхилення в роботі двигуна в сталих умовах. В цій роботі були досліджені покращення в алгоритмах роботи програмного забезпечення, щоб програма могла відрізнити схожі по звучанню аудіосигнали. Це було досягнуто записом звуку роботи двигуна без навантаження і під навантаженням (автомобіль в русі).

В ході дослідження було зібрано дані роботи двигуна внутрішнього згорання автомобіля. Запис акустичних сигналів здійснювався за допомогою портативного цифрового рекордера Zoom H1. Мікрофон було зафіксовано у моторному відсіку автомобіля на сталій відстані від двигуна, що дозволило забезпечити однакові умови запису для всіх експериментів. Мікрофон було ізольовано від зайвих звуків, які могли заважати його роботі.

Об'єктом дослідження був бензиновий двигун Audi A4 1.8 TFSI (EA888), який перебував у справному технічному стані. Під час експерименту були записані акустичні сигнали для режимів роботи двигуни від $\bullet 800 \text{ хв}^{-1}$ до 3000 хв^{-1} . Кожен режим записувався у двох варіантах:

- без навантаження (двигун працює на місці);
- під навантаженням (рух автомобіля при тих самих обертах).

Таким чином було сформовано 8 класів акустичних сигналів. Навчання мережі здійснювалось шляхом подання спектрограм як вхідних ознак, відповідно до обертів двигуна. Після завершення тренування, була проведена класифікація аудіофайлів, які не входили до навчальної вибірки.

Аналіз спектральних характеристик акустичних сигналів показав наявність виражених резонансних складових, частотне положення яких змінюється залежно від частоти обертання двигуна. На спектральних зображеннях чітко спостерігаються горизонтальні смуги підвищеної енергії, що відповідають основній частоті механічних коливань та її кратним гармонійним складовим.

Порівняння спектральних характеристик сигналів при однакових обертах двигуна показало, що наявність навантаження практично не змінює основну частоту акустичних коливань, проте впливає на розподіл енергії між гармонійними складовими та загальний рівень шумової компоненти сигналу. Під навантаженням спостерігається збільшення інтенсивності широкосмугових складових спектра, що пов'язано зі зростанням механічних навантажень у вузлах двигуна.

Разом з тим результати класифікації показали, що зміна частоти обертання двигуна формує значно більш виражені акустичні відмінності, ніж зміна навантаження при тих самих обертах. У зв'язку з цим нейронна мережа більш впевнено розрізняє режими за частотою обертання колінчастого вала,

тоді як розділення режимів з навантаженням та без навантаження характеризується меншою ймовірністю класифікації.

Додатково було визначено середній рівень акустичного сигналу для кожного режиму роботи двигуна. Рівень сигналу визначався у dBFS (децибелах відносно повної шкали цифрового сигналу), де 0 dBFS відповідає максимально можливому рівню сигналу. Отримані значення змінюються в діапазоні від -40,59 dBFS для режиму роботи двигуна на 800 хв^{-1} без навантаження і до -12,08 dBFS для режиму роботи двигуна на 3000 хв^{-1} під навантаженням.

У результаті проведеного дослідження було розроблено методику акустичної діагностики режимів роботи двигуна внутрішнього згоряння із застосуванням нейромережевого аналізу аудіосигналів, а також створено відповідне програмне забезпечення для обробки та класифікації отриманих даних.

Отримані результати показали, що запропонована методика та реалізоване програмне забезпечення демонструють достатньо високу ефективність при ідентифікації режимів роботи двигуна. Нейромережа успішно виконує класифікацію акустичних сигналів не лише за частотою обертання колінчастого вала, але й за умовами роботи двигуна, зокрема розрізняючи режими з навантаженням та без навантаження навіть при однакових значеннях обертів. Особливу увагу слід звернути на те, що класифікація здійснювалася в умовах, коли акустичні сигнали різних режимів роботи мають близькі спектральні характеристики, що значно ускладнює їх розрізнення. Незважаючи на це, розроблена система змогла виявити характерні відмінності у звукових сигналах та забезпечити коректне визначення досліджуваних режимів роботи двигуна.

Висновки

Таким чином, результати дослідження підтверджують перспективність використання акустичних методів діагностики у поєднанні з алгоритмами штучного інтелекту для аналізу режимів роботи двигунів внутрішнього згоряння. Запропонована методика може бути використана як основа для створення автоматизованих систем контролю та попередньої діагностики технічного стану двигунів.

Література

1. **Li Zengfang, He Yong, Xu Gaohuan.** Engine Fault Diagnosis Model Based on Sound Intensity Analysis and Neural Network Integration. *Journal of Agricultural Machinery*. 2008. Vol. 39, no. 12. P. 170–173.
2. **Тхор Є. А., Сухонос Р. Ф., Слинько В. В.** Дослідження можливостей діагностики ДВЗ з використанням акустичних систем. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем* : тези доп. Всеукр. наук.-техн. інтернет-конф. (Рівне, 28–29 листоп. 2019 р.). Рівне : НУВГП, 2019. С. 145–146.
3. **Слинько Г. І., Сухонос Р. Ф., Тхор Є. А.** Особливості діагностики технічного стану ДВЗ з використанням акустичних систем. *Інформаційні технології: теорія і практика*: матеріали II Всеукр. інтернет-конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених (Запоріжжя, 4 квіт. 2019 р.). Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. С. 98–99.

4. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. MIT Press, 2016. 800 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10710-017-9314-z>.

5. Слинко Г. І. та ін. Діагностика режимів роботи двигуна внутрішнього згорання за аудіосигналом з використанням нейронної мережі. *Тиждень науки-2025* : зб. тез доп. щоріч. наук.-практ. конф. (Запоріжжя, 14–18 квіт. 2025 р.). Запоріжжя : НУ «ЗП», 2025. С. 32–34.

6. Slynko G. et al. Method for diagnosing engine technical condition by acoustic systems and neuronetworks. *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3238, iss. 1. 060002. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0248896>.

УДК 629.33.004.5

ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Орищенко Сергій Вікторович, канд. техн. наук, доцент каф. ТіА,
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
e-mail: oryschenko.sv@gmail.com, ORCID ID 0000-0002-5359-5285

У процесі експлуатації бензинового двигуна було зафіксовано погіршення динамічних характеристик, що проявлялося у зниженні тяги та підвищенні витрати палива. Проведена комп'ютерна діагностика за допомогою стандартних засобів OBD не виявила жодних кодів несправностей [1], а результати вимірювання компресії відповідали нормативним значенням. Відсутність електронно зафіксованих відхилень та задовільний стан основних параметрів циліндропоршневої групи ускладнювали локалізацію причини несправності [2].

З урахуванням симптомів та характеру роботи двигуна було прийнято рішення про проведення додаткової механічної перевірки газорозподільного механізму, зокрема контролю теплових зазорів клапанів. Для цього демонтовано клапанну кришку та виконано візуальну інспекцію елементів приводу. У ході огляду виявлено ознаки корозійного ураження поверхні розподільного вала (рис. 1), що проявлялися у вигляді локальних зон окиснення та порушення стану робочих поверхонь.

Встановлено, що причиною розвитку корозії стали особливості режиму експлуатації двигуна, а саме переважання короткотривалих поїздок. За таких умов двигун не досягає стабільного теплового режиму, що сприяє накопиченню конденсату та підвищенню вологості у внутрішньому об'ємі головки блока циліндрів. Тривалий вплив вологи та продуктів окиснення мастила призводить до деградації поверхонь деталей, зокрема розподільного вала.

Корозійні пошкодження розподільного вала можуть спричинити зміну профілю кулачків, погіршення умов тертя та нестабільність фаз газорозподілу, що безпосередньо впливає на наповнення циліндрів, ефективність згорання та

паливну економічність. При цьому подібні дефекти не завжди супроводжуються появою діагностичних кодів у системах OBD, оскільки не призводять до критичних електричних або логічних збоїв у роботі ECU.



Рисунок 1 – Корозійні пошкодження поверхні розподільчого вала бензинового двигуна

У межах проведеної механічної діагностики газорозподільного механізму було виконано демонтаж розподільних валів з метою оцінювання стану їх робочих поверхонь. У ході інспекції підтверджено наявність корозійних уражень, що потенційно впливали на кінематику клапанного приводу та стабільність фаз газорозподілу. Для відновлення функціональних характеристик елементів приводу розподільні вали піддано механічній обробці та поліруванню на спеціалізованому обладнанні (рис. 2), що забезпечило усунення поверхневих дефектів і покращення умов тертя.

Після завершення відновлювальних робіт вали було встановлено на штатні посадкові місця, а також виконано регулювання теплових зазорів клапанів відповідно до нормативних вимог. Зазначені заходи дозволили стабілізувати роботу клапанного механізму та усунути причини погіршення експлуатаційних характеристик двигуна.

Отримані результати підтверджують необхідність застосування комплексного підходу до діагностики двигунів внутрішнього згорання, який має поєднувати електронні методи контролю з безпосередньою механічною інспекцією елементів силового агрегату.

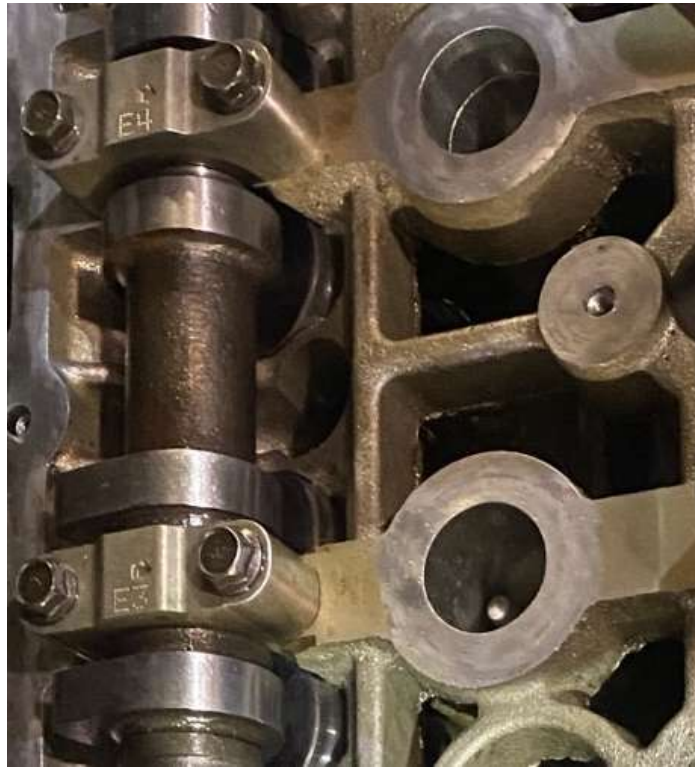


Рисунок 2 – Відновлені робочі поверхні розподільчих валів

Використання виключно стандартних засобів комп'ютерної діагностики, зокрема систем OBD, не завжди дозволяє виявляти деградаційні процеси, що розвиваються на ранніх стадіях та не супроводжуються формуванням кодів несправностей. Це особливо актуально для дефектів механічної природи, які не викликають критичних електричних або логічних відхилень у роботі електронного блоку керування, але водночас здатні суттєво впливати на ефективність робочих процесів двигуна.

Проведене дослідження демонструє, що порушення стану робочих поверхонь деталей газорозподільного механізму, зокрема корозійні ураження розподільних валів, можуть спричинити зміну кінематичних параметрів клапанного приводу, погіршення наповнення циліндрів та зниження паливної економічності без появи явних діагностичних ознак у стандартних електронних системах контролю. У подібних випадках механічні дефекти залишаються прихованими до моменту виникнення більш суттєвих функціональних порушень, що ускладнює своєчасну локалізацію несправностей і підвищує ризик прогресуючого зносу.

Особливу увагу у практиці технічної експлуатації та діагностики доцільно приділяти режимам роботи двигуна, які потенційно сприяють розвитку деградаційних процесів. До таких режимів належать короткотривалі поїздки, часті цикли пуску та зупинки, а також експлуатація в умовах нестабільного теплового режиму. За подібних умов підвищується ймовірність утворення конденсату, погіршення властивостей мастильних матеріалів та прискорення корозійних процесів, що негативно впливають на довговічність

елементів двигуна. При цьому відповідні зміни часто не реєструються штатними системами самодіагностики, оскільки не виходять за межі встановлених порогових критеріїв.

Висновки

Таким чином, підвищення достовірності діагностики та ефективності технічного обслуговування двигунів внутрішнього згоряння потребує розширення діагностичних процедур за рахунок інтеграції інструментальних методів аналізу сигналів, візуальної оцінки стану механічних компонентів та урахування експлуатаційних факторів. Такий підхід відповідає сучасним концепціям превентивного та прогностичного технічного обслуговування, орієнтованого на раннє виявлення відхилень і попередження розвитку критичних несправностей.

Література

1. **Oryshenko S., Oryshenko V.** Machine Diagnostics in Mechatronic Systems: Analysis Methods and Intelligent Technologies. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*. 2025. Vol. 1 (64). P. 140–146. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2025.64.4146>.
2. **Kalinin Y. et al.** Signal processing algorithm for predictive diagnostics of car transmissions using artificial intelligence. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2025. Vol. 1, iss. 20.

УДК 621.316

ОЦІНКА НЕОБХІДНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

Семененко Юрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки,
Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: slider2012slider@gmail.com, ORCID ID 0000-0001-9422-3528

Для досягнення максимальної ефективності під час формулювання задачі оцінювання стану в операційних системах електроенергетики, важливо максимально враховувати специфічні характеристики тих мереж, до яких вона застосовується. Будь-які спрощення, що вводяться в модель, а також обрана математичне представлення електроенергетичної системи (ЕЕС), не повинні суттєво спотворювати результати розрахунків порівняно з реальними параметрами режиму роботи досліджуваних мереж. Як зазначають автори роботи [2], у магістральних мережах найбільш поширеним підходом до формулювання задачі оцінювання стану є використання вузлових напруг як елементів вектору стану (або розрахункового вектору). Такий вибір пояснюється тим, що в цьому випадку система рівнянь містить мінімальну кількість невідомих величин, особливо враховуючи переважно кільцеву топологію цих мереж. Крім того,

однолінійна модель для вивчення режимів магістральних мереж набула популярності завдяки симетричності їх електричних режимів та рівномірному розподілу навантажень по фазах. Застосування такої моделі значно спрощувало обчислення, не призводячи до втрати точності результатів.

У табл. 1, наведено порівняльний аналіз ключових характеристик магістральних і розподільних мереж, які найбільше впливають на формулювання задачі оцінювання стану, а також на рішення щодо вибору між однолінійною чи трифазною моделлю.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз ключових характеристик магістральних та розподільних електромереж

Порівнювана характеристика	Магістральні мережі	Розподільні мережі
Розподіл навантажень по фазах	Навантаження в фазах розподілені симетрично. Це сприяє стабільності системи та зменшує втрати енергії, оскільки дозволяє уникнути перевантажень окремих фаз.	Навантаження в фазах часто значно нерівномірні, що призводить до асиметрії. Така особливість може спричинити додаткові втрати, нестабільність напруги та потребує спеціальних заходів для балансування, наприклад, через перерозподіл споживачів.
Параметри схеми заміщення	Для елементів мережі співвідношення R/X значно менше 1, вказує на домінування реактивного опору; Кожен об'єкт, стан якого критичний, оснащений телесигналами для моніторингу. Це полегшує оперативний контроль і швидке реагування на зміни, підвищуючи надійність великих енергосистем.	Для елементів мережі співвідношення R/X наближене до 1, так активний і реактивний опори є приблизно рівними; Елементи схеми заміщення відрізняються великою різноманітністю; Можуть бути присутні однофазні чи двофазні відгалуження; Не все обладнання має телесигналізацію стану. Така гетерогенність ускладнює моделювання, але відображає реальні умови локальних мереж, де економія на обладнанні є пріоритетом.
Конфігурація мережі	Мережа має складну замкнуту структуру з численними кільцями для резервування; Кількість вузлів у моделі коливається від 1 000 до 10 000. Це забезпечує високу надійність і гнучкість, дозволяючи перерозподіляти потоки енергії в разі аварій.	Переважно радіальна структура (у майбутньому можливий перехід до кільцевої для підвищення стійкості); Кількість вузлів у моделі може перевищувати 10 000. Така конфігурація простіша в управлінні, але вразливіша до локальних збоїв, тому потребує сучасних систем моніторингу для швидкого виявлення проблем.

Доступні вимірювання	Існує надлишок вимірювальної інформації для точного аналізу; Поширені вимірювання потоків/ін'єкцій потужності, модулів напруг; Зустрічаються векторні вимірювання; Вимірювання струмів і напруг нульової послідовності. Це дозволяє проводити глибокий аналіз режимів і прогнозувати потенційні ризики, забезпечуючи високий рівень безпеки.	Надлишок вимірювань може бути відсутнім, але активно впроваджуються смарт-лічильники та нові комплекси; Поширені вимірювання модулів струмів у гілках і вузлах, модулів лінійних і фазних напруг, струмів і напруг нульової послідовності; Починається активне впровадження вимірювань потужностей. З ростом цифровізації це покращить точність контролю, зменшуючи час на виявлення несправностей і оптимізуючи розподіл ресурсів.
Додатки для управління мережами	До систем EMS входять: Модулі для оцінювання стану, розрахунку усталених режимів, ВРДО (вихідного режиму динамічної оптимізації) та виведення обладнання в ремонт; Задачі контролю перетоків і параметрів електричного режиму; Комплекси для організації ремонтів; Задачі підтримки ринку електроенергії та потужності. Ці інструменти забезпечують комплексне управління великими системами, інтегруючи економічні та технічні аспекти.	У перспективі системи DMS включатимуть: Модулі для оцінювання стану, розрахунку усталених режимів, струмів короткого замикання, оптимізації режимів та визначення місця пошкодження; Комплекси для організації ремонтів; Визначення можливості підключення нових споживачів до вузла; Контроль напруг, струмових навантажень та інших обмежень. Розвиток таких систем дозволить ефективніше управляти локальними мережами, враховуючи зростання розподіленої генерації, як-от сонячні панелі, і забезпечуючи стаке енергопостачання.

Це порівняння підкреслює відмінності в структурі, навантаженнях та інших факторах, що робить його корисним інструментом для розуміння адаптації методів. Наприклад, магістральні мережі часто мають високу симетрію, тоді як розподільні – схильні до асиметрії через нерівномірне споживання енергії.

На основі цього аналізу стає очевидним, що моделі та методики оцінювання стану, які успішно працюють у магістральних мережах, не можна безпосередньо переносити на розподільні системи через їхні унікальні особливості. Класична формулювання задачі оцінювання стану на основі комплексів напруг, яка домінує в магістральних мережах, втрачає свої ключові переваги при адаптації до РС. Крім того, з порівняння випливає, що однолінійні моделі, широко використовувані в задачах магістральних мереж, непридатні для РС через асиметрію параметрів схем заміщення та, головне, нерівномірний розподіл навантажень по фазах. Це може призводити до

неточностей у прогнозуванні режимів, що критично для надійності енергопостачання.

Модель є фундаментальною складовою будь-якого об'єкта, чії властивості планується визначити за допомогою розрахунків. На ранніх етапах досліджень режимів роботи розподільних мереж переважно застосовувалася однолінійна модель, яка раніше стала стандартом у магістральних системах. Такий вибір значною мірою обумовлювався обмеженими обчислювальними ресурсами комп'ютерів минулих десятиліть, коли потужності були недостатніми для складніших обчислень.

Однак використання однолінійних моделей для вивчення режимів РС вимагало прийняття спрощень щодо симетричності електричних режимів та елементів мережі [3, 5]. Такі припущення часто ставали джерелом значних похибок у результатах розв'язання задач, спрямованих на визначення реального електричного режиму ЕЕС. Наприклад, ігнорування асиметрії могло спотворювати оцінки втрат енергії чи стабільності системи, що в сучасних умовах з великими обсягами даних та потужними комп'ютерами вже не є необхідним компромісом. Сьогодні ж перехід до трифазних моделей дозволяє точніше моделювати реальні умови, враховуючи варіативність навантажень і топологію мереж.

Як в Україні, так і в закордонних розподільних електричних мережах (РЕМ) енергетичні компанії докладають значних зусиль для досягнення симетричного розподілу навантажень по фазах, але це завдання залишається складним і часто невирішеним. За даними дослідження [4-6], у зарубіжних РЕМ ступінь асиметрії фазних навантажень може сягати до 17%. Крім того, в деяких зарубіжних енергосистемах розподільні мережі включають неповнофазні відгалуження, що ще більше посилює нерівномірність параметрів електричного режиму.

Це призводить до додаткових втрат енергії та ускладнює стабільність постачання, оскільки нерівномірність може спричинити перевантаження окремих ліній чи фаз. В Україні РЕМ, попри застосування ізольованої нейтралі та з'єднання обмоток трансформаторів за схемою "зірка-трикутник", асиметрія розподілу навантажень все одно зберігається. Така конфігурація з'єднання обмоток допомагає зменшити коефіцієнт асиметрії струмів нульової послідовності, але струми зворотної послідовності продовжують циркулювати в мережах, впливаючи на ефективність.

Українські РЕМ середнього класу напруги зазвичай не мають неповнофазних відгалужень. Проте деякі науковці розглядають перспективи впровадження такої конфігурації для оптимізації. Однофазні трансформатори також пропонуються в каталогах виробників, наприклад, масляні моделі типів ОМ, ОМП, ОМГ, призначені для напруг 6-10-35 кВ зі схемою з'єднання 1/1-0. Їхнє застосування поширене в промисловості та на транспорті [5], де економія ресурсів є пріоритетом.

У майбутньому такі трансформатори можуть принести значну економію при підключенні віддалених об'єктів з малою потужністю, як-от вишки

мобільного зв'язку чи фермерські господарства. Водночас їх використання суттєво посилює асиметрію електричного режиму, що вимагає ретельного моніторингу.

Якщо для оцінювання стану мережі з асиметричним режимом застосовується однолінійна модель, то отримане стан системи не відповідатиме найбільш ймовірному. Крім того, підзадачі оцінювання стану, такі як виявлення помилкових даних, також даватимуть неточні результати [1]. У недавніх публікаціях щодо оцінювання стану РЕМ переважно використовуються трифазні моделі, як впливає з аналізу літератури [6]. Це свідчить про еволюцію підходів, де акцент робиться на точності, особливо з урахуванням інтеграції відновлюваних джерел енергії.

На початкових етапах вивчення застосування методів оцінювання стану у РЕМ приймалося припущення про їхню переважно радіальну структуру [4]. У такій формулюванні пропонувалися методи оцінювання стану, які принципово відрізнялися від тих, що використовуються в магістральних мережах. З розвитком РЕМ стало зрозуміло, що їхня топологія поступово трансформуватиметься в кільцеву, забезпечуючи більшу надійність і резервування. Тому при створенні алгоритмів оцінювання стану для РЕМ не варто обмежуватися поточною радіальною структурою [3].

Потреба в оцінюванні стану для РЕМ зростатиме паралельно з їхнім удосконаленням, включаючи впровадження новітніх технологій по підвищенню безпеки експлуатації. Ключовим є те, щоб нові алгоритми враховували майбутні умови експлуатації, такі як інтеграція електромобілів чи систем зберігання енергії.

Застосування трифазних моделей вимагає перевірки сумісності з існуючими алгоритмами оцінювання стану. Крім того, необхідно оцінити придатність методів для виявлення помилок у вимірюваннях та стані елементів моделі мережі. У сучасних умовах ці методи можуть отримати нові припущення та обмеження, відмінні від тих, що застосовувалися для однолінійних моделей, і, можливо, потребуватимуть доопрацювання. Також актуалізується питання підвищення швидкості розв'язання задачі оцінювання стану, оскільки трифазні моделі значно збільшують обчислювальну складність. Для вирішення цього можна інтегрувати хмарні обчислення чи штучний інтелект, що дозволить обробляти великі обсяги даних у реальному часі.

Висновки

В роботі була проведена оцінка застосування моделей демонструє, що асиметрія в розподільних мережах є суттєвою проблемою в експлуатації, яка робить однолінійні моделі недостатньо точними для сучасних задач оцінювання стану. Перехід до трифазних моделей є необхідним кроком для підвищення точності розрахунків, особливо з урахуванням еволюції топології мереж та впровадження нових технологій. У майбутньому це дозволить ефективніше управляти ресурсами, зменшувати втрати та забезпечувати безперебійне постачання електроенергії.

Література

1. Семененко Ю. О. та ін. Аналіз причин неселективної дії захисту електромереж середньої напруги при однофазних замиканнях на землю. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2025. № 9 (212). С. 17–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.09.02>.
2. Семененко Ю. О. та ін. Аналіз причин пошкодження повітряних ліній електропередачі в електромережах середньої напруги. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2025. № 11 (214). С. 17–31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.11.02>.
3. Семененко Ю. О. та ін. Дослідження характеристик перехідного струму нульової послідовності в розподільних мережах середньої напруги з резонансно-заземленою нейтраллю. *Прогресивні технології засобів транспорту* : матеріали 3-ї міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 03–04 груд. 2025 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2025. С. 31–33.
4. Sereda O. G., Zhorniak L. B., Sereda O. G. Improving the protective properties of electrical equipment in low-voltage cabinets of complete transformer substations auxiliaries NPP. *Electrical Engineering and Power Engineering*. 2025. No. 2. P. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-2-4>.
5. Shao W. et al. Research on a Faulty Line Selection Method Based on the Zero-Sequence Disturbance Power of Resonant Grounded Distribution Networks. *Energies*. 2019. Vol. 12 (5). 846. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12050846>.
6. Liu K. et al. Faulty Feeder Identification Based on Data Analysis and Similarity Comparison for Flexible Grounding System in Electric Distribution Networks. *Sensors*. 2021. Vol. 21 (1). 154. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21010154>.

Секція 6.
ЕЛЕКТРИЧНІ, ГІБРИДНІ, АЛЬТЕРНАТИВНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ, ЛОГІСТИЧНІ МЕРЕЖІ ТА ІНФРАСТРУКТУРА, ГЕНЕРАЦІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

УДК 629.3

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО ЗАРЯДЖАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ САМОКЕРОВАНИХ РОБОТІВ

Багач Руслан Володимирович, доктор філософії (PhD), доцент каф. автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, ORCID ID [0000-0003-0157-5933](https://orcid.org/0000-0003-0157-5933)

Смирнов Олег Петрович, докт. техн. наук, професор каф. автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: smirnov1oleg@gmail.com, ORCID ID [0000-0003-4881-9042](https://orcid.org/0000-0003-4881-9042)

Стрімке зростання кількості електромобілів зумовлює необхідність розвитку ефективних і зручних систем заряджання. Традиційні стаціонарні зарядні станції потребують значних капіталовкладень, займають фіксовані місця та не завжди забезпечують необхідну гнучкість використання. Крім того, процес підключення електромобіля до зарядного пристрою вимагає участі водія, що знижує загальний рівень комфорту [1, 2].

Одним із перспективних напрямів розвитку зарядної інфраструктури є створення інтелектуальних автоматизованих систем, здатних самостійно виконувати процес заряджання без участі людини. Особливу увагу в цьому контексті привертає застосування самокерованих роботів, які можуть переміщатися парковкою, знаходити електромобіль та виконувати автоматичне підключення до зарядного порту [3].

Метою статті є розроблення та аналіз концепції інтелектуальної системи автоматичного заряджання електромобілів із використанням самокерованих роботів. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- проаналізувати принципи побудови інтелектуальних зарядних систем;
- розробити структурну архітектуру системи автоматичного заряджання;
- описати алгоритми навігації та взаємодії робота з електромобілем;
- оцінити переваги та перспективи впровадження запропонованого підходу.

Виклики та перспективи. Сучасні наукові дослідження у сфері заряджання електромобілів зосереджені на підвищенні потужності зарядних станцій, зменшенні часу заряджання та впровадженні бездротових технологій передачі

енергії. Водночас активно розвиваються системи комп'ютерного зору та автономної навігації мобільних роботів, що застосовуються у складських, логістичних і сервісних системах [4, 5].

Окремі комерційні розробки пропонують роботизовані зарядні пристрої, проте більшість із них мають обмежену функціональність або потребують спеціально підготовленої інфраструктури. Це свідчить про актуальність подальших досліджень у напрямі створення універсальних інтелектуальних систем автоматичного заряджання [6].

Архітектура інтелектуальної системи автоматичного заряджання.

Запропонована система складається з таких основних компонентів:

- самокерований мобільний робот із зарядним модулем;
- система комп'ютерного зору для виявлення електромобіля та зарядного порту;
- центральний сервер керування та моніторингу;
- бездротовий канал зв'язку між роботом і сервером;
- джерело електроживлення або підключення до електромережі.

Самокерований робот переміщується парковкою відповідно до заданого маршруту або за викликом користувача через мобільний застосунок. Центральний сервер координує рух роботів, розподіляє завдання та контролює процес заряджання.

Алгоритм роботи самокерованого робота. Процес автоматичного заряджання включає такі етапи:

- ідентифікація електромобіля та визначення його місцезнаходження;
- побудова оптимального маршруту руху робота;
- точне позиціонування біля зарядного порту;
- автоматичне підключення зарядного конектора;
- контроль параметрів заряджання та безпеки;
- завершення процесу та від'єднання конектора.

Також була спроектована структурна схема інтелектуальної системи автоматичного заряджання електромобілів (рис. 1).

Представлено конструкцію роботизованого маніпулятора автоматичної системи заряджання електромобілів (рис. 2), що складається з декількох сегментів, універсальних і призматичних шарнірів, базової та мобільної платформ. Маніпулятор забезпечує точне позиціонування зарядного штекера відносно зарядного порту електромобіля під час автономного процесу заряджання.

Для мінімізації часу обслуговування використовується критерій оптимізації:

$$T = T_{nav} + T_{pos} + T_{ch} \rightarrow \min \quad (1)$$

де T_{nav} – час навігації робота, с;

T_{pos} – час позиціонування, с;

T_{ch} – час заряджання, с.

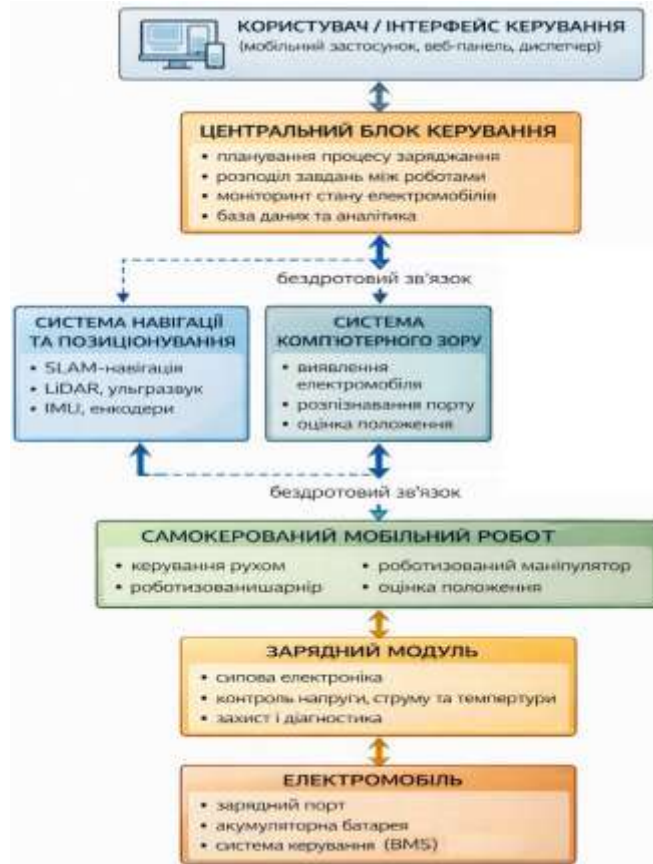


Рисунок 1 – Структурна схема інтелектуальної системи автоматичного заряджання електромобілів

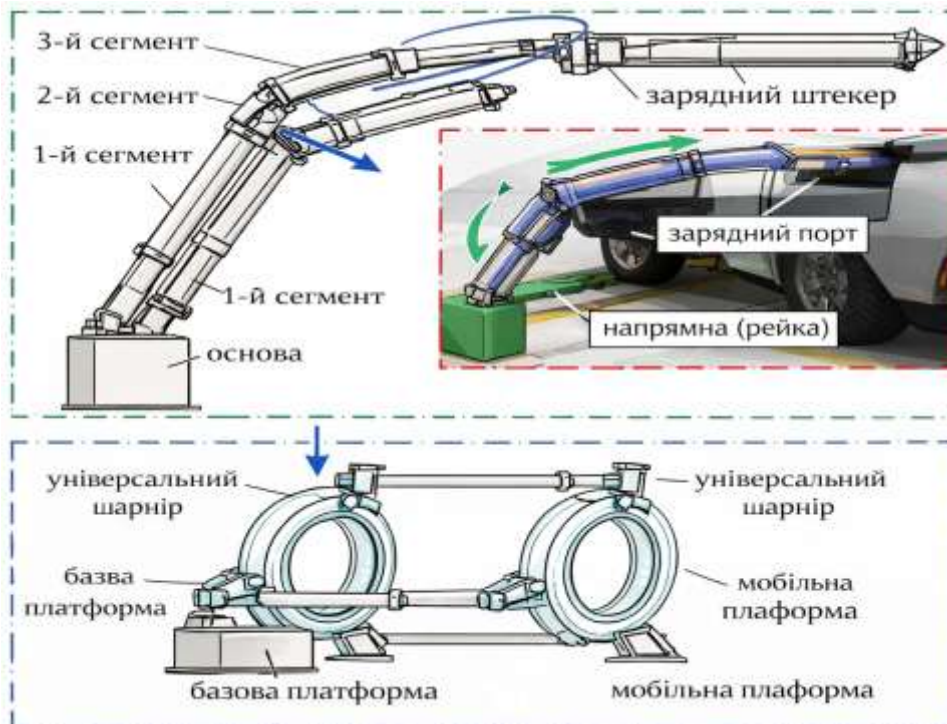


Рисунок 2 – Конструкція роботизованого маніпулятора автоматичної системи заряджання електромобілів

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз систем заряджання

Характеристика	Стаціонарна станція	Бездротове заряджання	Роботизована система
Гнучкість	низька	середня	висока
Участь водія	необхідна	мінімальна	не потрібна
Вартість масштабування	висока	висока	помірна
Автоматизація	часткова	часткова	повна

Для реалізації зазначених етапів застосовуються алгоритми машинного навчання, методи SLAM-навігації та системи адаптивного керування.

Запропонована інтелектуальна система має низку суттєвих переваг:

- підвищення зручності користування електромобілями;
- зменшення потреби у стаціонарних зарядних станціях;
- ефективне використання простору парковок;
- можливість масштабування системи;
- інтеграція з «розумними» міськими системами.

У перспективі така система може бути використана в торговельних центрах, житлових комплексах, аеропортах і логістичних хабах, а також інтегрована з відновлюваними джерелами енергії.

Висновки

У статті запропоновано концепцію інтелектуальної системи автоматичного заряджання електромобілів із застосуванням самокерованих роботів. Розглянуто архітектуру системи, принципи її роботи та ключові переваги. Запропонований підхід сприяє підвищенню ефективності зарядної інфраструктури та створює передумови для подальшого розвитку автоматизованих сервісів у сфері електротранспорту. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну перевірку системи, оптимізацію та оцінку економічної ефективності.

Література

1. **Багач Р. В.** Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму : дис. ... канд. техн. наук : [номер спеціальності]. Харків, 2024. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/20343> (дата звернення: 04.03.2026).
2. **Багач Р. В., Гнатов А. В.** Аналіз та дослідження основних типів зарядних станцій для електромобілів. *Проблеми ресурсозбереження в промисловості та на транспорті* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. (Харків, 23–25 жовт. 2024 р.). Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. С. 20–23.
3. **Miseikis J. et al.** 3D vision guided robotic charging station for electric and plug-in hybrid vehicles. 2017. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.05381>.
4. **Белоконь К. В. та ін.** Стале споживання та виробництво у глобальних ланцюгах створення вартості. [Назва типу видання, напр. монографія або зб. тез]. [Місто], 2024. URL: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/167974> (дата звернення: 04.03.2026).
5. **Ju Y. et al.** Robo-chargers: Optimal operation and planning of a robotic charging system to alleviate overstay. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2023. Vol. 15, no. 1. P. 770–782. DOI: <https://doi.org/10.1109/tsg.2023.3286434>.

6. **Mahaadevan V. C. et al.** AViTRoN: advanced vision track routing and navigation for autonomous charging of electric vehicles. *IEEE Access*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3355018>.

УДК 629.3

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Смирнов Олег Петрович, докт. техн. наук, професор каф. автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: smirnov1oleg@gmail.com, ORCID ID [0000-0003-4881-9042](https://orcid.org/0000-0003-4881-9042)

Борисенко Анна Олегівна, канд. техн. наук, доцент каф. автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: anutochka2111@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>

Мовчан Нікіта Геннадійович, аспірант каф. автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: nikitamovchan22@gmail.com, ORCID ID [0009-0005-0694-5990](https://orcid.org/0009-0005-0694-5990)

Електрообідь, обладнаний акумуляторними батареями, ефективною системою управління BMS (від англ. Battery Management System, BMS) та сучасними елементами керування, забезпечує практичне, надійне і екологічне рішення для міського транспорту. Безперебійна та ефективна робота електричного транспортного засобу значною мірою залежить від системи моніторингу й управління акумуляторними батареями. Для продовження терміну служби батарей і покращення загальної ефективності електрообіля критично важливим є вдосконалення механізмів управління акумуляторними системами та методів їх терморегулювання [1].

Робоча температура суттєво впливає на ефективність літій-іонних акумуляторів, що вимагає впровадження високоточного теплового управління для забезпечення оптимальної ефективності, безпеки, економічності та довговічності. Дослідження системи теплового управління акумуляторними батареями електрообілів охоплює різноманітні аспекти розробки, які включають проектування конфігурації та геометричної структури відповідно до компонування елементів акумулятора і блоків, а також вибір або розробку матеріалів, що відповідають вимогам до рівня ефективності та безпеки [2].

Під час заряджання та розряджання літій-іонних акумуляторів, особливо у високоємних батареях електрообілів, накопичується тепло, що утворюється внаслідок електрохімічних процесів. Це може призводити до теплового удару, зниження ефективності та створювати потенційну загрозу для безпеки водія та пасажирів. Діапазон температур, що варіюється від 15 °C до 35 °C, визначається як оптимальний для функціонування літій-іонних акумуляторів. Проте

існує важлива рекомендація щодо мінімізації температурного відхилення всередині акумуляторного блоку, адже воно має безпосередній вплив на електрохімічні властивості акумулятора. Зокрема, величина такого відхилення не повинна перевищувати 5 °С, що сприяє попередженню виникнення неоднорідності у його електричних характеристиках. Крім того, експлуатація при низьких температурах може призводити до негативних наслідків, таких як скорочення ємності та деградація активних матеріалів через уповільнення швидкості електрохімічних реакцій [3].

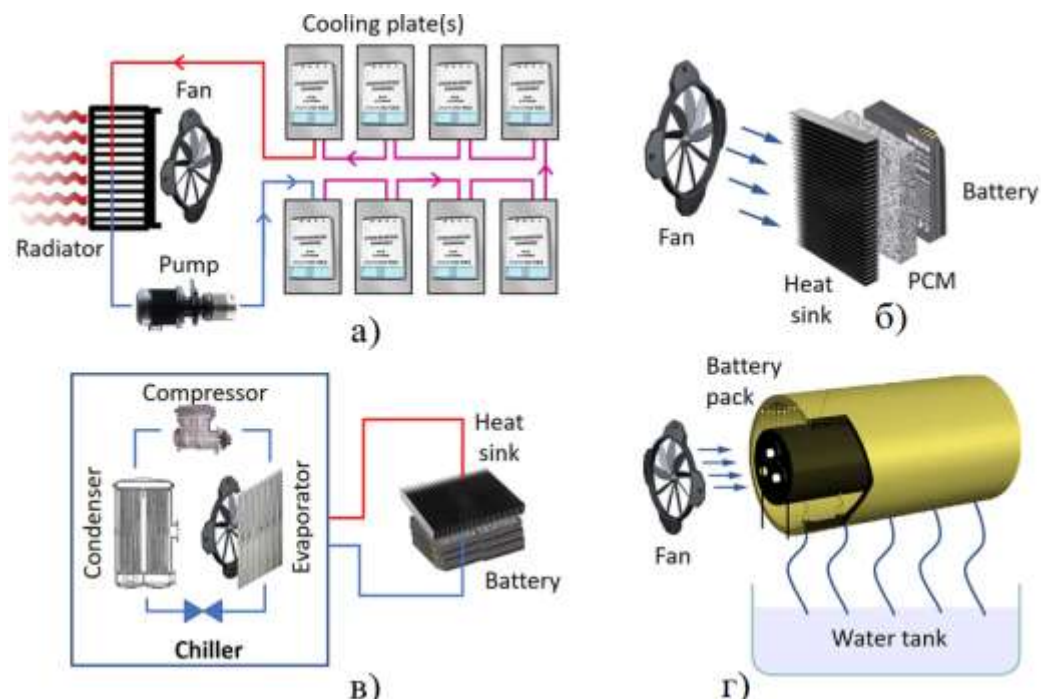
Для забезпечення масового впровадження електромобілів у різноманітних кліматичних умовах, а також для задоволення вимог до їх довговічності, збільшеної дальності пробігу та стабільної роботи, необхідною є ефективна та економічно обґрунтована система теплового управління акумулятором BTMS (від англ. Battery Thermal Management System, BTMS). Ця система створює сприятливі умови для функціонування акумуляторного блоку. BTMS виконує охолодження акумуляторного блоку літій-іонного типу у випадку перевищення температурного порогу та здійснює його нагрівання за надто низьких температур навколишнього середовища. Додатково, BTMS сприяє рівномірному розподілу температури між блоками, запобігаючи неоднорідності напруги у окремих елементах акумулятора.

Протягом останніх десятиліть наукові дослідження активно концентрувалися на вдосконаленні систем теплового управління акумулятором BTMS, оскільки ці системи займають ключову позицію у механізмах енергозабезпечення сучасних електромобілів. Забезпечення належного теплового управління в літій-іонних акумуляторах електромобілів є критично важливим завданням, враховуючи високе навантаження на технологію та її максимальне використання у сферах, пов'язаних із транспортом. На рис. 1 представлені різні методи терморегулювання літій-іонних акумуляторів [4].

Існує три основні категорії методів охолодження: активні, пасивні та гібридні. Їх класифікують на основі типу охолоджувального середовища, рівня енергоспоживання та механізмів передачі тепла. Серед активних систем охолодження виділяють повітряне, рідинне, холодильне та занурювальне охолодження, які забезпечують відведення тепла за рахунок споживання зовнішньої енергії.

Повітряне охолодження передбачає використання повітря або попередньо охолодженого повітря з пасажирського салону, яке циркулює за допомогою вентилятора. У рідинному охолодженні в якості теплоносія застосовуються різноманітні рідини, які циркулюють у замкнутому контурі для відведення тепла від акумуляторних елементів через термоконтактні компоненти.

При цьому рідина не має прямого контакту з акумуляторами. Холодильне охолодження використовує теплоту фазового переходу двофазного середовища, що забезпечує ефективний процес тепловідведення.



- а – охолодження за допомогою холодоагенту через охолоджувальні пластини;
 б – охолодження за допомогою вентилятора; с – охолодження рідким холодоагентом;
 д – охолодження туманом із використанням випаровуваної рідини

Рисунок 1 – Методи терморегулювання літій-іонних акумуляторів [4]

Занурювальне охолодження є окремим видом рідинного методу, що базується на прямому контакті акумуляторів з діелектричним охолоджувальним середовищем.

Висновки

Грунтуючись на проведених дослідженнях та впровадженні в галузі, рідинне охолодження – зокрема, непряме рідинне охолодження за допомогою холодних пластин – є найефективнішим та найширше використовуваним методом для акумуляторних батарей електромобілів. Він забезпечує кращу тепловіддачу та рівномірність температури, що є важливим для високоефективних та потужних застосувань, таких як швидка зарядка.

Література

1. **Gharehghani A. et al.** Progress in battery thermal management systems technologies for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 202. 114654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114654>.
2. **Ali A. O. et al.** Comprehensive review of battery management systems for electric vehicles: Thermal management, charging strategies, and emerging technologies. *Journal of Power Sources*. 2025. Vol. 658. 238269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238269>.
3. **Nickol A. et al.** GITT Analysis of Lithium Insertion Cathodes for Determining the Lithium Diffusion Coefficient at Low Temperature: Challenges and Pitfalls. *Journal of The Electrochemical Society*. 2020. Vol. 167, no. 9. 090546. DOI: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab9404>.

4. **Ravindran M. A. et al.** A Novel Technological Review on Fast Charging Infrastructure for Electrical Vehicles: Challenges, Solutions, and Future Research Directions. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 82. P. 260–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.009>.

УДК 621.352.6

ВПЛИВ РЕЖИМУ РОБОТИ ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТА З ПРОТОНО-ОБМІННОЮ МЕМБРАНОЮ НА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Авраменко Андрій Миколайович^{1,2},

1 – д.т.н., пров. наук. співр. ІЕМС ім. А.М. Підгорного НАН України,
2 – професор кафедри ДВЗ, Харківський національний автомобільно-дорожній
університет, e-mail: an0100@ukr.net, ORCID0000-0001-8130-1881

Кривда Віталій Валерійович, канд. техн. наук, доцент кафедри автомобілів і
автомобільного господарства, Національний ТУ «Дніпровська політехніка»,
e-mail: krivda.v.v@nmu.one, ORCID:0000-0002-8304-2016

Левтеров Антон Михайлович, к.т.н., ст. наук. співр., відділу
термогазодинаміки енергетичних машин, ІЕМС ім. А.М. Підгорного НАН
України, e-mail: antmix1947@gmail.com, ORCID0000-0001-5308-1375

Підвищення вимог до ККД та екологічних показників транспортних енергоустановок вимагає пошуку шляхів зі зниження рівня викидів та підвищення їх ККД [1]. Одним із перспективних напрямків є використання гібридних енергоустановок, наприклад, ДВЗ та модуля Li-іон акумуляторів [2], або низькотемпературних паливних елементів (ПЕ) та модуля Li-іон акумуляторів [3].

Однією з основних переваг таких рішень є можливість підвищення сумарного ККД та зниження рівня шкідливих викидів, а також гнучкість керування при їх експлуатації у складі автомобіля з гібридною енергоустановкою, наприклад, можливість використання системи рекуперації енергії гальмування для зарядки модуля акумуляторів.

Основні складносці, що виникають при використанні автомобілів з гібридними енергоустановками є недостатньо розгалужена мережа сервісних станцій, відсутність водневих та електро-заправних станцій, складносці зі зберіганням запасу водню на борту автомобіля та деградація паливних елементів і акумуляторів, а також відсутність в Україні спеціалізованих підприємств з утилізації Li-іон акумуляторів.

Робоча температура низькотемпературного паливного елемента з протонно-обмінною мембраною перебуває в межах від 60 до 80°C, а для деяких конструкцій до 100 °C [3].

Метою роботи є оцінка впливу режимів роботи ПЕ на його характеристики.

В представленій роботі, з використанням чисельних методів, розглянуто вплив трьох режимів роботи ПЕ на його робочі характеристики (розглянуто стехіометричне співвідношення для водню та повітря в діапазоні (водень – 1,05; 1,2; 1,35 і повітря – 1,5; 2; 2,5)).

Порівняльне математичне моделювання проведено в тривимірній стаціонарній постановці для режимів з робочою температурою ПЕ 70 °С. Матеріал протон-обінної мембрани – Nafion.

В якості палива розглядається чистий водень (мольна частка 1), а в якості окислювача – кисень повітря (враховується наявність азоту та діоксиду вуглецю).

Схему загального вигляду фрагменту ПЕ (декількох комірок) наведено на рис. 1.

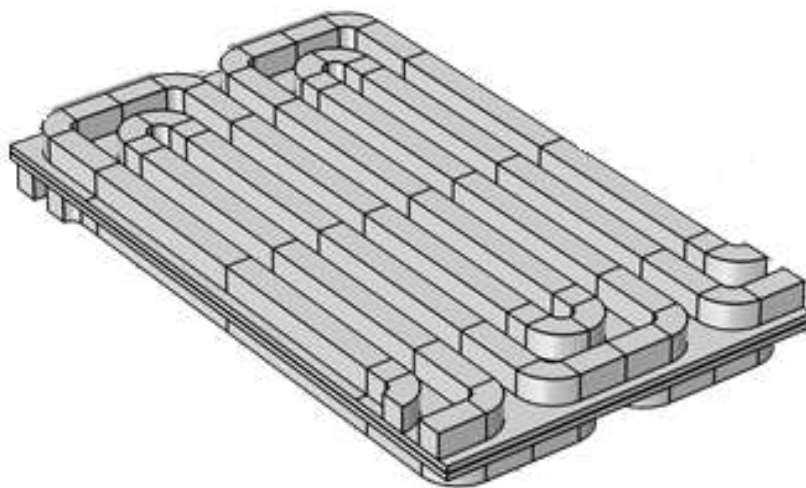


Рисунок 1 – Схема загального вигляду фрагменту ПЕ

Розподіл мольної частки водню та кисню під час роботи ПЕ (для режиму з робочою температурою 70 °С) наведено на рис. 2.

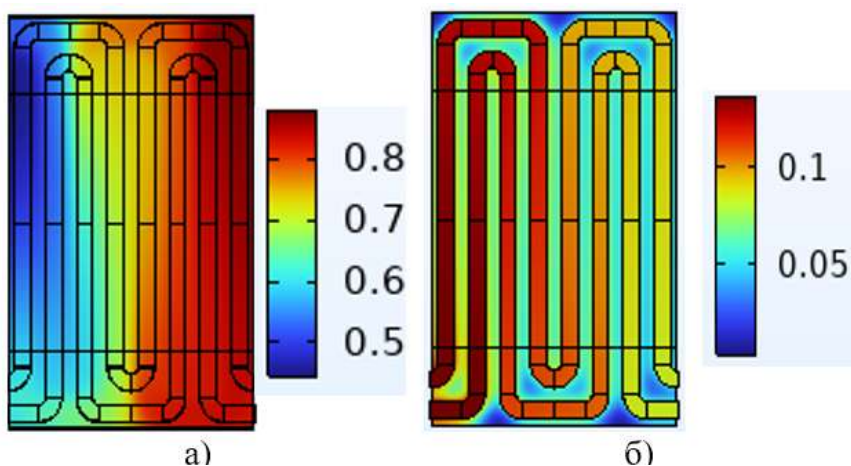


Рисунок 2 – Розподіл мольної частки водню (а) та кисню (б) під час роботи ПЕ

Для розглянутого режиму роботи ПЕ мольна частка водню в паливних каналах змінюється в межах від 0,88 на вході до 0,45 на виході (рис. 2). Зміна мольної частки кисню в повітряних каналах під час роботи ПЕ на розглянутому режимі змінюється в межах від 0,14 на вході до 0,04 на виході (рис. 2).

Результати порівняльних розрахунків (графіки поляризації, в залежності від стехіометричних співвідношень) наведені на рис. 3.

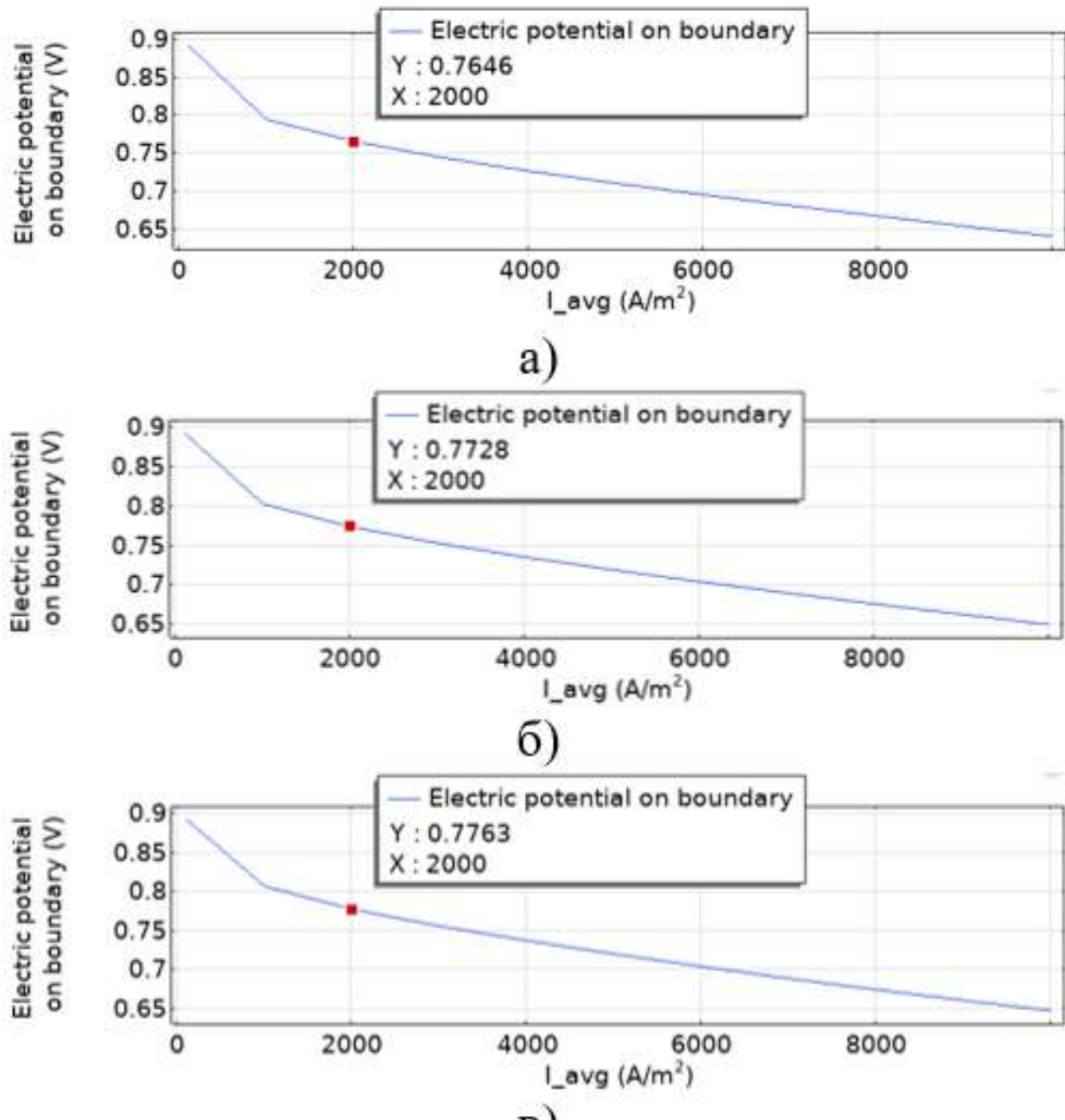


Рисунок 3 – Графіки поляризації в залежності від стехіометричних співвідношень: а – водень – 1,05/повітря – 1,5; б – водень – 1,2/повітря – 2; в – водень – 1,35/повітря – 2,5

Як видно з наведених результатів, зі збільшенням значень стехіометричних співвідношень паливної суміші у ПЕ зростає напруга на комірці з 0,7646 В до 0,7763 В (при рівних значеннях осередненої щільності струму $I_{сер} = 2000$ А/м²), що свідчить про підвищення його потужності на 1,5% (рис. 3).

Висновки

За результатами порівняльного математичного моделювання показано, що зі збільшенням значень стехіометричних співвідношень водню та повітря у ПЕ на режимах з робочою температурою 70 °С поліпшуються експлуатаційні показники енергоустановки.

Література

1. Yi Y. et al. Accelerating Towards Sustainability: Policy and Technology Dynamic. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, no. 8. 3668. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17083668>.
2. Borodenko Y. et al. Energy aspects of automobile transport. *Automobile transport*. 2023. Vol. 53. P. 37–50. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2023.53.0.05>.
3. Ermis K., Toklu E., Yegin M. Investigation of operating temperature effects on PEM fuel cell. *Journal of Engineering Research and Applied Science*. 2020. Vol. 9 (2). P. 1538–1545. URL: <https://www.journaleras.com/index.php/jeras/article/view/213> (дата звернення: 04.03.2026).

УДК 641.43

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЧОТИРИТАКТНОГО ПНЕВМОДВИГУНА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Нікітченко Ігор Миколайович, завідувач кафедри ДВЗ, кандидат технічних наук, доцент Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: igor.nikitchenko@gmail.com, ORCID [0000-0002-9481-4296](https://orcid.org/0000-0002-9481-4296)

Кляузер Сергій Андрійович, аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: klyauzersergei@gmail.com, ORCID: [0009-0004-4582-6794](https://orcid.org/0009-0004-4582-6794)

Пневматичні двигуни, що працюють на енергії стисненого повітря - є перспективним напрямком завдяки їхній нульовій емісії в місці експлуатації, простоті конструкції та пожежобезпечності. Чотиритактні пневмодвигуни - є менш дослідженими в порівнянні з традиційними двигунами внутрішнього згоряння, проте мають значний потенціал для застосування у міському циклі руху.

Метою роботи є аналіз робочого процесу чотиритактного інтегрованого пневмодвигуна, визначення його основних параметрів та комплексна оцінка енергетичних показників.

Системи пневматичного приводу можна класифікувати за ступенем інтеграції з традиційним ДВЗ на повністю пневматичні, послідовні та паралельні пневмо-гібриди, а також інтегровані (комбіновані) системи. Саме інтегрований Пневмо-ДВЗ, де циліндри двигуна можуть виконувати функції

камери згоряння, пневмодвигуна або компресора, є об'єктом подальших досліджень.

Хоча пневмодвигун, як і ДВЗ, може працювати і в 2-х і 4-х тактному режимі роботи - на відміну від ДВЗ, у чотиритактному пневмодвигуні - робочий цикл має суттєві відмінності.

Такт впуску - наповнення циліндра повітрям низького тиску при русі поршня до нижньої мертвої точки (НМТ).

Такт стиснення - для зниження опору («негативного моменту») відкривається клапан буферної камери, що збільшує об'єм стиснення та полегшує прокручування вала.

Робочий хід - у верхній мертвій точці (ВМТ) подається повітря високого тиску з резервуара через буферну камеру в циліндр, що створює необхідний крутний момент.

Такт випуску - виштовхування відпрацьованого повітря в атмосферу при русі поршня до ВМТ; при цьому клапан буферної камери закривається в НМТ для запобігання зворотному потоку.

Принципова схема такої системи (рисунок 1) передбачає наявність резервуара стисненого повітря (7), буферної камери (8) та системи керування запірних клапанів (9, 10).

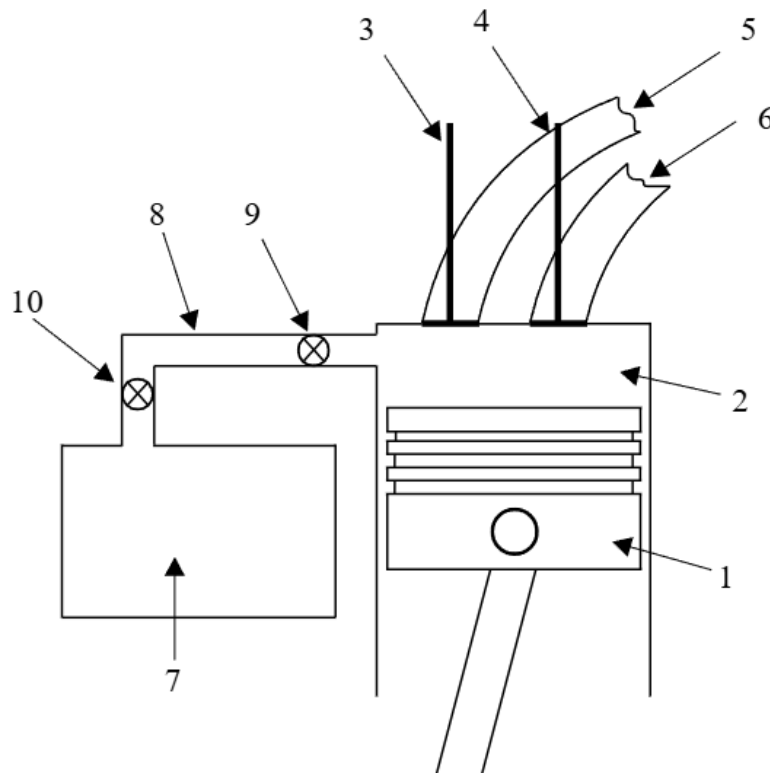


Рисунок 1 – Принципова схема пневматичної гібридної системи.

1 - поршень, 2 – циліндр, 3 – випускний клапан, 4 – впускний клапан, 5 – випускний канал, 6 – впускний канал, 7 – резервуар з стисненим повітрям, 8 – буферна камера, 9 – перший запірний клапан, 10 – другий запірний клапан

Робота, виконана пневмодвигуном за один цикл, визначається площею індикаторної діаграми процесу розширення повітря. Теоретична робота газу може бути визначена за рівнянням політропного процесу розширення:

$$L = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{n-1} \quad (1)$$

де p_1, p_2 – тиск повітря на початку та в кінці розширення, Па;
 V_1, V_2 – відповідні об'єми, м³;
 n – показник політропи.

Потужність пневмодвигуна визначається за формулою:

$$N = \frac{L \cdot z \cdot n_{об}}{30 \cdot \tau} \quad (2)$$

де τ – тактність
 z – кількість робочих циклів за один оберт колінчастого вала;
 $n_{об}$ – частота обертання, хв⁻¹.

Конструктивно інтегрований пневмо-ДВЗ є багатофункціональною енергетичною установкою. Основна конструктивна особливість полягає в тому, що циліндри двигуна звичайного ДВЗ можуть виконувати ролі камери згоряння, пневматичного двигуна та компресора. Також такі енергетичні установки можуть мати: додаткові пневматичні клапани, буферні камери, системи безкулачкового газорозподілу, високонапірні балони.

Основною сферою застосування такої пневматичної установки на ДВЗ є міський цикл роботи. Коли ми переносимо роботу пневмодвигуна саме у зони парковок, заторів, навантажених трафіків, щільного потоку і загалом в місцях де швидкість транспортних засобів не перевищує 10-15 км/год - ми прибираємо брудний вихлоп саме там, де він накопичується найсильніше. Це і є основним місцем, в якому пневмодвигун реалізує всі свої переваги в найбільшому обсязі. На ділянках де нам потрібна більша швидкість - ДВЗ буде задіяний в своєму звичайному циклі.

Висновки

Показано перспективність використання пневмодвигунів у складі силових установок малогабаритних транспортних засобів. Під час роботи виконано аналіз літературних джерел, і з аналізу ми можемо зробити висновок що робочий процес пневмодвигуна може бути реалізований і з двох тактним режимом і з чотирьохтактним. Проаналізовано робочий процес чотиритактного пневмодвигуна та визначено послідовність тактів робочого циклу, також було наведено аналітичні залежності для оцінки роботи та потужності пневмодвигуна.

Визначено основні конструктивні та експлуатаційні особливості чотиритактного пневмодвигуна.

Література

1. **Psanis C.** Modelling and experimentation on air hybrid engine concepts for automotive applications. 2007. P. 32–36.
2. **Verma S. S.** Latest Developments of a Compressed Air Vehicle: A Status Report / C. Psanis. 2013.
3. **Trajkovic S.** The Pneumatic Hybrid Vehicle: A New Concept for Fuel Consumption Reduction. 2010.

УДК 621.311.1

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ ШЛЯХОМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧАМИ

Петренко Андрій Володимирович, канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії енергосистем, Національний університет біоресурсів і природокористування України, *e-mail: petrenko@nubip.edu.ua*,
ORCID ID 0000-0002-8246-4911

Забіяка Денис Олександрович, аспірант,
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
e-mail: denis19z19@gmail.com,
ORCID ID 0009-0003-2363-097X

У сучасних промислових електромережах активно впроваджуються відновлювані джерела енергії, зокрема сонячні та вітрові електростанції. Зростання частки генерованої електроенергії від відновлюваних джерел призводить до значної непередбачуваності як виробництва, так і споживання електроенергії. У таких умовах ефективно використання систем накопичення енергії BESS стає ключовим для забезпечення стабільності електроенергії в мережі, зниження витрат на електроенергію та зменшення пікового навантаження [1, 2, 5].

Традиційні методи керування, засновані на фіксованих правилах або модельно-прогнозованому підході, мають суттєві обмеження, та не достатньо адаптовані до змінних тарифів, високої невизначеності прогнозів та вимог роботи в реальному часі. Крім того, такі методи часто не враховують одночасно деградацію акумуляторів, пікові навантаження та економічні показники [2, 6, 7].

Алгоритми глибокого навчання з підкріпленням DRL пропонують принципово інший підхід. Вони не потребують точної математичної моделі системи, а навчаються безпосередньо через взаємодію з середовищем. Агент такого навчання формує адаптивну стратегію керування, оптимізуючи функцію винагороди, яка може включати кілька цілей одночасно: мінімізацію вартості

електроенергії, згладжування пікових навантажень, зменшення зносу акумуляторів та зниження викидів вуглецю [3, 4, 8].

Типова структура керування є ієрархічною. На верхньому рівні застосовуються нейронні мережі для прогнозування: рекурентні мережі або моделі на базі трансформерів прогнозують навантаження, генерування від відновлюваних джерел енергії та ціни на електроенергію. На нижньому рівні працює агент глибокого навчання з підкріпленням у рамках марковського процесу прийняття рішень. До складу стану входять поточний рівень заряду акумулятора SoC, прогнози на наступні періоди, час доби, поточні тарифи та інші параметри. Дії агента – це неперервна величина потужності заряду або розряду. Функція винагороди зазвичай комбінована: негативна вартість електроенергії плюс штрафи за перевищення пікового навантаження та за інтенсивний знос акумуляторів (наприклад, за допомогою підрахунку еквівалентних циклів або методу Rainflow) [3, 9, 10].

Таблиця 1 – Порівняння ключових DRL-алгоритмів для керування BESS (за результатами 2023–2025 рр.)

Алгоритм	Переваги	Недоліки	Типові результати (економія витрат, інші ефекти)
DQN	Простота, добре для дискретних дій	Обмежений у неперервних просторах	10–22 % зниження витрат, стабільне пікове гоління
DDPG	Неперервні дії, стабільність	Чутливість до гіперпараметрів	15–25 % економії, добра адаптація до стохастичності
PPO	Стабільне навчання, sample-efficient	Повільніша збіжність	14–30 % зниження витрат, 10–20 % подовження життя батарей
SAC	Максимізація ентропії, стохастичні середовища	Вища обчислювальна складність	20–40 % економії, краща стійкість до невизначеності, 10–25 % зниження деградації

Алгоритм PPO забезпечує стабільне навчання та ефективне використання даних, SAC добре працює в умовах високої непередбачуваності завдяки механізму максимізації ентропії, тоді як інші алгоритми підходять для неперервних або дискретних дій [4, 8, 11].

У гібридних системах, де системи накопичення енергії працюють разом з газовими турбінами, глибоке навчання з підкріпленням значно знижує кількість пусків турбін, що зменшує витрати на обслуговування та подовжує ресурс обладнання [5, 12].

Особливий інтерес становлять мультиагентні підходи. Наприклад, Multi-Agent Proximal Policy Optimization з Pareto-оптимізацією дозволяє одночасно оптимізувати кілька конфліктуючих цілей: один агент мінімізує витрати на електроенергію, інший – частоту перемикачів для збереження «здоров'я» акумуляторів.

Таблиця 2 – Практичні результати застосування DRL для керування BESS у мікромережах (2023–2025 рр.)

Сценарій / Джерело	Базо-вий метод	DRL-метод	Зниження витрат	Зниження пікового навантаження / інші ефекти	Примітка
Промислова мікромережа з ВДЕ та BESS (MDPI, 2025)	Rule-based / No-ESS	MAPPO	14.68 % (загальна економія)	Зменшення перемикань батарей	Порівняно з TD3/SAC/PP O
Динамічні тарифи, BESS контроль (ScienceDirect, 2025)	Gradient-based	SAC	До 40 %	Стабільний SoC >50 %, подовження життя	Реальні профілі навантаження
Off-grid HRES з dual-battery (Sage, 2025)	Rule-based / static	DQN	>20 % LCC	До 30 % CO ₂ , >10 % деградації	Гібридні батареї
Економічний диспетч + peak shaving (ScienceDirect, 2025)	Rule-based	PPO/SAC	15–35 %	20–50 % пікове гоління	З урахуванням деградації
Федеративне навчання для будівель/мікромереж (ScienceDirect, 2025)	Локальне RL	FRL (PPO/DDPG)	5–5.5 %	4.6–5.55 % CO ₂	Збереження приватності

В умовах України впровадження таких технологій є особливо актуальним. Промисловим підприємствам доводиться взаємодіяти з високими тарифами в години пік, нестабільністю електропостачання та активним розвитком відновлюваних джерел енергії. Пілотні проекти з інтеграцією систем накопичення енергії та інтелектуальним керуванням на базі глибокого навчання з підкріпленням можуть значно підвищити енергоефективність, знизити залежність від імпорту енергоносіїв та сприяти декарбонізації промисловості [13].

Важливим є створення національних наборів даних реальних профілів навантаження та генерування електроенергії для навчання моделей, адаптованих до умов споживачів в Україні [7].

Висновки

Інтелектуальне керування системами накопичення енергії на базі глибокого навчання (зокрема PPO, SAC та інші) може забезпечити підвищення енергоефективності промислових електромереж на 15 – 40 %, шляхом зниження операційних витрат, згладжуванню пікового навантаження (до 50 %), зменшенню зносу акумуляторів (10 – 25 %) та адаптації до непередбачуваності генерування відновлюваних джерел енергії й змінних тарифів. Результати сучасних досліджень підтверджують перевагу цих методів над традиційними підходами. В Україні такі технології мають значний потенціал для промислових об'єктів, особливо в умовах зростання частки відновлюваних джерел та потреби в енергетичній незалежності.

Література

1. **Jung S. W. et al.** Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Scheduling of Energy Storage System in Microgrids. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, iss. 12. 1999. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13121999>.
2. **Selim A. et al.** Adaptive optimization of BESS and grid set points: A model-free framework for energy management under dynamic tariff pricing. *Energy*. 2026. Vol. 346. 140148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.140148>.
3. **Sage M. et al.** Deep reinforcement learning for joint dispatch of battery storage and gas turbines in renewable-powered microgrids. *Energy and AI*. 2025. Vol. 22. 100653. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100653>.
4. **Sievers J. et al.** Federated reinforcement learning for sustainable and cost-efficient energy management. *Energy and AI*. 2025. 100521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100521>.
5. **Khan W. et al.** Deep reinforcement learning-based energy management for design and control of off-grid renewable microgrids with dual-battery storage. *Energy Exploration & Exploitation*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1177/01445987251387368>.
6. **Kang H. et al.** Reinforcement learning-based optimal scheduling model of battery energy storage system at the building level. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 190, part A. 114054. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114054>.
7. **Yang J. et al.** Physics-shielded deep reinforcement learning for safe energy management of microgrids with battery health consideration. *Journal of the Franklin Institute*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2025>.
8. **Xiong B. et al.** Deep reinforcement learning for optimal microgrid energy management with renewable energy and electric vehicle integration. *Applied Soft Computing*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025>.
9. **Wu J. et al.** Deep reinforcement learning-based multi-objective energy management system for microgrids under flexible energy market. *Applied Energy*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025>.
10. **Kumar K. et al.** Deep reinforcement learning-based control strategy for integration of a hybrid energy storage system in microgrids. *Journal of Energy Storage*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025>.
11. **Esan A. B. et al.** Augmented deep reinforcement learning for the energy management of microgrids considering renewable stochastic parameters. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025>.
12. **Hosseini E. et al.** Reinforcement learning-based energy management system for lithium-ion battery storage in multilevel microgrid. *Journal of Energy Storage*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025>.
13. Четверта промислова революція: зміна напрямів міжнародних інвестиційних потоків : монографія / **А. І. Крисоватий та ін.** ; за наук. ред. А. І. Крисоватого, О. М. Сохацької. Тернопіль : Осадца Ю. В., 2018. 480 с.

УДК 621.577:624.19:536.24

КОМПЛЕКСНА 3D МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ТУНЕЛЮ МЕТРОПОЛІТЕНУ НА РОБОТУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ҐРУНТОВИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

Задіранов Вадим Сергійович, аспірант,
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова,
e-mail: vadimharj@gmail.com, ORCID ID 0009-0002-9179-9753

Сучасні міські підземні транспортні споруди є стабільними джерелами техногенного тепловиділення [1]. Умови тривалої експлуатації метрополітену призводять до поступового підвищення температури прилеглого ґрунту, що може розглядатися як додатковий низькопотенційний енергетичний ресурс для геотермальної системи. Для реалізації вирішення цього завдання була створена просторова чисельна модель спільної роботи перегінного тунелю метрополітену та масиву вертикальних ґрунтових теплообмінників в умовах м. Харків і створена кількісна оцінка впливу теплового навантаження тунелю на енергетичні показники геотермального поля. Прикладом слугує ділянка біля станції метро «Вокзальна» в м. Харків.

Побудовано тривимірну модель ґрунтового масиву глибиною 115 м з урахуванням локальних ґрунтів. Теплофізичні характеристики шарів ґрунту прийнято відповідно до інженерно-геологічних даних для м. Харків [2].

Тунель змодельовано як круглу конструкцію внутрішнім діаметром 5,1 м, розташовану на глибині 16,5 м, з чавунною обробкою товщиною 0,4 м (рис. 1). Лінійне теплове навантаження від поїздів і пасажирів прийнято 180 Вт/м, швидкість руху повітряних мас в тунелі - 5 м/с [3].

Спочатку було виконано 50-річне моделювання теплового впливу тунелю на непорушений ґрунт без роботи теплообмінників. Аналізувалась середня об'ємна температура репрезентативного блоку ґрунту, з якого в подальшому здійснюється відбір теплоти.

Результати показали, що за умов постійної експлуатації тунелю середня температура ґрунтового блоку зростає приблизно на 1,3-1,5°C порівняно з варіантом без тунелю. До кінця розрахункового періоду формується квазістаціонарний тепловий режим (рис. 2).

Отриманий результат принципово важливий для інженерних розрахунків: початкові умови для геотермального поля повинні враховувати попередній багаторічний прогрів ґрунту. У подальших розрахунках теплообмінники вводились у попередньо прогрітий ґрунт.

Після формування прогрітого ґрунту в модель було введено масив із 30 вертикальних теплообмінників глибиною 100 м, що розміщені в 1 ряд. Витрата теплоносія через одну свердловину становить 0,2 л/с, температура на вході – 5 С.

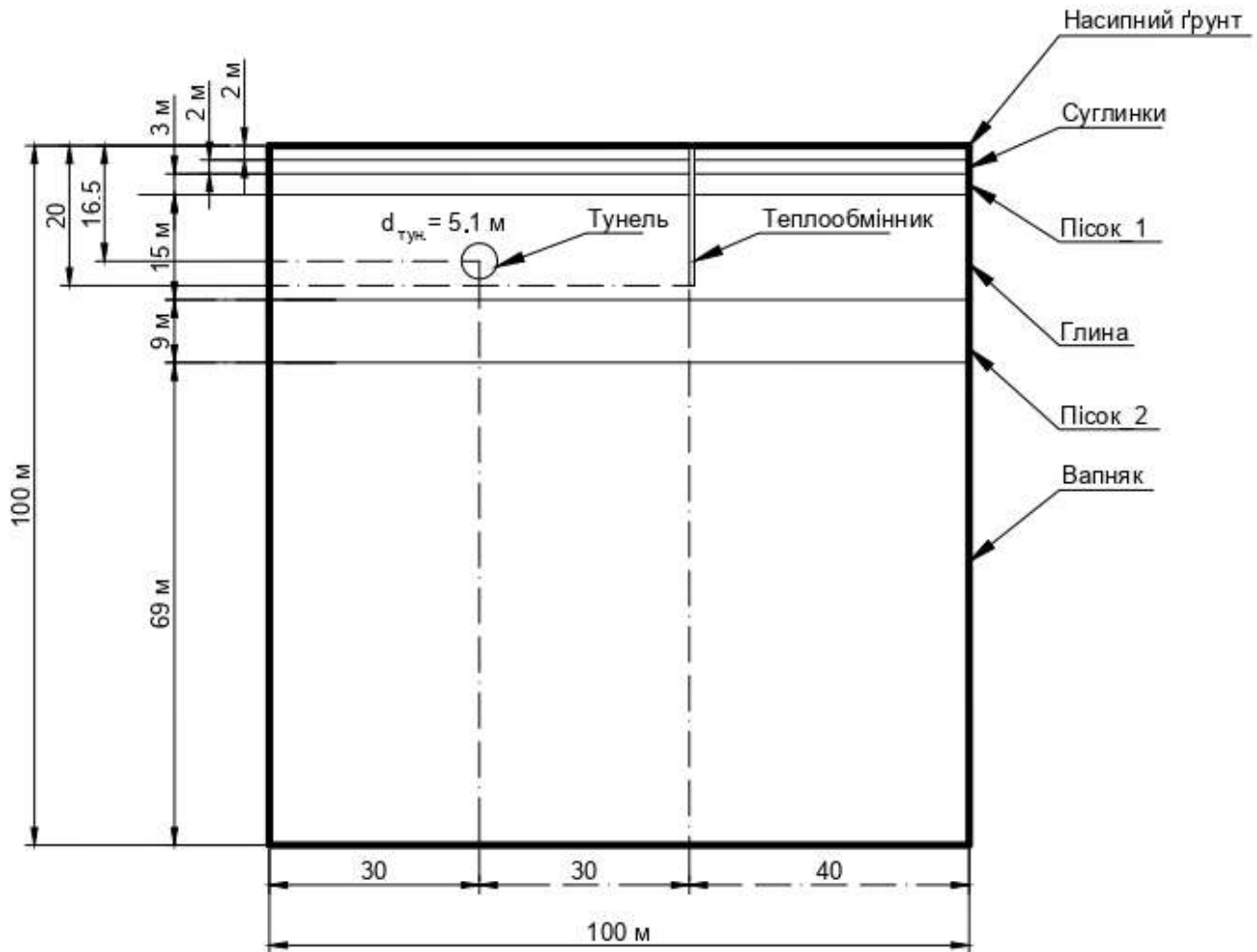


Рисунок 1 – Геометрична схема моделі [2]

Порівняння сценаріїв з урахуванням та без урахування тунелю показало (рис. 3, 4):

1) температура теплоносія на виході зі свердловин у випадку врахування тунелю вища на $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$;

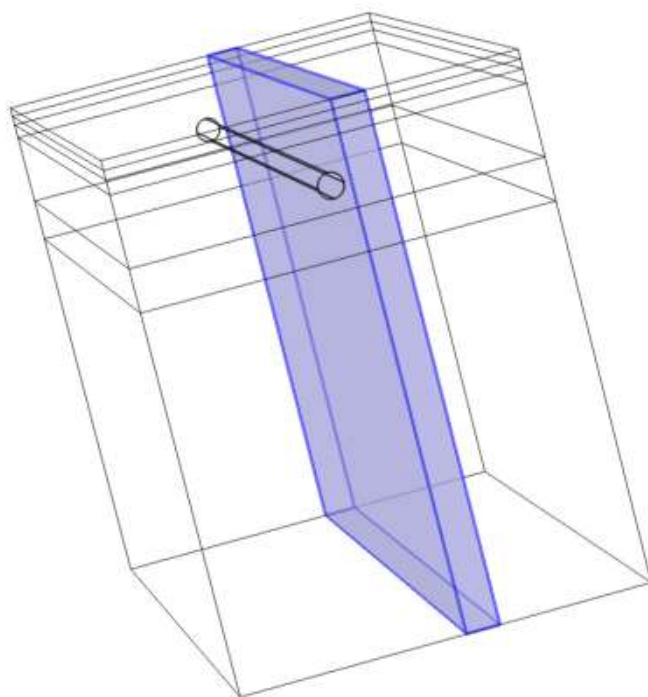
2) середня теплова потужність відбору зростає на 26,7 % при мінімальній відстані 5 м між тунелем і масивом;

3) зі збільшенням відстані ефект закономірно зменшується (до 4 % при 20 м).

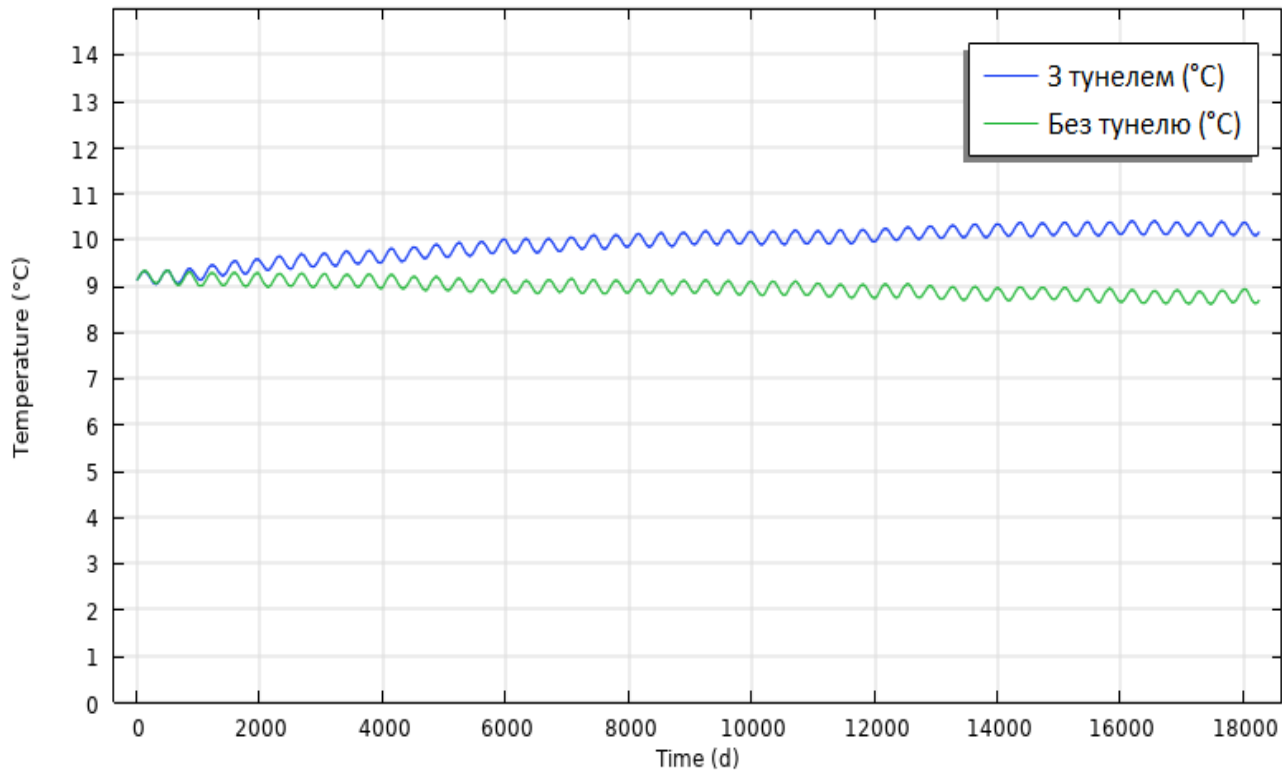
4) Отримані результати свідчать, що теплове навантаження тунелю може розглядатися як фактор підвищення ефективності геотермального поля. Величина ефекту визначається геометрією масиву та відстанню до тунелю.

5) Також виконано розрахунки для конфігурації поля теплообмінників у 2 паралельні ряди по 15 свердловин за незмінній глибині, кроках та режимах роботи. У цьому випадку тепловий вплив тунелю також зберігається, однак через більш щільне розміщення свердловин посилюється теплова взаємодія між свердловинами й формується ширша зона охолодження ґрунту. В такому випадку приріст середньої температури теплоносія при врахуванні тунелю

становить близько $0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$, а середня теплова потужність відбору зростає приблизно на $21,3\%$ порівняно з випадком без теплового впливу тунелю.

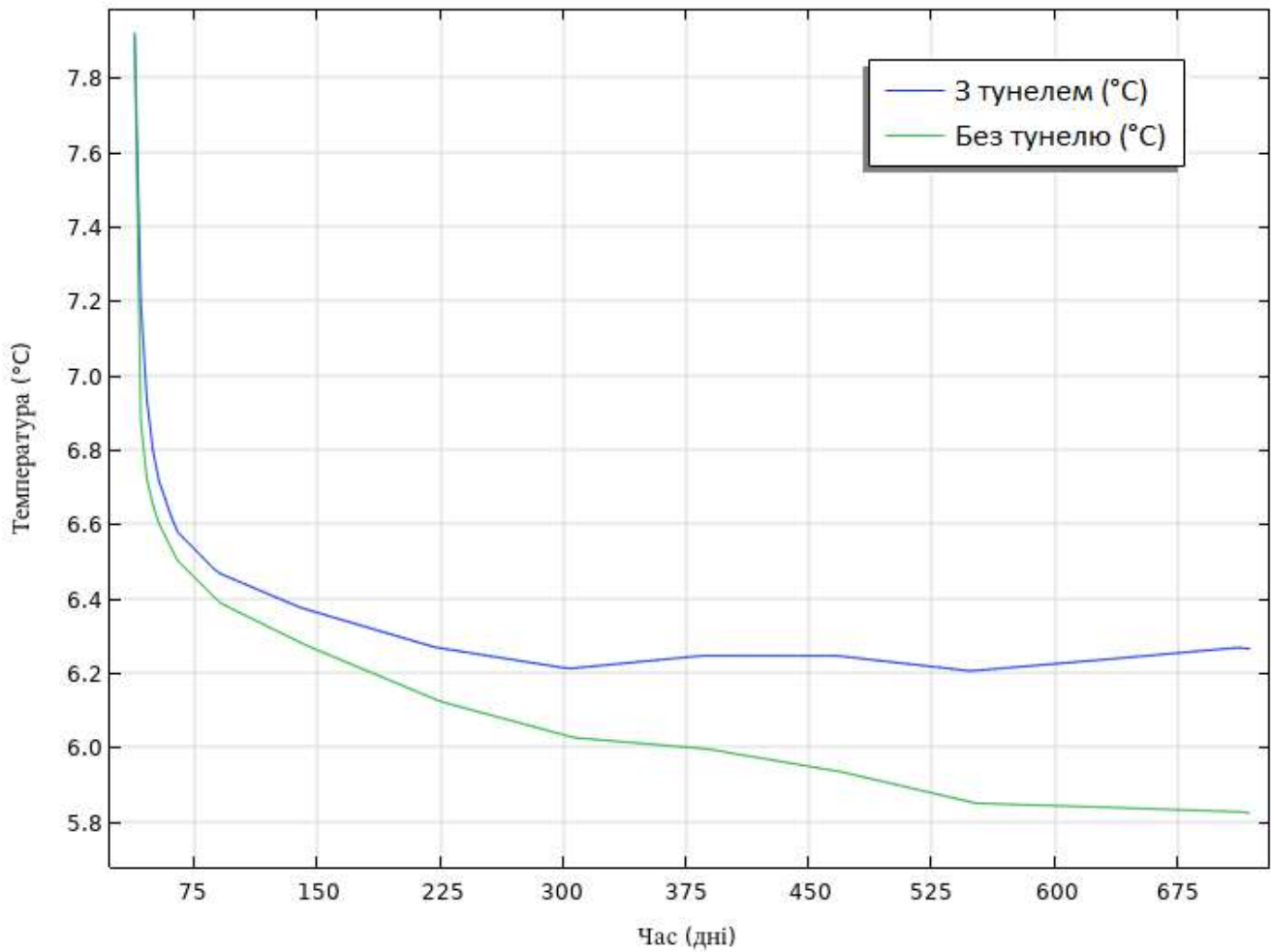


(a)

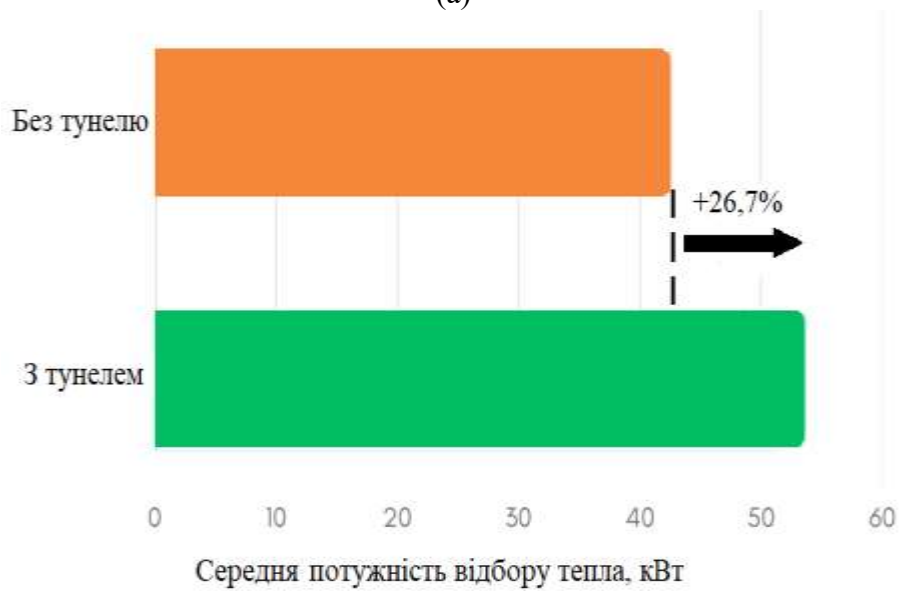


(б)

Рисунок 2 – Блок ґрунту (а) і середня температура ґрунту на протязі 50 років (б)



(a)



(б)

Рисунок 3 – Середня температура (а) теплоносія і середня потужність (б) відбору тепла в масиві з 30 теплообмінників (1 ряд).

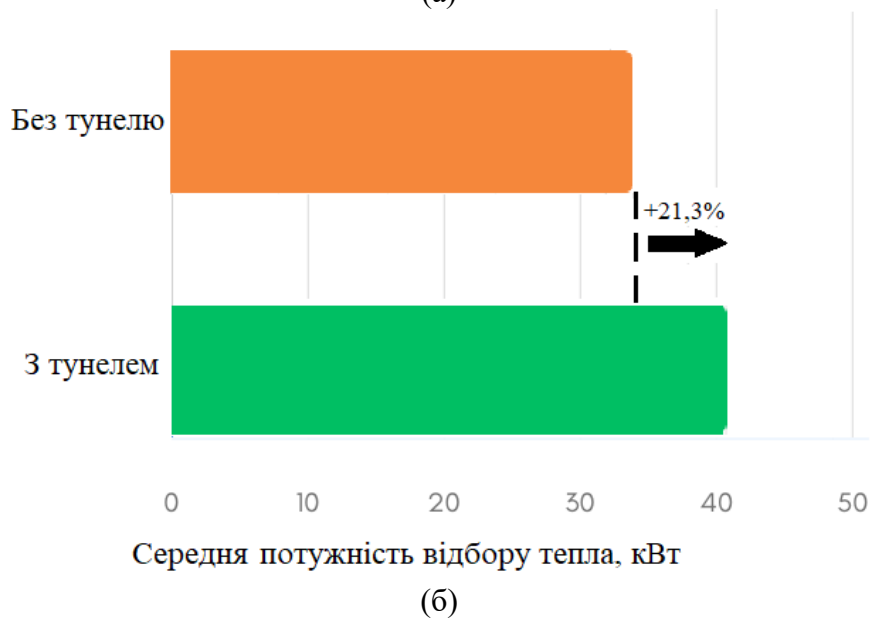
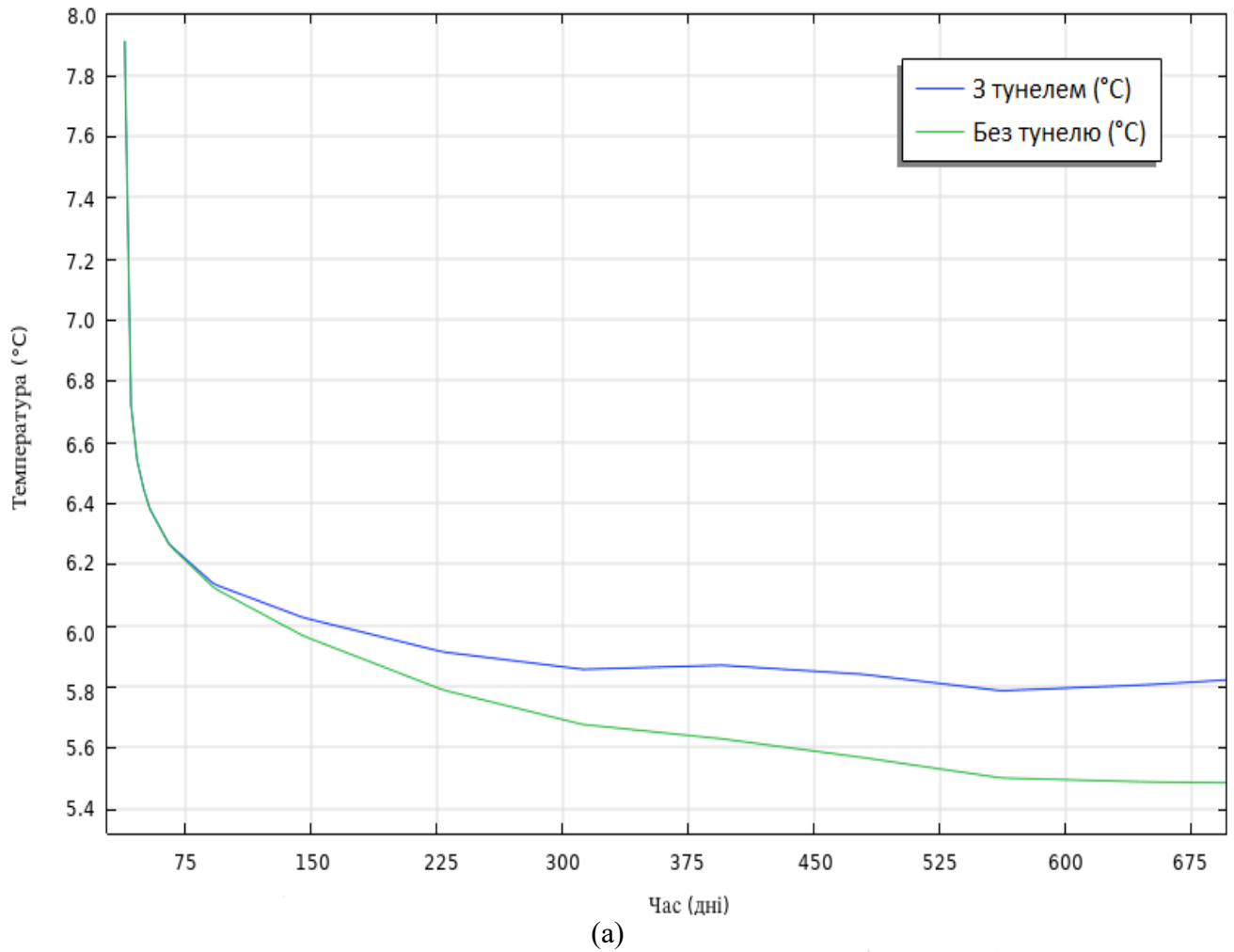


Рисунок 4 – Середня температура (а) теплоносія і середня потужність (б) відбору тепла в масиві з 2 рядів по 15 теплообмінників

Висновки

Комбінована 3D-модель показала, що тунель метрополітену формує стійкий тепловий фон у прилеглому ґрунті, тому при оцінці роботи вертикальних ґрунтових теплообмінників у зоні впливу метро необхідно враховувати сам тунель і прогрітий ним масив. Після введення теплообмінників видно практичний результат: за наявності тунелю система працює в більш сприятливих температурних умовах і має кращі передумови для стабільного відбору теплоти. Порівняння конфігурацій поля (1×30 та 2×15) підтвердило, що компоновка змінює картину охолодження ґрунту та взаємний вплив свердловин, однак тепловий внесок тунелю зберігається в обох випадках. Також встановлено очевидну закономірність: чим ближче поле розташоване до тунелю, тим відчутніший його вплив, а зі збільшенням відстані ефект поступово слабшає, що робить дистанцію до тунелю простим проектним параметром для міських умов.

Література

1. **Задіранов В. С.** Огляд досвіду утилізації скидної теплоти метрополітену. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2024. № 48. С. 50–66. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.48.50-66>.
2. **Задіранов В. С.** Моделювання утилізації теплоти метрополітену з використанням вертикального ґрунтового теплообмінника та теплового насоса в умовах Харкова. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2025. № 54. С. 122–139. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.122-139>.
3. **Задіранов В. С.** Чисельне 3D-моделювання нестационарного температурного поля внутрішньої поверхні тунелю метрополітену. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2025. № 55. С. 96–114. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.55.96-114>.

УДК 629.331:621.355

АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ У МІСЬКИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Селіванов Іван Олексійович, аспірант,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
e-mail: ivan.selivanov@ieeee.khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-5719-3418

Розвиток електромобільного транспорту є однією з ключових тенденцій сучасної автомобільної індустрії. В умовах динамічних змін у світовій економіці, зростання вартості енергоресурсів та періодичної нестабільності на ринку паливних ресурсів особливої актуальності набуває пошук ефективних і надійних альтернативних видів транспорту. Збільшення частки використання електромобілів сприяє зменшенню залежності від традиційних видів палива, підвищенню енергетичної незалежності та створенню більш стійких транспортних систем.

Ключовим елементом таких транспортних засобів є акумуляторні батареї. Під час експлуатації електромобілів акумуляторні батареї зазнають значних

теплових навантажень, що виникають у процесі заряджання та розряджання, а також під впливом зовнішніх температурних умов. Підвищення температури акумуляторів може призводити до прискореної деградації активних матеріалів, зниження ємності комірок та скорочення загального терміну служби батарейного модуля [1]. У зв'язку з цим контроль теплових режимів є важливим аспектом забезпечення довговічності акумуляторних систем електромобілів.

Ефективність та безпечність електромобілів значною мірою залежать від конструкції та хімічного складу акумуляторних батарей. Різні типи батарей відрізняються енергощільністю, терміном служби та тепловими характеристиками, що безпосередньо впливає на безпечність їх експлуатації.

Метою роботи є аналіз впливу теплових режимів акумуляторних батарей електромобілів на їх деградацію, безпеку та енергетичну ефективність в умовах міського застосування.

Характеристика літій-іонних акумуляторних батарей

Об'єктом дослідження є літій-іонні акумуляторні батареї (ЛІАБ). Ці батареї є найбільш поширеними у сучасних електромобілях завдяки високій енергощільності та тривалому ресурсу експлуатації. Вони забезпечують значну дальність пробігу на одному заряді та ефективність процесу заряджання, що робить їх привабливими для використання в міських та міжміських умовах. Термін служби ЛІАБ зазвичай складає 8-12 років або 1500-2000 циклів заряд-розряд при дотриманні рекомендованих умов експлуатації [2].

Разом із тим, ЛІАБ мають високу чутливість до теплових навантажень. Інтенсивні цикли заряд-розряд, неправильне керування температурою або зовнішні фактори можуть призводити до перегріву елементів та прискореної деградації. Максимальні допустимі температури ЛІАБ зазвичай перебувають у межах 45-60 °C [3]. Перевищення цих значень негативно впливає на довговічність елементів та безпеку експлуатації.

В межах загальної групи ЛІАБ особливої уваги заслуговують два ключові підтипи, що відрізняються хімічним складом катода та мають різну реакцію на теплові виклики міського циклу руху:

1. літій-нікель-марганець-кобальтові акумулятори (Li-NMC). Ця модифікація ЛІАБ широко застосовується у легкових електромобілях через високу енергоефективність. Технологія NMC дозволяє витримувати значну інтенсивність циклів заряд-розряд, проте потребує суворого температурного контролю;

2. літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄). Даний підтип ЛІАБ позиціонується як найбільш стійка та безпечна альтернатива класичним рішенням. Попри дещо нижчу енергощільність, LiFePO₄ демонструють вищу термостійкість та можуть витримувати підвищені температури до 60-65 °C. Головною перевагою цього підтипу є мінімальний ризик виникнення теплового розгону та значно більший життєвий цикл – до 4000 циклів [4].

Зв'язок теплових характеристик батарей із безпекою експлуатації є ключовим при розробці моделей оцінки теплової стабільності. Для кожного типу батарей необхідно враховувати максимальні робочі температури, ступінь деградації при перегріві та особливості роботи у циклах міського руху. У

цьому контексті предметом дослідження виступають теплові режими функціонування акумуляторних батарей та вплив температури на їх експлуатаційні характеристики. Вибір хімічного складу та типу батареї безпосередньо впливає на точність прогнозування температурної поведінки.

Проблема нагріву батарей

Нагрів акумуляторних батарей є природним фізико-хімічним процесом, проте його надмірність становить основний виклик для надійності електромобіля. Під час експлуатації батареї виступають як активні джерела теплової енергії, що зумовлено поєднанням фізичних та електрохімічних чинників, серед яких ключове місце займає внутрішній опір, також відомий як ефект Джоуля-Ленца. Під час проходження струму через внутрішні компоненти батареї, такі як електроди, сепаратори та електроліт, виникає внутрішній опір. Це призводить до неминучої трансформації частини електричної енергії в теплову.

Цей процес доповнюється ентропійними змінами, оскільки хімічні реакції всередині акумулятора під час циклів заряджання та розряджання супроводжуються поглинанням або виділенням енергії, інтенсивність якої безпосередньо залежить від поточного стану заряду та щільності струму. У масштабах великих акумуляторних блоків ці явища ускладнюються проблемою нерівномірності температурного поля: комірки, розташовані в центральній частині модуля, охолоджуються значно повільніше за ті, що знаходяться на периферії. Така термічна асиметрія створює стійкий температурний градієнт, який спричиняє нерівномірний знос елементів, знижуючи загальну ефективність та термін служби всієї енергетичної системи електромобіля.

Вплив температурних режимів на функціональні характеристики батарей

Термічна стабільність є важливою умовою для підтримки високих експлуатаційних показників акумуляторів. Будь-яке тривале відхилення температури від оптимального діапазону 15-35 °C ініціює каскад внутрішніх структурних змін, що негативно впливають на роботу всієї енергосистеми електромобіля [3]. Зокрема, досягнення максимальних робочих температур будь-якого типу батарей активує деградаційні механізми на мікрорівні. Це зумовлено інтенсифікацією побічних хімічних реакцій, які спричиняють руйнування активних матеріалів електродів та поступовий розклад електроліту. Такі процеси призводять до незворотної втрати ємності та стрімкого вичерпання розрахункового ресурсу акумулятора.

Окрім впливу на ресурс батареї, порушення теплового балансу створює серйозні ризики для безпеки експлуатації транспортного засобу. Зокрема, тривалий або інтенсивний перегрів може спричинити явище *thermal runaway* – процес неконтрольованого саморозігріву, під час якого швидкість внутрішніх реакцій різко зростає [4]. Такий стан може призвести до займання або руйнування акумуляторного блоку, що робить підтримку стабільних температурних режимів одним із ключових завдань при проєктуванні систем керування батареями.

Як було зазначено раніше, нерівномірний температурний розподіл та наявність термічних градієнтів у батарейному модулі впливають на роботу всіх

елементів. На практиці це проявляється у зниженні енергетичної ефективності акумуляторних батарей. Як наслідок, зменшується корисна дальність пробігу на одному заряді, що робить аналіз та контроль теплових режимів критично важливим для забезпечення стабільної роботи електромобіля в реальних умовах експлуатації.

Специфіка теплових режимів у міських умовах експлуатації

Аналіз теплових режимів акумуляторних батарей у межах міста виявляє низку чинників, що зумовлюють підвищену вразливість енергосистеми до теплових навантажень. Особливість міського циклу руху полягає у його високій динамічності, що провокує постійну температурну нестабільність акумулятора. Додатковим фактором термічного напруження виступає система рекуперації гальмування, яка в умовах щільного трафіку активується дуже часто. Короткі, але потужні імпульси зарядного струму під час сповільнення створюють циклічне чергування режимів «заряд-розряд», що заважає стабілізації теплового поля акумулятора. Ситуація ускладнюється в умовах заторів та руху типу «Stop-and-Go», де відсутність стабільного набігаючого потоку повітря погіршує природний тепловідвід [5]. Це змушує штатні системи терморегулювання працювати в екстремальних режимах для запобігання критичному перегріву елементів.

Загалом, інтенсивне циклювання, характерне для активної міської експлуатації, формує специфічний профіль навантаження, який прискорює термічну деградацію компонентів у разі неоптимального керування температурою. Таким чином, міське середовище створює комплекс викликів, де тепловий менеджмент стає вирішальним фактором для збереження ефективності та безпеки акумуляторів протягом усього періоду використання.

Висновки

Аналіз теплових режимів акумуляторних батарей електромобілів у міських умовах експлуатації є важливим для забезпечення їх надійності, безпеки та енергетичної ефективності. Інтенсивні цикли заряджання та розряджання, характерні для міського руху, спричиняють змінні теплові навантаження, що можуть прискорювати деградацію елементів батареї. Дослідження впливу температурних факторів дозволяє визначити критичні режими роботи та оцінити їх вплив на експлуатаційні характеристики акумуляторних систем. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем теплового управління батареї та оптимізації умов їх експлуатації.

Література

1. **Shen W. et al.** Heat Generation and Degradation Mechanism of Lithium Ion Batteries during High Temperature Aging. *ACS Omega*. 2022. Vol. 7. P. 44733–44742. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c0409>.
2. **Zhang J., Huang H., Zhang G.** Cycle life studies of lithium ion power batteries for electric vehicles: A review. *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 93. 112231.
3. **Wang X., Liu S., Lv S.** A Review of the Power Battery Thermal Management System with Different Cooling, Heating and Coupling System. *Energies*. 2022. Vol. 15. 1963. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15061963>.

4. **Chen Y. et al.** A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*. 2021. Vol. 59. P. 83–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017>.

5. **Çetin I. et al.** A comprehensive review of battery thermal management systems for electric vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 237, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544089221123975>.

УДК 621.311:624.132

ОПТИМІЗАЦІЯ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Балака Максим Миколайович, канд. техн. наук, доцент каф. будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури, e-mail: balaka.mm@knuba.edu.ua, ORCID 0000-0003-4142-9703

Лисак Сергій Іванович, викладач, ВСП Миколаївський будівельний фаховий коледж Київського національного університету будівництва і архітектури, e-mail: rotterdam85as@gmail.com, ORCID 0009-0009-8695-8925

Федишин Богдан Миколайович, доктор філософії, асистент каф. будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури, e-mail: fedyshyn_bm@knuba.edu.ua, ORCID 0000-0003-2420-7332

Будівельна техніка є одним з найбільш енергоємних елементів транспортно-технологічних систем, що визначає витрати палива та обсяги викидів шкідливих речовин у будівельному секторі. Домінування дизельних енергетичних установок забезпечує автономність і високу питому потужність машин, однак супроводжується суттєвими викидами CO₂, оксидів азоту та твердих часток. У контексті глобальних кліматичних цілей і трансформації енергетики [1] питання декарбонізації будівельної техніки набуває системного характеру і потребує комплексного інженерного підходу.

Світові тенденції розвитку відновлюваної енергетики і зниження вартості генерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) створюють передумови для інтеграції локальних джерел енергії в структуру будівельного майданчика [2]. Дослідження [3–5] доводять доцільність використання альтернативних моторних палив та гібридизації приводів будівельної техніки як інструменту підвищення енергонезалежності. Окремі аспекти накопичення енергії в приводах машин і можливості рекуперації енергії досліджено у роботі [6], тоді як перехід від дизельних до електрифікованих схем приводу розглянуто у [7]. Разом з тим, наявні дослідження переважно зосереджені на окремих технічних або економічних аспектах модернізації машин. Відсутньою залишається інтегрована модель, яка б поєднувала енергетичний баланс робочого циклу машини, потенціал рекуперації, параметри накопичувача та вплив локальних джерел генерації на техніко-економічні показники експлуатації.

Метою роботи є розроблення інтегрованої аналітичної моделі гібридної енергосистеми будівельної техніки і оцінювання її ефективності за критеріями паливної економічності, зниження емісії та інвестиційної доцільності.

Запропонована система передбачає поєднання двигуна внутрішнього згоряння, електричного генератора, тягового електродвигуна, акумуляторного накопичувача та локального джерела генерації з ВДЕ в межах будівельної інфраструктури. Така архітектура забезпечує адаптивний перерозподіл енергетичних потоків залежно від режиму навантаження, стану накопичувача та доступності відновлюваної генерації. У результаті цього формується гнучка енергетична структура, здатна мінімізувати пікові навантаження на двигун, зменшувати витрати палива та забезпечувати поступовий перехід до низьковоглецевої моделі експлуатації будівельної техніки.

Узагальнений енергетичний баланс системи опишемо рівнянням

$$P_{\text{ДВЗ}}(t) + P_{\text{ВДЕ}}(t) + P_{\text{нак}}(t) = P_{\text{нав}}(t) + P_{\text{втр}}(t), \quad (1)$$

де $P_{\text{ДВЗ}}$ – потужність двигуна внутрішнього згоряння; $P_{\text{ВДЕ}}$ – потужність локальної генерації; $P_{\text{нак}}$ – потужність накопичувача; $P_{\text{нав}}$ – потужність навантаження; $P_{\text{втр}}$ – втрати у системі.

Формалізація балансу дозволяє реалізувати задачу оптимізації розподілу потужності між джерелами енергії з урахуванням реального робочого циклу.

Будівельна техніка працює переважно за циклічних режимів з суттєвими коливаннями навантаження. Частина енергії, що витрачається на розгін робочого органу або підйом вантажу, розсіюється під час гальмування. Інтеграція накопичувача забезпечує рекуперацію цієї енергії та зменшення пікових навантажень. Середню енергетичну потребу за цикл визначаємо як

$$E_{\text{ц}}(t) = \int_0^T P_{\text{нав}}(t) dt. \quad (2)$$

Аналіз експлуатаційних режимів навантажувачів і екскаваторів свідчить, що коефіцієнт потенційної рекуперації може досягати близько 15–25 % [6], що створює умови для стабілізації роботи двигуна внутрішнього згоряння у зоні мінімальної питомої витрати палива.

Енергонезалежність будівельного майданчика може бути підвищена шляхом формування локальних джерел енергії, що поєднують мобільні фотоелектричні установки, накопичувачі та резервні генератори [4]. Частку покриття потреби в енергії за рахунок ВДЕ визначаємо зі співвідношення

$$k_{\text{ВДЕ}} = E_{\text{ВДЕ}}/E_{\text{заг}}, \quad (3)$$

де $E_{\text{ВДЕ}}$ – енергія, що вироблена з відновлюваних джерел, $E_{\text{заг}}$ – загальне енергоспоживання.

Моделювання показує, що при $k_{\text{ВДЕ}} \approx 0,3$ можливе зниження сумарних викидів CO_2 до 40 % порівняно з базовою дизельною схемою за умов інтенсивної експлуатації техніки, що узгоджується зі сценаріями декарбонізації [1].

Комплексне оцінювання гібридної енергетичної системи здійснюється за трьома групами критеріїв: паливною економічністю, екологічним ефектом та інвестиційною доцільністю. Встановлено, що впровадження гібридної системи дозволяє зменшити пікову потужність двигуна до 25 %, знизити питомі витрати палива на 20–30 %, скоротити викиди CO₂ на 35–45 % та забезпечити строк окупності інвестицій у межах 3–5 років. Отримані результати узгоджуються з сучасними тенденціями електрифікації важкої техніки [8, 9].

Висновки

Запропонована інтегрована модель гібридної енергосистеми забезпечує кількісне обґрунтування параметрів накопичення та локальної генерації з ВДЕ, з урахуванням реальних робочих циклів будівельної техніки. Поєднання гібридизації приводів з мікромережевою організацією енергопостачання забезпечує зниження пікових навантажень на двигун, скорочення витрат палива і зменшення викидів при збереженні експлуатаційної автономності машин.

Література

1. World Energy Outlook 2025 : [Електронний ресурс] / **International Energy Agency**. Paris, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025> (дата звернення: 04.03.2026).
2. Renewable Power Generation Costs in 2022 : [Електронний ресурс] / **International Renewable Energy Agency**. Abu Dhabi, 2023. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022> (дата звернення: 04.03.2026).
3. **Слободчиков В. В., Балака М. М.** Моторні палива з альтернативних енергетичних ресурсів. *Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості і транспорту 2015* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. (Дніпропетровськ, 21–22 трав. 2015 р.). Дніпропетровськ : НГУ, 2015. С. 250–254.
4. **Тетерятник О., Балака М.** Аналіз шляхів забезпечення енергонезалежності будівельної техніки з використанням відновлювальних джерел енергії. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2021. Вип. 97. С. 24–35. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.97.0301>.
5. **Балака М., Тетерятник О., Санкін І.** Комплексна оцінка застосування моторних палив. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування* : матеріали 14-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Херсон, 16–18 берез. 2023 р.). Херсон : ХДМА, 2023. С. 194–196.
6. **Міщук Д. О., Міщук Є. О., Балака М. М.** Оцінка можливостей накопичення енергії приводом автотранспорту. *Вісник ХНАДУ*. 2021. Вип. 95. С. 171–177. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.171>.
7. **Федишин Б. М., Балака М. М., Лисак С. І.** Від дизельних до електричних приводів будівельних машин: енергоефективність та екологічність. *Сучасне автомобілебудування, транспорт і дорожня інфраструктура '2025 (MAITRI 2025)*: тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 30–31 жовт. 2025 р.). Харків : ХНАДУ, 2025. С. 250–254.
8. From Diesel to Electric: Transforming Heavy Machinery : [Electronic resource]. URL: <https://turntide.com/community/transforming-heavy-machinery-from-diesel-to-electric-with-turntide-technology/> (accessed: 04.03.2026).
9. Drive systems for hybrid and fully electric construction machinery : [Electronic resource]. URL: <https://www.baumueller.com/us/industries/e-mobility/construction-vehicles> (accessed: 04.03.2026).

**Секція 7.
ПРОЦЕСОРИ І МІКРОЕЛЕКТРОНІКА
В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ. ПРОГРАМУВАННЯ
МІКРОКОНТРОЛЕРІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК
І ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.
ЕЛЕКТРОННЕ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ
І ІНШИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

УДК 621.313

**ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЯГОВИХ
ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ**

Нечаус Андрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент каф. АЕ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: nechaus@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8833-0802

Алієв Баба Мехман огли, студент, Харківський національний
автомобільно-дорожній університет, e-mail: alievbaba@gmail.com

На світовому рівні продовжуються заходи щодо вдосконалення та розвитку електричних транспортних засобів, особливо це стосується електричних силових агрегатів, характеристики яких повинні перевищити характеристики традиційних автомобілів з двигунами внутрішнього згорання. У [1] наведено узагальнені вимоги Міністерства енергетики США (DOE) та Центра перспективних двигунів Великої Британії (APC) щодо розвитку силових агрегатів електромобілів станом на 2020 та 2025 роки стосовно обраного базового електричного агрегату з потужністю двигуна та перетворювального пристрою по 100 кВт. У вимогах, визначено вартість для силової установки в цілому 8 \$/кВт на 2020 рік та 6 \$/кВт на 2025 рік, її питому потужність 4 кВт/л на 2020 рік та 33 кВт/л на 2020 рік. Аналогічні вимоги сформовано для основних складових частин агрегату – двигуна та перетворювального пристрою. Тобто вимоги що до вартості та питомої потужності силових електричних агрегатів постійно зростають, що вимагає подальших досліджень та вдосконалень. Основними напрямками при цьому визначено: розробка нових конструкцій та вдосконалення тягових електричних двигунів та методів їх керування; розробка та вдосконалення силових перетворювачів; розробка заходів терморегулювання силової установки; розробка новітніх провідникових та магнітних матеріалів; а також розробка новітніх технологій виробництва окремих елементів та електричних машин в цілому.

Найбільш привабливі характеристики, на теперішній час, мають синхронні електричні машини зі збудженням від постійних магнітів, тому сучасна наукова періодика [1, 2] розглядає їх як основний тип електричних машин, які можливо та слід розвивати. Незважаючи на ряд переваг, порівняно з

іншими типами електричних машин, які на тепер використовуються у силових установках електромобілів – асинхронні та реактивні, синхронні двигуни все ж мають певні недоліки, які потребують усунення. При цьому, розглядаються альтернативні принципи побудови електричних машин – машини з аксіальним потоком. Виходячи з аналізу ряду публікацій, присвячених порівнянню традиційних машин з радіальним потоком та машини з аксіальним потоком, наприклад [3, 4], можна зробити висновок, що аксіальні машини, маючи переваги, які визначаються їх будовою, крім того, дозволяють підвищити питому потужність силової установки. Приблизно такого ж ефекту можливо досягти, при виконанні синхронної машини із зовнішнім ротором.

Тому у [5] проводиться порівняння синхронних машин з зовнішнім ротором та аксіальної при ідентичних параметрах потужності та конструктивного виконання. На рис. 1 наведено ескізи будови таких машин. Порівняння полягало у визначенні співвідношень між конструктивними особливостями для досягнення мінімального об'єму машини, компромісного дизайну та мінімальних втрат. При вирішенні цієї задачі з використанням сучасних методів оптимізації було розглянуто 600 варіантів побудови машин обох типів.

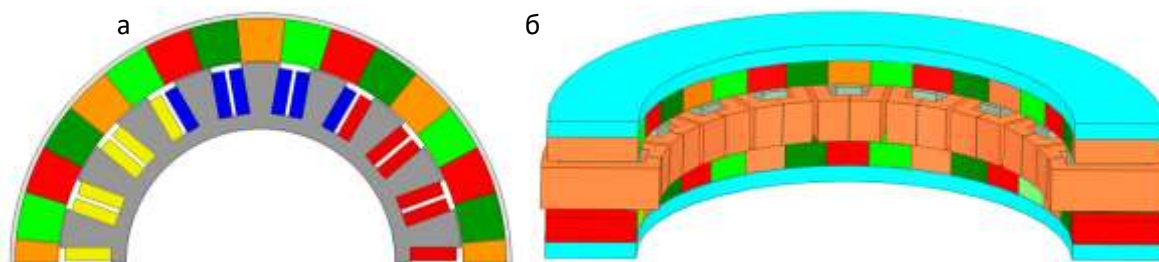


Рис. 1. Будова синхронної машини з зовнішнім ротором (а) та аксіальної (б)[5]

Крім типу електричної машини у енергетичній установці електромобіля важливу роль відіграє метод її керування. Беручи до уваги досить значну кількість розроблених методів керування, спрямованих на використання саме у автомобільних застосуваннях, задача розробки сучасного силового агрегату є комплексною та багатоваріантною.

Висновки

Наведено результати аналізу сучасної наукової періодики, які дозволяють визначити напрямки подальшого вдосконалення тягових електричних двигунів електромобілів. Запропоновано будову силової установки електромобіля на базі чотирьох аксіальних синхронних двигунів, для якої передбачається подальше дослідження з метою доведення до експериментального зразка.

Література

1. Usman A., Saxena A. Technical Roadmaps of Electric Motor Technology for Next Generation Electric Vehicles. *Machines*. 2025. Vol. 13. 156. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13020156>.

2. **Rajendran G. et al.** Bridging Innovation and Sustainability: The Strategic Role of High-Efficiency Motors in Advancing Industry 5.0. *Energies*. 2026. Vol. 19. 1003. DOI: <https://doi.org/10.3390/en19041003>.

3. **Samanta P. et al.** A comparative review of radial and axial Flux PMSMs: Innovations in topology, design, and control. *Franklin Open*. 2025. Vol. 12. 100341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fraope.2025.100341>.

4. **Patterson D. et al.** A comparison of radial and axial flux structures in electrical machines. *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC '09)* : [conference paper]. 2009. P. 1029–1035. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2009.5075331>.

5. **Bhuvaneshwari V., Carounagarane C.** Characteristic Stability Analysis of Axial Flux Motors in Comparison with Radial Flux Motors Subjected to EV Application. *2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT)*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESGRE58662.2023.10404745>.

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВИХ ІНВЕРТОРІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Нечаус Андрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент каф. АЕ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: nechaus@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8833-0802

Божко Артем Вадимович, студент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: artem.bozhko39@gmail.com

Питома потужність напівпровідникових перетворювачів силових установок електромобілів визначає як масо-габаритні показники самої силової установки, так і технічні характеристики електромобіля в цілому [1]. Як показує аналіз наукової періодики, переважна увага у покращенні питомих характеристики перетворювачів приділяється конденсатору ланки постійного струму високовольтної тягової батареї, який призначений для зменшення пульсацій напруги, і займає близько 30 % загального об'єму перетворювача. Зменшення об'єму конденсатора пропонується вирішувати двома шляхами. Перший напрямок передбачає використання багатофазних схем інверторів [2 – 4], другий – використання, так званих, сегментованих інверторів [5, 6].

Багатофазний інвертор дозволяє розподілити перетворювану потужність між декількома фазами живлення тягового двигуна, при цьому зменшується величина струму у кожній фазі порівняно з традиційними трифазними системами, що при різних схемах дозволяє зменшити об'єм конденсатора на 10 % або 25 %. Сегментований інвертор, являє собою інвертор у якому кожна фаза розщеплена на дві паралельні гілки, що також зменшує струми у кожному окремому колі, і дозволяє зменшити об'єм конденсатора на 50 %, а, при застосуванні спеціальних методів керування [6], ще додатково на 38 %.

Більш привабливими з точки зору технічної реалізації та розробленості можна виділити класичну мостову схему шестифазного інвертора та інвертора з дев'ятьма ключами. Остання використовує меншу кількість силових транзисторів, що обумовлює її економічні переваги. Однак, при цьому виникають додаткові проблеми, пов'язані з гармонійним складом напруг та струмів. Крім того, при використанні цих схем, можливе застосування різних методів керування, які у більш загальному вигляді поділяють на широтно-імпульсну модуляцію на основі несучої та просторово-векторну широтно-імпульсну модуляцію.

Сегментований інвертор, порівняно з класичною схемою, містить подвійний набір силових ключів, які можуть керуватися синфазно або окремо для формування оптимальних фазних напруг інвертора у векторному просторі, що забезпечує додаткове зменшення пульсацій.

Таким чином, вибір схемної реалізації тягового інвертора, а також методу його керування, вимагає проведення додаткових досліджень, на підставі яких можливо обґрунтувати застосування конкретних рішень для визначених застосувань. Крім визначення пульсацій напруги шини постійного струму високовольтної тягової батареї та її гармонійного складу, що визначає вимоги до конденсатора, розглядаються питання максимально допустимої потужності навантаження для різних схем інверторів.

Складність методів керування визначає обчислювальне навантаження системи керування та її апаратну і програмну побудову. Зменшення струмів окремих гілок перетворювача покращує умови роботи силових вентилів, підвищуючи надійність їх роботи, зменшуючи втрати та вимоги до систем охолодження. При цьому, важливим є питання електромагнітної сумісності електронних компонентів, яка також підвищується порівняно з традиційними схемами. Також, зменшення струмів дозволяє зменшити перерізи проводів, що має технічний та економічний вплив на вихідні характеристики інвертора, за рахунок зменшення витрат провідникових матеріалів.

Висновки

Наведено результати комп'ютерного моделювання шестифазного інвертора, інвертора з дев'ятьма ключами та сегментованого інвертора. Для керування багатофазними інверторами застосовано широтно-імпульсна модуляція на основі несучої та просторово-векторна широтно-імпульсна модуляція. Для керування сегментованим інвертором застосовано традиційне керування та просторово-векторна модуляція сегментів. Отримані результати дозволяють оцінити варіанти побудови силової схеми інвертора та методу керування для конкретних застосувань.

Література

1. **Бороденко Ю. М., Гнатов А. В., Аргун Ш. В.** Мехатронні системи автомобіля : підручник. Харків : ХНАДУ, 2023. Ч. 1 : Силовий привід. 300 с.
2. **Taha W. et al.** Multiphase Traction Inverters: State-of-the-Art Review and Future Trends. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 4580–4599. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3141542>.

3. **Medina-Sánchez M. et al.** Carrier Phase-Shift PWM With Minimum Stator Current-Ripple RMS for Symmetrical Six-Phase Induction Motor Drives With Nearly Sinusoidal Winding Distribution. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2025.3565805>.
4. **Butt O. et al.** Simulative Study to Reduce DC-Link Capacitor of Drive Train for Electric Vehicles. *Energies*. 2022. Vol. 15. 4499. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124499>.
5. **Su G.-J. et al.** A High-Power Density Segmented Traction Drive Inverter. *2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2023. P. 1825–1830. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECCE53617.2023.10361985>.
6. **Xue L., Su G.-J., Ozpıneci B.** DC-Ripple-Energy Adaptive-Minimization (DREAM) Modulation Scheme for a High Power Density Inverter. *2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2021. P. 186–191. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEC42165.2021.9487324>.

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРОВАНОГО БОРТОВОГО ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Нечаус Андрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент каф. АЕ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: nechaus@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8833-0802

Журавльов Євген Ігорович, студент, Харківський національний
автомобільно-дорожній університет, e-mail: evgeniy.zhuravlev2312@gmail.com

Використання бортових зарядних пристроїв у електромобілях значно знижує їх залежність від наявності спеціальної інфраструктури зарядних станцій. У випадку можливості заряду від однофазної побутової електричної мережі, бортовий зарядний пристрій повинен мати напівпровідниковий коректор потужності та ізольований перетворювач постійного струму, який, своєю чергою, складається з двох однофазних мостових інверторів та трансформатора [1–3]. У даній схемі загальна кількість напівпровідникових ключів дорівнює дванадцяти, що відповідає такій же кількості ключів двох трифазних інверторів. Тобто, якщо мова йде про інтегрований бортовий зарядний пристрій, коли використовуються окремі елементи тягової силової електроніки у складі зарядного пристрою, його можна побудувати шляхом перепідключення елементів силових інверторів двомоторного електромобіля. Подібні рішення, не є новими і розглядаються у проаналізованій літературі [2 – 5].

До розгляду прийнято традиційну трифазну мостову схему тягового інвертора, яка складена з шести ключів. Хоча сучасні дослідження орієнтовані на багатофазні системи, у рамках визначеної задачі, проектування системи керування інтегрованого зарядного пристрою значно спрощується. Відповідно, пропонується дві фази першого інвертора, тобто чотири ключі, використовува-

ти як інвертор первинної обмотки трансформатора перетворювача постійного струму, а дві фази другого інвертора – як випрямляч вторинної обмотки. Решта – чотири ключі, тобто по одній фазі кожного тягового інвертора, можуть бути використані як мостовий коректор потужності. Оскільки напівпровідникові ключі повністю керовані, то подібний перетворювач є двонаправленим, тобто можлива передача енергії як для заряду тягової акумуляторної батареї, так і назад у мережу для реалізації технологій V2X. Обмеженням при цьому виступає відносно низька потужність, яка може бути спожита і, відповідно повернена у однофазну побутову мережу.

Для трансформації схем інверторів на схему бортового зарядного пристрою потрібно передбачити систему комутаторів та додаткових струмовідних шин, за допомогою яких здійснюється перекомутація силових схем. Наявність таких додаткових елементів вважається недоліком інтегрованих перетворювачів, однак їх наявність обов'язкова. До комутаторів не висуваються спеціальні вимоги, в тому числі відносно їх швидкодії, оскільки їх спрацювання передбачається тільки при переводі електромобіля на заряд і назад.

Додатковими елементами також можна вважати високочастотний трансформатор перетворювача постійного струму та реактивні елементи, які забезпечують згладжування пульсацій напруги шини постійного струму, та прийнятну якість змінної напруги на вході перетворювача. Однак, ці елементи є у складі більшості бортових перетворювачів, а інтегрований перетворювач виявляється більш прийнятним з точки зору кількості керованих ключів.

Окремим питанням є розробка системи керування інтегрованого перетворювача. З одного боку, від нього не вимагається швидкодія та точність системи керування тяговими двигунами, а з іншого – з'являється потреба у контролі стану та режиму заряду тягової акумуляторної батареї. Крім того, трансформатор перетворювача постійного струму є високочастотним, що також потрібно враховувати при організації керування перетворювача та коректора потужності.

Висновки

Наведено результати комп'ютерного моделювання інтегрованого бортового зарядного пристрою, який утворюється шляхом перекомутації силових тягових інверторів двомоторного електромобіля. Отримані результати дозволяють оцінити ефективність роботи перетворювача у режимах розряду (руху електромобіля) та заряду тягової акумуляторної батареї, а також якість напруги на вході та виході перетворювача. Крім того, результати моделювання дозволяють сформулювати вимоги до додаткових елементів перетворювача, таких як реактивні елементи фільтрів, трансформатора, струмовідних шин, комутаторів та системи керування його складовими.

Література

1. Бороденко Ю. М., Гнатів А. В., Аргун І. В. Мехатронні системи автомобіля : підручник. Харків : ХНАДУ, 2023. Ч. 1 : Силовий привід. 300 с.

2. **Metwly M. et al.** A Review of Integrated On-Board EV Battery Chargers: Advanced Topologies, Recent Developments and Optimal Selection of FSCW Slot/Pole Combination. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 1–1. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992741>.

3. **Valente M. et al.** Integrated On-Board EV Battery Chargers: New Perspectives and Challenges for Safety Improvement. *2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*. 2021. P. 349–356. DOI: <https://doi.org/10.1109/WEMDCD51469.2021.9425666>.

4. **Kougioulis I. et al.** An Isolated Multiport DC-DC Converter for Integrated Electric Vehicle On-board Charger. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2023.3276048>.

5. **Mukherjee S. et al.** Integrated On-Board Charger for Dual Motor Based Electric Vehicle Power Train. *2025 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*. 2025. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITEC63604.2025.11098117>.

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ КОМПЕНСАЦІЙНИХ СХЕМ ТРИФАЗНИХ БЕЗДРОВОВИХ ЗАРЯДНИХ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Нечаус Андрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент каф. АЕ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: nechaus@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8833-0802

Корощенко Андрій Юрійович, студент, Харківський національний
автомобільно-дорожній університет, e-mail: andreukoroshchenko18@gmail.com

Одним з напрямів пришвидшення заряду електромобілів є застосування бездротових зарядних пристроїв. Швидший заряд передбачає більші зарядні струми, при цьому кабелі дротових зарядних пристроїв повинні мати великий переріз, втрачаючи гнучкість і набуваючи значної ваги та вартості за рахунок збільшення об'єму провідникових матеріалів. Виходом з подібної ситуації є саме бездротовий заряд, який, крім того, забезпечує безпеку та зручність використання. У сучасній науковій періодиці наявна досить велика кількість праць, присвячених бездротовим зарядним пристроям електромобілів та системам бездротової передачі енергії, що свідчить про актуальність даного питання. Серед проаналізованої літератури можна виділити ряд оглядових статей [1 - 6].

На нашу думку, для реалізації потужних бездротових зарядних пристроїв більш доцільним є застосування трифазних індуктивних систем з резонансною компенсацією, які забезпечують збільшення кількості передаваної енергії. Трифазна система може бути побудована за двома традиційними схемами з'єднання трифазних кіл – зірка (Y) та трикутник (D). Приймаючи до уваги, що система бездротового заряду складається з передаючої (1) та приймаючої (2) системи, які мають відповідні обмотки перетворення електричної енергії на

магнітне поле та назад, тільки за ознакою способу з'єднання обмоток можна виділити чотири варіанти побудови системи: Y_1-Y_2 , Y_1-D_2 , D_1-Y_2 , D_1-D_2 .

Компенсаційні схеми резонансних бездротових індуктивних систем можуть складатися з ємнісних елементів – конденсаторів, які налаштовуються у резонанс з індуктивними обмотками системи передачі енергії, або ж мати більш складну будову типу LCC, тобто мати додаткову котушку індуктивності та два конденсатори. При цьому, також з'являються варіанти з'єднання цих елементів, у [1] розрізняють 48 способів побудови системи. Для прикладу, на рис. 1 наведено дві схеми з'єднання, які умовно можна позначити як: $Y-D$ (рис. 1, а) та $Y-YY$ (рис. 1, б). У позначенні: перший символ Y означає спосіб з'єднання фазних обмоток (w_a , w_b , w_c) у зірку; другий символ D або Y – спосіб з'єднання конденсатора резонансного кола у зірку або трикутник; третій символ Y – спосіб з'єднання паралельного конденсатора (C'). Також, на схемі (рис. 1, б) показано додаткову індуктивність резонансного кола (L_{YY}), індекс якої визначається способом з'єднання конденсаторів. Як було сказано раніше, всього можливо побудувати 48 таких схем, і, залежно від схеми, параметри передачі енергії та параметри окремих компонентів зарядного пристрою будуть відрізнятися.

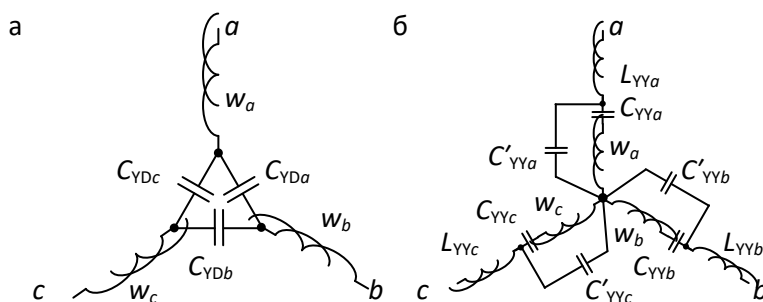


Рисунок 1 – Приклади з'єднання силових обмоток та елементів резонансної компенсаційної схеми у трифазній системі

Висновки

Наведено розрахункові співвідношення для визначення параметрів елементів, а також результати моделювання резонансних компенсаційних схем трифазних систем бездротової передачі енергії для зарядних пристроїв електромобілів. Запропоновані моделі та наведені відомості дозволяють визначити перспективні для подальшого розгляду та дослідження схемні рішення за наявності конкретних вихідних даних.

Література

1. Colak K. et al. Overview of High-Power Wireless Charging Systems and Analysis of Polyphase Wireless Charging System Phase Winding and Resonant Tuning Network Connection Configurations. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3514841>.
2. Wu Y. et al. A Comprehensive Review of Magnetic Coupling Mechanisms, Compensation Networks, and Control Strategies for Electric Vehicle Wireless Power Transfer Systems. *Processes*. 2026. Vol. 14. 287. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr14020287>.

3. **Rana M. M. et al.** Comprehensive Review on the Charging Technologies of Electric Vehicles EV and Their Impact on Power Grid. *IEEE Access*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3538663>.

4. **Ramadoss V. et al.** Research Insights on Recent Power Converter Topologies and Control Strategies for Wireless EV Chargers: A Comprehensive Study. *IEEE Open Journal of Power Electronics*. 2024. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJPEL.2024.3474707>.

5. **Kumar J. et al.** Design and Control Methods for Electric Vehicle Charging in Wireless Power Transfer Topologies. *IEEJ Journal of Industry Applications*. 2025. Vol. 14. DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejia.24010874>.

6. **Leontiev D. et al.** Regarding the efficiency of using solar panels of low power to obtain maximum charging current for batteries vehicle. *AIP Conf. Proc.* 5 June 2025; 3238 (1): 050009. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0248928>

УДК 621.314

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ СУМЩЕНИХ ДРОТОВИХ/БЕЗДРОТОВИХ ЗАРЯДНИХ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Нечаус Андрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент каф. АЕ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail:
nechaus@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8833-0802

Красильников Євгеній Валерійович, студент, Харківський національний
автомобільно-дорожній університет, e-mail: krasilnikov2110@gmail.com

Бездротові зарядні пристрої електромобілів є наступною генерацією заходів підвищення їх привабливості для автовласників. Бездротовий заряд, з точки зору споживача, має ряд переваг, серед яких виділяють відсутність необхідності втручання у організацію процесу заряду та електричну безпеку при цьому. Як технічні переваги, відзначають відсутність потреби у збільшенні перерізу, а також, відповідно, ваги та вартості зарядних кабелів при швидкому заряді, який передбачає передачу значних за величиною струмів [1, 2].

З поширюваної інформації відомі тестові проекти, які проходять у Швеції та Норвегії, щодо впровадження систем бездротового заряду електромобільних таксопарків, у США тестується система бездротового заряду для портового транспортного автопарку. Крім того, деякі виробники електромобілів пропонують бездротовий заряд як опцію, що підвищує привабливість їх електромобілів.

Виходячи з викладеного вище, можна зробити висновок, що найближчими роками буде існувати певна конкуренція між виробниками електромобілів, які будуть прагнути розширити можливості автовласників щодо вибору типу заряду, та виробниками зарядних пристроїв, які будуть прагнути охопити

більшу кількість електромобілів з різними потребами зарядної інфраструктури. При цьому, можна передбачити одночасну наявність пропозицій з обох сторін.

Говорячи про зарядний пристрій електромобіля, слід розуміти, що він являє собою систему, яку можна поділити на зовнішню (інфраструктура) та бортову складову. При цьому, як перша, так і друга, передбачає наявність ряду перетворювачів, які забезпечують, по-перше, узгодження параметрів напруги джерела живлення та тягового акумулятора електромобіля, а по-друге, якість електричної енергії як по входу перетворювача, так і по його виходу. Основними елементами таких перетворювачів є силові напівпровідникові вентиля, за допомогою яких здійснюється перетворення параметрів електричної енергії; трансформатори, які дозволяють змінювати величину напруги та забезпечують гальванічне розділення кіл; та реактивні елементи, які використовуються для забезпечення належної якості електричної енергії.

Ідея використання певних пристроїв перетворювачів різними функціональними елементами системи, під час, коли вони не задіяні, не нова. При цьому, розробки ведуться як у напрямку універсалізації бортових зарядних пристроїв [3, 4], так і зовнішніх [5]. Запропоновані схемні та технічні рішення пропонують по чергове використання окремих силових перетворювачів, а саме керованих силових інверторів та випрямлячів у ланці дротового або бездротового заряду, оскільки вони виконують однакові функції, хоча з різними цілями та параметрами роботи. Також, пристроєм, який має значні у складі перетворювачів вагу, об'єм та вартість, є високочастотний трансформатор, сумісне використання якого ланками дротового або бездротового заряду, також дозволяє зменшити по-перше, кількість складових зарядних пристроїв, і, відповідно, по-друге, підвищити масо-габаритні та вартісні характеристики зарядного пристрою.

Впровадження такого сумісного використання функціональних елементів зарядного пристрою передбачає вирішення ряду технічних задач, серед яких основна увага спрямована на модернізацію конструкції трансформатора, яка передбачає як переробку магнітної системи, так і системи обмоток. Крім того, оскільки вплив роботи ланок дротового та бездротового заряду на якість електричної енергії відрізняється, вимагається розробка технічних рішень щодо зміни параметрів реактивних фільтруючих елементів та резонансних кіл.

Висновки

Наведено аналітичний огляд суміщених дротових/бездротових зовнішніх та бортових зарядних пристроїв електромобілів. Наведено схемні та конструктивні рішення, які дозволяють використовувати ідентичні функціональні елементи зовнішніх та бортових зарядних пристроїв при реалізації дротового або бездротового заряду. Наведено, доступні з наукової періодики, результати теоретичного та експериментального дослідження запропонованих рішень. Наведений матеріал дозволяє сформулювати напрями подальших досліджень щодо вдосконалення зовнішніх та бортових зарядних пристроїв електромобілів.

Література

1. **Mahesh A., Bharatiraja C., Mihet-Popa L.** Review on Inductive Wireless Power Transfer Charging for Electric vehicles – A Review. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 1–1. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3116678>.
2. **Naick J. et al.** Hybrid Integration of Onboard Charger and Wireless Power Transfer for EVs with Shared Coupler, Compensation, and Rectifier in a Grid-Connected Solar PV System for Optimized Fast Charging. *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*. 2025. Vol. 11. P. 228–238. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18133859>.
3. **Vu B. et al.** A Hybrid Charger of Conductive and Inductive Modes for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. Vol. 68. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3042162>.
4. **Basu A., Mukherjee S.** Analysis and Design of a Multiport Converter based Integrated On-board Charger for Electric Vehicle Powertrains. *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2021. P. 1661–1668. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECCE47101.2021.9595435>.
5. **Mukherjee S., Rallabandi V.** Integrated Multiport Conductive and Wireless Architecture for Electric Vehicle Charging. *2025 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*. 2025. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITEC63604.2025.11098068>.

УДК 621.314

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СХЕМНИХ РІШЕНЬ ДВОНАПРАВЛЕНИХ НЕІЗОЛЬОВАНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗАРЯДНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Нечаус Андрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент каф. АЕ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: nechaus@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8833-0802

Кушнарєнко Максим Євгенович, студент, Харківський національний
автомобільно-дорожній університет, e-mail: astral2057@gmail.com

Двонаправлені силові напівпровідникові перетворювачі призначені для використання у складі гібридних систем електропостачання, які ґрунтуються на альтернативних відновлюваних джерелах та електрохімічних накопичувачах електричної енергії. Стосовно електромобілів, двонаправлені перетворювачі дозволяють реалізувати технології V2X, коли накопичена тяговою акумуляторною батареєю електрична енергія може бути передана назад у зовнішню електричну мережу.

Згідно сучасної класифікації двонаправлених перетворювачів, їх поділяють на дві групи: неізолювані (імпульсні) та ізолювані (трансформаторні) [1, 2]. Деякі автори [3, 4] виділяють третю групу двонаправлених перетворювачів – частково ізолювані. До цієї групи належать, так звані, багато-портові перетворювачі, які підключено до декількох різнорідних джерел/накопичувачів енергії, у цьому випадку одна частина схеми будується як ізолю-

вана, а друга – як неізолювана. Ізолювані перетворювачі забезпечують високий коефіцієнт підвищення напруги, і їх зазвичай використовують у тих випадках, коли потрібна гальванічна розв'язка кіл високої та низької напруги. Однак, будова високовольтного високочастотного трансформатора є досить складною, вартісною, а також, призводить до зниження масо-габаритних показників перетворювача. Неізолювані перетворювачі мають простішу конструкцію, вищу питому потужність, меншу кількість напівпровідникових ключів, однак, їх коефіцієнт підвищення напруги відносно низький, важко забезпечити прийнятну комутацію вентилів, тощо. Дана робота присвячена огляду саме неізолюваних перетворювачів, оскільки, незважаючи на наявні недоліки, згідно проаналізованої літератури, вони мають перспективи подальшого вдосконалення.

Розрізняють наступні схеми неізолюваних перетворювачів:

- імпульсні (Buck та Boost);
- типу Чука (Cuk);
- типу SEPIC та Zeta;
- з чергуванням фаз (Interleaved);
- трирівневі (Three-Level);
- каскадні (Cascaded);
- з перемиканням конденсаторів (Switched-Capacitor).

У сучасній вітчизняній літературі, нажаль, немає формулювань відповідних назв перетворювачів, тому запропонований переклад є альтернативним. Тим не менш, кожна схема має свої переваги та недоліки, порівняно з іншими. Так, наприклад, імпульсні перетворювачі, маючи просту будову, створюють на виході переривчастий струм; перетворювачі типу Чука, SEPIC/Zeta та з чергуванням фаз забезпечують зменшення пульсацій струму по входу та виходу, при цьому останні рекомендовано до використання у високопотужних застосуваннях; трирівневі перетворювачі мають компактну будову без котушок індуктивності, забезпечуючи самобалансування напруги; каскадні – забезпечують високий коефіцієнт підвищення напруги, що, відповідно, зменшує струмове навантаження вентилів; перетворювачі з перемиканням конденсаторів мають компактну та легку конструкцію, однак потребують точного керування зарядом конденсаторів.

Окремими питаннями, які розглядають при виборі схеми перетворювача є: забезпечення умов роботи силових напівпровідникових ключів, якість напруги на вході та виході перетворювача, потреба у додаткових реактивних елементах, метод керування та складність системи, яка його реалізує. Таким чином, однозначного рішення не існує, сучасні публікації підтверджують перспективність можливого розвитку та вдосконалення подібного роду перетворювачів.

Висновки

Представлено аналітичний огляд схемних рішень неізолюваних дво-направлених перетворювачів постійного струму для використання у складі

зарядних пристроїв електромобілів для реалізації технології V2X. Наведені відомості дозволяють здійснити вибір схеми перетворювача залежно від бажаних вихідних даних: величини напруги тягової акумуляторної батареї, робочого струму перетворювача у різних режимах роботи, коефіцієнту корисної дії, питомої потужності перетворювача, коефіцієнту підвищення напруги, частоти комутації та кількості напівпровідникових ключів. Обрана схема перетворювача потребує подальших досліджень з метою визначення оптимальних параметрів компонентів схеми, вибору методу керування, оцінки якості напруги на вході та виході, а також умов роботи окремих елементів.

Література

1. **Tong Y. et al.** Bidirectional DC-DC Converter Topologies for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 9. 2312. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092312>.
2. **Sharma P., Palwalia D., Sharma A.** A REVIEW: BI-DIRECTIONAL DC-DC CONVERTER TOPOLOGIES. *International Journal of Technical Research & Science*. 2024. Vol. 9. P. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.30780/specialissue-ISET-2024/029>.
3. **Farajdadian S., Hajizadeh A., Soltani M.** Recent developments of multiport DC/DC converter topologies, control strategies, and applications: A comparative review and analysis. *Energy Reports*. 2024. Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.12.054>.
4. **Leontiev D. et al.** Regarding the efficiency of using solar panels of low power to obtain maximum charging current for batteries vehicle. *AIP Conf. Proc.* 5 June 2025; 3238 (1): 050009. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0248928>

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ ІЗОЛЬОВАНИХ ДВОНАПРАВЛЕНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ГІБРИДНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Нечаус Андрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент каф. АЕ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: nchaus@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8833-0802

Сербінов Іван Андрійович, студент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: 3awdizel@gmail.com

Для реалізації технології V2X, тобто використання тягової акумуляторної батареї електромобіля як накопичувача електричної енергії, яка може бути використана для живлення зовнішніх споживачів, силова електроніка електромобіля повинна бути побудована з можливістю передачі електричної енергії у двох напрямках – споживання з мережі та передачі у мережу. При цьому перетворювачі бортових зарядних пристроїв називають двонаправленими.

Двонаправлені перетворювачі знаходять використання не тільки у бортових гібридних електричних системах електромобілів [1], а й у сучасних системах електропостачання, заснованих на відновлюваних джерелах та електрохімічних накопичувачах електричної енергії [2]. Зважаючи на те, що одним з напрямів підвищення енергоємності та зменшення зарядного струму тягової акумуляторної батареї є збільшення величини напруги, більш прийнятними для застосування у електромобілях слід вважати, так звані, ізольовані схеми двонаправлених перетворювачів. Використання високочастотного трансформатора у схемі забезпечує гальванічну розв'язку, що відповідає вимогам електробезпеки, а також значно розширює діапазон відмінності номіналів напруги первинного та вторинного кіл перетворювача.

Згідно класифікацій ізольованих двонаправлених перетворювачів, наведених у літературі [1, 2], розрізняють чотири класичні схеми: зворотногоходовий перетворювач (flyback), двотактний перетворювач (push-pull), інвертуючий імпульсний перетворювач (Cuk), прямоходовий перетворювач (forward); та чотири новітні схеми: двоактивний перетворювач (DAB), двоактивний півмостовий перетворювач (DHB), півмостовий-повномостовий перетворювач (HFB), багатопортовий двоактивний мостовий перетворювач (MDAB).

Порівняти перетворювачі для визначеного застосування можливо за декількома критеріями, серед яких можна виділити: кількість силових ключових елементів, конструкція високочастотного трансформатора, потреба у додаткових реактивних елементах – котушках індуктивності та конденсаторах, тощо. Крім особливостей побудови, різні схеми мають ряд особливостей робочих характеристик, які визначають переважні області їх застосування.

Наприклад, зворотногоходовий перетворювач має просту будову, але при цьому вхідний струм має значні пульсації, його рекомендовано застосовувати при невеликих потужностях; двотактний перетворювач має високу ефективність при симетричному керуванні, однак це підвищує вимоги до системи керування, його рекомендовано застосовувати при середніх потужностях; інвертуючий імпульсний перетворювач має низький рівень пульсацій по входу та по виходу, при цьому кількість складових прийнятна; прямоходовий перетворювач забезпечує високий ККД, при цьому має обмеження щодо робочого циклу силових ключів; двоактивний перетворювач має високу ефективність у широкому діапазоні напруг, його рекомендовано застосовувати при великих потужностях.

Також, на ефективність роботи двонаправленого перетворювача впливає метод керування. Розглянуто особливості та рекомендації щодо застосування наступних методів: керування фазовим зсувом (PSC), розширене керування фазовим зсувом (EPSC), потрійне керування фазовим зсувом (TPSC), керування реактивною потужністю, модельно-прогнозне керування (MPC); керування режимом пікового струму (PCMC); керування режимом ковзання (SMC); комутація при нульовій напрузі/струмі (ZVS/ZCS); просторово-векторна модуляція (SVM); частотна модуляція.

PSC забезпечує м'яке перемикання ключів, зменшуючи втрати на перемикання та підвищуючи загальну ефективність, мінімізує електромагнітні перешкоди. ZVS/ZCS мінімізують втрати на комутацію, значно підвищують ефективність та зменшують теплове навантаження на силові ключі, що дозволяє підвищити питому потужність перетворювача.

Таким чином, задача вибору схеми двонаправленого перетворювача для силової електроніки електромобіля перетинається з задачею вибору методу керування, що обумовлює невизначеність у остаточному технічному рішенні і служить підґрунтям подальших досліджень.

Висновки

Двонаправлені силові напівпровідникові перетворювачі є ключовим елементом бортових зарядних систем електромобілів, які дозволяють реалізувати технології V2X. Зважаючи на певні переваги ізольованих схем двонаправлених перетворювачів стосовно електромобілів, основна увага дослідження спрямована саме на них. Визначено переваги та недоліки окремих схем перетворювачів з точки зору параметрів передаваної електричної енергії, складності схем та їх впливу на масо-габаритні показники бортового зарядного пристрою. Наведені відомості дозволяють визначити шляхи подальшого вдосконалення та покращення характеристик ізольованих двонаправлених перетворювачів.

Література

1. **Tong Y. et al.** Bidirectional DC-DC Converter Topologies for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 9. 2312. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092312>.
2. **Sharma P., Palwalia D., Sharma A.** A REVIEW: BI-DIRECTIONAL DC-DC CONVERTER TOPOLOGIES. *International Journal of Technical Research & Science*. 2024. Vol. 9. P. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.30780/specialissue-ISET-2024/029>.
3. **Leontiev D. et al.** Regarding the efficiency of using solar panels of low power to obtain maximum charging current for batteries vehicle. *AIP Conf. Proc.* 5 June 2025; 3238 (1): 050009. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0248928>

УДК 004.9:004.65:004.71:654.9

ФОРМУВАННЯ БАЗИ ДАНИХ LOGGED VEHICLE DATA ДЛЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В АВТОМОБІЛЬНОМУ СЕРВІСІ

Грицук Валерій Юрійович, аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: valeri.gritsuk@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3780-7815>

Грицук Юрій Валерійович, к.т.н., доцент, Національний університет «Острозька академія», e-mail: yuri.gritsuk@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3389-1172>

База даних LVD зберігає зведену інформацію про особливості використання транспортних засобів. Дані завантажуються кожного разу, коли автомобіль заїжджає на авторизовану станцію техобслуговування та ремонту. Це буває кілька разів на рік, але з нерегулярними інтервалами, які важко передбачити апіорі. Під час експлуатації автомобіль безперервно збирає та зберігає низку показників, таких як середня швидкість або загальна витрата пального. Загалом, це прості статистичні дані різного роду, оскільки існують дуже жорсткі обмеження на пам'ять і обчислювальну потужність, особливо для старих моделей автомобілів. Більшість параметрів належать до однієї з наступних трьох категорій [1, 2]:

- продуктивність
- експлуатація транспортного засобу
- діагностика або налагоджування.

Для побудови такої бази даних, система повинна надавати попередження про компоненти з підвищеним ризиком виходу з ладу до наступного очікуваного візиту на станцію техобслуговування. Однак, якщо найближче зчитування перед відмовою становить 3-4 місяці, то менш імовірно, що знос мав видимий вплив на дані. Частота зчитування сильно варіюється між транспортними засобами і змінюється з віком транспортного засобу, і може становити лише одне зчитування на рік.

Збирання та обробка даних є найважливішим процесом у системах прогнозування. Дані з датчиків збирають і обробляють за допомогою OBU, а потім передають до VDS за допомогою бездротового модуля для подальшого зберігання у спеціально відведеному місці. Процес діагностування починається, коли транспортний засіб з невідомою несправністю підключається до VDS з метою ідентифікації дефекту. Потім відбувається порівняння фізичних даних, отриманих від датчиків, із відповідними ознаками несправності. Увага приділяється лише тим сеансам, під час яких несправність було успішно діагностовано. Тобто, не розглядається кожна сесія, несправність якої не була успішно визначена. Дані з баз даних LVD та бази технічного обслуговування об'єднані в один набір даних. Дані з LVD доповнюються змінними напрацювання на відмову на основі дат проведення ремонтів у VSR. Дані організовані у

велику матрицю. Ці дані включають інформацію про напрацювання на відмову транспортних засобів, які ще не вийшли з ладу. Показники з напрацюванням нижче заданого граничного значення, що називається горизонтом прогнозування (ГП) (Prediction horizon (PH)), отримують мітку «Несправність», тоді як показники з більшим напрацюванням у минулому отримують мітку «Нормальний стан». Це позначення застосовується для розподілу прикладів на дві групи: ті, що неминуче виходять з ладу, і ті, що справно функціонують. Але база даних LVD містить понад 25% пропущених результатів, що занадто багато для інтерполяції, і це спонукає до використання методу на основі фільтрів замість обгортки та інтегрованих методів. В роботі [3] пропонується два метода для заповнення даних параметрів - метод на основі фільтра і метод на основі обгортки. Метод на основі фільтрів виявляє найбільш вагомні параметри, аналізуючи їх індивідуально. Цей метод розбиває дані одного параметра на дві групи на основі міток. Функції щільності розподілу ймовірностей груп порівнюють за допомогою критерію Колмогорова-Смірнова [4]. Обчислюється вірогідність того, що дві групи належать до одного і того ж розподілу, і виражається за допомогою р-значення. Параметри, для яких обидві групи є чітко унікальними (р-значення близьке до нуля), пов'язані зі зносом перед відмовою і включені до набору даних:

$$P(\lambda) = 1 - \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k e^{-2k^2\lambda^2} \quad (1)$$

$$\lambda = D_n \sqrt{n} \quad (2)$$

$$D_n = \max |F_n(x) - F(x)| \quad (3)$$

де $D_n \sqrt{n} \geq \lambda$ при обмеженні збільшення числа незалежних спостережень n

Метод обгортки базується на способі підбору транспортних засобів таким чином, щоб забезпечити послідовність набору даних і уникнути додавання пропущених значень. У даних, що розглядаються, набори ознак відрізняються для різних транспортних засобів. Чистий перелік характеристик - це сукупність доступних показників для всіх транспортних засобів, що входять до складу набору даних.

При внесенні нової характеристики до набору даних усі транспортні засоби, що не мають такої характеристики, вилучаються з набору. Додавання окремих параметрів призводить до того, що набір даних зменшиться до дуже малої частки зразків. Це робить необхідним брати до уваги факт зменшення розміру набору даних при підборі елементів. Запропонований метод в роботі [5] дозволяє використовувати пучковий пошук для знаходження нових ознак для включення, розширюючи лише ті вузли, розмір набору даних яких не перевищує заданий поріг:

$$n_{dataset} = n_{all} * constraintFactor^{n_{params}} \quad (4)$$

де $n_{dataset}$ — позначає необхідний мінімальний розмір набору даних, n_{all} — кількість доступних зчитувань, $constraintFactor$ — коефіцієнт обмеження перебуває в діапазоні від 0 до 1, а n_{params} — кількість параметрів, які входять до обраного масиву даних. Кожен новий параметр може зменшити набір на невеликий відсоток. Це гарантує меншу граничну межу розміру набору даних.

У керованому машинному навчанні (рис 1) індукційний алгоритм представляється набором навчальних даних, де кожен приклад описується за допомогою вектору властивостей (або атрибутів) і мітки класу [6]. Завдання алгоритму індукції, або індуктора, полягає в тому, щоб отримати такий кластер, який буде корисним для класифікації наступних випадків. Алгоритм індукції запускається на наборі даних, розділеному на внутрішню навчальну та тренувальну вибірку, при цьому з даних видаляються різні набори ознак. Набір даних з найвищою оцінкою обирається як остаточний набір, на якому запускається індукційний алгоритм. Потім створений класифікатор оцінюється на незалежному тестовому наборі, який не використовувався під час навчання [7].

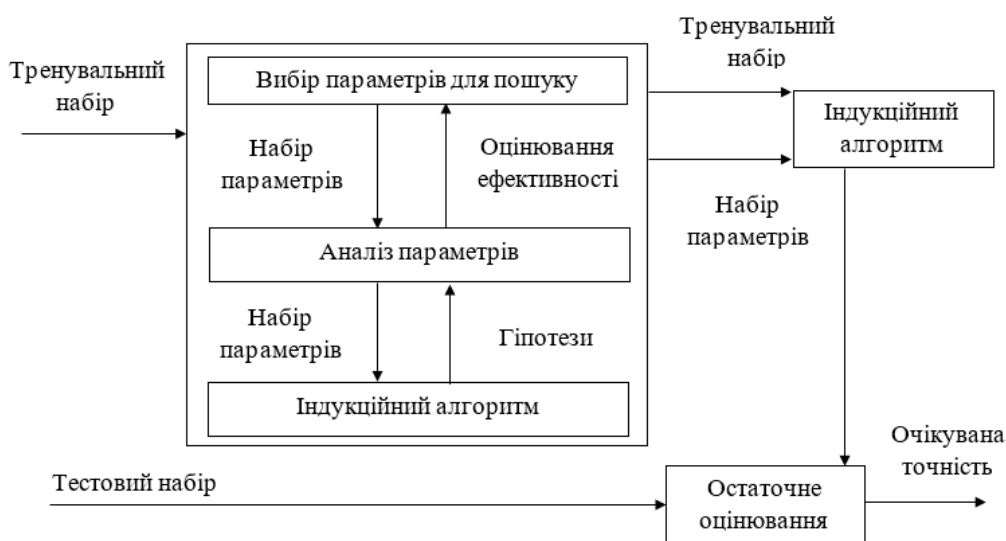


Рис. 1. Обгортковий метод для виділення елементів підмножини параметрів

Однак, чим новіший транспортний засіб, тим більше параметрів LVD доступні, але це також залежить від конфігурації транспортного засобу. Наприклад, детальні параметри коробки передач доступні лише для автомобілів з автоматичною коробкою передач. Це ускладнює отримання послідовних наборів даних для великого потоку транспортних засобів і ускладнює аналіз. Потрібно або вибрати набір даних з невідповідностями і заповнити пропущені значення, або обмежити аналіз лише тими транспортними засобами, які мають необхідні параметри. Такі бази даних містять важливу та цікаву інформацію про несправності транспортних засобів, яка іноді використовується технічним персоналом СТО для діагностики та прогнозування майбутніх несправностей.

Виходячи з цього, маємо два варіанти можливих отриманих даних:

- Неповна вибірка: ці методи спрямовані на збалансування набору даних шляхом усунення зразків класу, що становить більшість.
- Надмірна вибірка: ці методи передбачають відтворення прикладів класу меншини для досягнення більш збалансованого розподілу [8].

Як неповна, так і надмірна вибірка мають певні недоліки. Неповна вибірка може відкинути потенційно корисні дані, а надмірна вибірка може збільшити ймовірність виникнення надмірної пристосованості, оскільки більшість методів надмірної генерації роблять точні копії зразків класу меншості.

Висновки

Таким чином, ефективність систем прогностичного обслуговування безпосередньо залежить від якості попередньої обробки та стратегічного вибору інформативних параметрів. Використання статистичних критеріїв, таких як тест Колмогорова-Смірнова, у поєднанні з оптимізованими методами обгортки дозволяє нівелювати проблему пропущених значень та побудувати релевантні моделі навчання. Запропоновані підходи створюють надійний фундамент для впровадження інтелектуальних систем діагностики, що здатні завчасно ідентифікувати ризики відмов, оптимізуючи графіки технічного обслуговування та підвищуючи надійність транспортних засобів. Розглянутий підхід дозволяє в подальшому рухатися в напрямку інтелектуального сервісу, що базується на аналізі реального експлуатаційного стану транспортних засобів.

Література

1. **Грицук В., Пронін С.** Аналіз та обґрунтування вибору моделі для моніторингу параметрів транспортного засобу та прогнозування технічного обслуговування. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2024. Вип. 49 (1). С. 56–73. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321206>.
2. **Prytz R. et al.** Predicting the need for vehicle compressor repairs using maintenance records and logged vehicle data. *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* 2015. Vol. 41. P. 139–150. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2015.02.009>.
3. **Prytz R.** Machine learning methods for vehicle predictive maintenance using off-board and on-board data : Licentiate thesis. Halmstad : Halmstad University, 2014. 78 p.
4. **Rögnvaldsson T. et al.** Self-monitoring for maintenance of vehicle fleets. *Data Mining and Knowledge Discovery.* 2018. Vol. 32. P. 344–384. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10618-017-0538-6>.
5. **Kimball R., Ross M.** The Kimball Group Reader: Relentlessly Practical Tools for Data Warehousing and Business Intelligence. Hoboken : Wiley, 2010. 744 p.
6. **Kohavi R., John G. H.** Wrappers for feature subset selection. *Artificial Intelligence.* 1997. Vol. 97, no. 1–2. P. 273–324. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0004-3702\(97\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S0004-3702(97)00043-X).
7. **Tan P.-N., Steinbach M., Kumar V.** Introduction to Data Mining. Harlow : Pearson Education Limited, 2014. 839 p.
8. **Batista G. E. A. P. A., Bazzan A. L. C., Monard M. C.** Balancing training data for automated annotation of keywords: a case study. *Proceedings of the Workshop on Bioinformatics (WOB).* 2003. P. 10–18.

УДК 621.314.26:629.331-83

ДВОНАПРЯМЛЕНІ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІ: ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Ярута Віктор Олексійович, канд. техн. наук, доцент каф. АЕ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: victor_yaruta@ukr.net, ORCID ID 0000-0002-4410-2792

Розвиток електротранспорту є надзвичайно важливим для зниження викидів парникових газів та переходу до екологічно чистої енергетики. Нині з цією метою активно створюються електромобілі таких основних типів [1]: гібридні (оснащені двигуном внутрішнього згорання та електродвигуном), акумуляторні (мають лише електродвигун, що живиться від акумулятора через інвертор) та на паливних елементах (найчастіше – водневих). Водночас у сучасних електромобілях для забезпечення високої щільності енергії та потужності в усіх режимах роботи силової установки дедалі частіше застосовуються гібридні системи накопичення енергії [1], що поєднують акумуляторні батареї, суперконденсатори та паливні елементи. Для узгодження різних рівнів напруги та забезпечення ефективного розподілу енергії в таких системах використовуються двонапрямлені DC-DC перетворювачі.

З метою виявлення перспективних напрямків вдосконалення проаналізуємо їх основні схемні рішення.

Традиційно DC-DC перетворювачі поділяються на дві групи: неізолювані та ізолювані. При цьому еволюція та розмаїття існуючих топологій зумовлені необхідністю подолання технічних недосконалостей, що природно впливають з їхніх базових схемних рішень.

Так, неізолювані перетворювачі [2] не забезпечують гальванічної розв'язки, проте відрізняються компактністю, меншою масою та простотою конструкції через відсутність трансформатора. До цієї групи належать: знижувальні (Buck) та підвищувальні (Boost) топології, які створюють розривний вхідний струм; знижувально-підвищувальні (Buck-Boost) і топології Чука (Cuk), що генерують інвертовану напругу, причому останні мають більшу кількість компонентів порівняно з базовими схемами; SEPIC / Zeta, які мають складну конструкцію та меншу ефективність; багатофазні (Interleaved), що вимагають більшої кількості компонентів та складніших алгоритмів керування; трирівневі (Three-Level), які забезпечують ККД на рівні 89–94 %, проте мають складну схему балансування напруг; каскадні (Cascaded) зі збільшеними габаритами та зниженим загальним ККД; й топології на комутованих конденсаторах (Switched-Capacitor), що створюють високе навантаження на ключі, мають обмежену здатність до масштабування та потребують складного керування заряджанням.

Ізолювані перетворювачі [3] забезпечують гальванічну розв'язку та безпеку завдяки використанню високочастотного трансформатора, що також

дає змогу досягти великого діапазону перетворення напруги. До них належать перетворювачі: зворотного ходу (Flyback), які створюють значні сплески напруги та велике навантаження на ключі, тому придатні лише для перетворення малих потужностей; двотактні (Push-Pull), що потребують точного керування ключами для запобігання можливому насиченню осердя трансформатора; прямоходові (Forward), які мають обмежений робочий цикл та потребують встановлення схем розмагнічування; подвійного активного мосту (Dual Active Bridge, DAB), що можуть працювати в режимі перемикання за нульової напруги (Zero Voltage Switching, ZVS) при високих навантаженнях, але мають складну систему керування вісьмома ключами та виходять з режиму ZVS на малих навантаженнях; подвійного напівмоста (Dual Half-Bridge, DHB), які створюють високе навантаження на ключі та потребують габаритних і дорогих вхідних конденсаторів; резонансні (Resonant) з високим ККД, яким, однак, притаманні асиметрія характеристик, складність розроблення магнітних компонентів і резонансного контуру, а також складне частотне керування.

Сучасні тенденції розвитку топологій полягають у переході до інтегрованих багатопортових систем [2, 4], що дозволяють підключати різні джерела постійного струму до єдиного магнітного осердя або до єдиної шини через спільні силові ключі. Крім того, спостерігається тренд на впровадження одноступеневого перетворення [4] та використання напівпровідників із широкою забороненою зоною на базі SiC і GaN [5-7], що в сукупності забезпечує мінімізацію масогабаритних показників.

При цьому виділити єдину універсальну топологію неможливо [1], оскільки її вибір диктується техніко-економічними параметрами конкретного класу транспортного засобу. Так, у сегменті мікроелектромобілів [5] та м'яких гібридів [4] визначальним критерієм є собівартість, тому тут домінують базові неізольовані двонапрямлені топології [6], тоді як інші схемні рішення визнано економічно недоцільними.

У сегменті легкових автомобілів преміумкласу, з огляду на перехід до архітектури 800 В та необхідність гарантування безпеки, найбільш виправданим є застосування ізольованих топологій [4, 5, 8], зокрема резонансних та подвійного активного мосту.

Водночас для вантажних автомобілів та автобусів перспективними є багатофазні та багаторівневі архітектури [5, 9], які дозволяють рівномірно розподіляти значні струмові та теплові навантаження, що виникають унаслідок використання ультрашвидких зарядних платформ з напругою 1500 В та систем рекуперації.

Висновки

Отже, вибір топології двонапрямленого DC-DC перетворювача є компромісом між вартістю, масою, габаритами та безпекою. Для бюджетного сегмента з низьковольтним живленням оптимальними залишаються неізольовані схеми, тоді як розвиток високовольтних платформ (800–1500 В) вимагає переходу до ізольованих резонансних, багатофазних та багаторівневих

архітектур на базі сучасних напівпровідників із широкою забороненою зоною на базі SiC та GaN.

Література

1. **Tong Y. et al.** Bidirectional DC-DC Converter Topologies for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 9. P. 1–29. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/9/2312> (дата звернення: 04.03.2026).
2. **Reddy A. N. et al.** State-of-the-art DC–DC converters for electric mobility and renewable integration: trends, challenges, and future directions. *Discover Applied Sciences*. 2026. Vol. 8, no. 2. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-08120-9>.
3. **Wang Z. et al.** Overview of Isolated Bidirectional DC–DC Converter Topology and Switching Strategies for Electric Vehicle Applications. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 10. P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17102434>.
4. **Kotb R. et al.** Power Electronics Converters for Electric Vehicle Auxiliaries: State of the Art and Future Trends. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 4. P. 1–42. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16041753>.
5. **Naseem H., Seok J.-K.** Recent Advances in Bidirectional Converters and Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles. *Actuators*. 2025. Vol. 14, no. 7. P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.3390/act14070347>.
6. **Мраміє Л. J., Фрейре Г. F.** SiC and GaN Device-Based Power Converters for High-Efficiency Drive Applications. *National Journal of Electric Drives and Control Systems*. 2025. Vol. 1, no. 3. P. 1–9.
7. **Roos G.** APEC 2025 delivers big advances in power devices. *Electronic Products - EDN*. 2025. 21 Mar. URL: <https://www.edn.com/apec-2025-delivers-big-advances-in-power-devices/> (дата звернення: 10.01.2026).
8. **Ni L., Patterson D. J., Hudgins J. L.** High Power Current Sensorless Bidirectional 16-Phase Interleaved DC-DC Converter for Hybrid Vehicle Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2012. Vol. 27, no. 3. P. 1141–1151. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1181&context=electricalengineeringfacpub> (дата звернення: 04.03.2026).

**Секція 8.
ТРАДИЦІЙНІ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ПАЛИВА
ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ**

УДК 629.33:662.7

**ТРАДИЦІЙНІ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ВИДИ ПАЛИВА
ДЛЯ АВТОТРАНСПОРТУ: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ
ТА ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОГНОЗ НА 2026 РІК**

Худяков Ігор Валентинович, канд. техн. наук, доцент кафедри ЕСЕУ,
Херсонська державна морська академія,
e-mail: igor.khudiakov563@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8900-7879

Грицук Ігор Валерійович, проф. техн. наук, професор кафедри ЕСЕУ,
Херсонська державна морська академія,
e-mail: gritsuk_iv@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7065-6820

Погорлецький Дмитро Сергійович, канд. техн. наук, доцент кафедри ЕСЕУ,
Херсонська державна морська академія,
e-mail: dimon150582@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1256-8053,

Черненко Валентина Володимирівна, старший викл. кафедри ЕСЕУ,
Херсонська державна морська академія,
e-mail: v.chernenko18@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2013-7058

Анотація. У статті розглянуто сучасну структуру споживання енергоносіїв в автомобільному секторі на початок 2026 року. Проведено порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик традиційних нафтопродуктів та альтернативних рішень: електричної тяги, водневих паливних елементів та синтетичних палив (e-fuels). Особливу увагу приділено динаміці розвитку зарядної інфраструктури та екологічним стандартам Євро-7.

Ключові слова: автомобільне паливо, електромобілі, водневий транспорт, синтетичне паливо, декарбонізація транспорту, гібридні силові установки.

Вступ. До 2026 року світовий автомобільний сектор зіткнувся з необхідністю радикальної трансформації паливної корзини. Впровадження суворіших норм викидів та глобальні зобов'язання щодо досягнення вуглецевої нейтральності призвели до того, що альтернативні види палива перестали бути нішевими продуктами. Відповідно до Національного плану з енергетики та клімату України [2], стратегічним завданням є поступове заміщення викопного палива відновлюваними джерелами енергії.

1. Традиційні моторні палива: адаптація до нових норм. Незважаючи на зростання популярності альтернатив, бензин та дизельне паливо у 2026 році залишаються основними енергоносіями для комерційного сектору. Проте

впровадження стандарту Євро-7 вимагає від виробників суттєвої модернізації паливних систем [8].

Гібридизація: Традиційне паливо все частіше використовується у складі гібридних силових установок, що дозволяє знизити питомі викиди та підвищити ККД ДВЗ [6].

Газомоторне паливо: Використання метану (КПГ, СПГ) залишається ефективним перехідним рішенням для важкої техніки, що підтверджується актуальними навчальними дослідженнями в галузі альтернативних палив [4].

2. Альтернативні джерела енергії у 2026 році

Електрична тяга: За даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2025–2026 рр. відбувся прорив у щільності зберігання енергії, що зробило електромобілі (BEV) основним трендом ринку [1].

Водневі паливні елементи (FCEV): Стан впровадження водневого транспорту в країнах ЄС демонструє високу ефективність для вантажних перевезень [3], а стратегічні прогнози IRENA вказують на подальше зниження вартості водню до 2030 року [7].

Синтетичні палива (e-fuels): Розвиток інфраструктури альтернативних палив у Європі дозволяє інтегрувати вуглецево-нейтральні синтетичні аналоги в існуючі паливні мережі [5].

3. Порівняльний аналіз та прогноз

Аналіз експлуатаційних даних 2025 року показує, що економічна ефективність електромобілів при використанні швидких зарядних станцій стала конкурентною з дизельними аналогами [1]. Очікується, що до 2030 року мультитопливна модель стане стандартом для більшості логістичних компаній [7].

Висновок

У 2026 році автомобільна галузь остаточно перейшла до етапу технологічного різноманіття. Майбутнє транспорту визначається поєднанням електричної тяги для пасажирських перевезень та водневих і синтетичних палив для магістрального транспорту, що відповідає вектору екологізації України та світу [8].

Література

1. **Міжнародне енергетичне агентство**. Огляд світового ринку електромобілів 2025: аналіт. доп. Париж : IEA Publications, 2025. 182 с.
2. Національний план з енергетики та клімату України до 2030 року : затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 25 черв. 2024 р. № 751-р. Київ : Урядовий кур'єр, 2024.
3. Технології водневого транспорту 2026: стан впровадження в країнах ЄС та перспективи для України. *Енергоефективність в автотранспортному секторі*. 2026. № 1. С. 14–28.
4. **Мельник О. В., Коваленко С. М.** Альтернативні енергоустановки та палива для сучасного автомобіля : навч. посіб. Київ : Видавництво НТУ, 2024. 245 с.
5. Trends in alternative fuels infrastructure 2025 : [Electronic resource] / **European Alternative Fuels Observatory (EAFO)**. URL: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu> (date of access: 26.01.2026).

6. Гібридні та електричні силові установки: аналіз ефективності в умовах експлуатації 2025 року. *Автошляховик України*. 2025. Т. 12, № 4. С. 40–52.

7. Synthetic Fuels and Hydrogen in Road Transport: Strategic Outlook 2030 : [Electronic resource] / **IRENA Report**. URL: <https://www.irena.org> (date of access: 26.01.2026).

8. **Шевченко А. М.** Екологізація транспортного сектору України в контексті стандартів Євро-7. *Транспортні системи та технології* : зб. наук. пр. 2025. Вип. 45. С. 88–101.

УДК 621.436:621.43.018:662.769

ВПЛИВ НАДМАЛИХ ДОБАВОК ВОДНЮ В ПАЛИВОПРОВІДІ ВИСОКОГО ТИСКУ НА ФАЗУВАННЯ ЗГОРЯННЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА

Шалапко Денис Олегович, канд. техн. наук, доцент,
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
e-mail: shalapko.denys@gmail.com

Тарандушка Людмила Анатоліївна, канд. техн. наук, доцент,
Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: tarandushkal@ukr.net

Тарандушка Іван Павлович, викладач,
Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: tarandushkal@ukr.net

Мельник Ольга Григорівна, викладач,
Національний університет цивільного захисту України,
e-mail: melnyk.olja.2014@gmail.com

Сучасні вимоги до транспортних і малих енергетичних дизелів пов'язані не лише зі зниженням питомої витрати палива, а й з пошуком технічно доступних шляхів удосконалення робочого процесу без складного конструктивного втручання в паливну апаратуру. Одним із таких напрямів є використання водню як малої функціональної добавки до дизельного палива [1]. На відміну від класичних двопаливних схем, у яких водень подається у впускний тракт і частково заміщує основне паливо, у даній роботі розглянуто введення надмалих кількостей водню безпосередньо в паливопровід високого тиску перед форсункою.

Такий підхід становить інтерес з практичної точки зору, оскільки дає змогу впливати на процес сумішоутворення та початкові стадії згоряння без зміни геометрії розпилювача, моменту впорскування чи загальної архітектури дизельної системи. За умов пульсуючого тиску, який формується механічною паливною апаратурою, водень може диспергуватися в потоці рідкого палива у вигляді дрібних газових включень [2]. Це, у свою чергу, здатне змінювати

ефективні фізичні властивості паливної суміші, покращувати умови розпилювання та прискорювати випаровування крапель.

Метою роботи є оцінка впливу надмалих добавок водню, поданих у паливопровід високого тиску, на характер тепловиділення, фазування згоряння та механічну навантаженість дизельного двигуна. Для цього експериментальні дослідження проводилися на одноциліндровому чотиритактному дизельному двигуні Yanmar 186F, який працював у складі дизель-генераторної установки при частоті обертання 3000 хв^{-1} . Водень подавався у магістраль високого тиску при двох рівнях тиску, що відповідали надмалим його концентраціям у паливній системі.

Оцінювання перебігу робочого процесу здійснювалося за індикаторними діаграмами тиску в циліндрі. На їх основі визначали видиму швидкість тепловиділення та параметри фазування згоряння CA10, CA50 і CA90 [3]. Додатково аналізували максимальний тиск у циліндрі та максимальну швидкість його наростання, оскільки саме ці показники дають змогу оцінити допустимість інтенсифікації згоряння з точки зору механічної надійності двигуна [4].

У результаті дослідження встановлено, що навіть надмалі добавки водню помітно впливають на перебіг згоряння дизельного палива. Насамперед спостерігається скорочення затримки займання та зміщення основної частини тепловиділення у бік більш ранніх кутів повороту колінчастого вала. Такий результат свідчить про покращення як фізичної стадії підготовки паливоповітряної суміші, так і початкової хімічної активації процесу окиснення.

Найбільш інформативним показником виявився параметр CA50 [5], який характеризує положення середини сумарного тепловиділення. Його зміщення у бік верхньої мертвої точки вказує на більш раціональне фазування процесу згоряння. Це створює передумови для кращого використання теплоти палива в робочому циклі та, відповідно, для підвищення ефективності двигуна. Разом із тим встановлено, що зростання частки водню супроводжується збільшенням чутливості процесу до швидкості наростання тиску. Тому межа раціонального використання таких добавок визначається не стільки максимальним тиском у циліндрі, скільки динамікою його формування на початковій стадії згоряння.

Отримані результати дають підстави розглядати введення надмалих добавок водню в паливопровід високого тиску як реальний спосіб локального вдосконалення робочого процесу дизельного двигуна. Практична цінність такого підходу полягає в можливості його реалізації на базі серійних паливних систем із мінімальним конструктивним втручанням. Це особливо важливо для малих дизель-генераторних установок, де простота модернізації, надійність і вартість технічного рішення мають вирішальне значення.

Висновки

Введення надмалих добавок водню в паливопровід високого тиску дизельного двигуна забезпечує помітний вплив на перебіг згоряння навіть за дуже низьких концентрацій газової добавки. Основний ефект проявляється у скороченні затримки займання, зміщенні основної фази тепловиділення у

більш сприятливу зону циклу та покращенні параметра CA50. Разом з тим збільшення рівня водневої добавки обмежується зростанням швидкості наростання тиску в циліндрі. Отже, використання водню в режимі мікродобавок може бути ефективним засобом підвищення досконалості робочого процесу дизеля без суттєвої зміни його конструкції.

Література

1. **Shalapko D.** Optical-graphic studies of hydrogen additives' effects on diesel fuel atomization parameters. *Transport Problems*. 2023. Vol. 18, no. 4. P. 135–146.
2. **Shalapko D. et al.** Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2024. Vol. 72. Article e148837.
3. **Dimitriou P., Kumar M., Tsujimura T., Suzuki Y.** Combustion and emission characteristics of a hydrogen–diesel dual fuel engine. *Energy*. 2018. Vol. 155. P. 1–13.
4. **Heywood J. B.** Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed. New York : McGraw-Hill, 2018. 1078 p.
5. **Lefebvre A. H., McDonell V. G.** Atomization and Sprays. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2017. 537 p.

UDC 621.6

CFD MODELING OF HYDROGEN LEAKAGE IN THE FUEL SYSTEM OF AN AIRCRAFT HYDROGEN ENGINE

Oleksii Lysytsia, Ph.D., associated professor of aerospace thermal engineering department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute",
e-mail: a.lisitsa@khai.edu, ORCID: [0000-0002-5679-8459](https://orcid.org/0000-0002-5679-8459)

Illia Petukhov, Ph.D., associated professor of aerospace thermal engineering department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute",
e-mail: i.petukhov@khai.edu, ORCID: [0000-0002-0645-7912](https://orcid.org/0000-0002-0645-7912)

Taras Mykhailenko, Ph.D., associated professor of aerospace thermal engineering department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute",
e-mail: t.mykhailenko@khai.edu, ORCID: [0000-0003-4708-673X](https://orcid.org/0000-0003-4708-673X)

Artem Kovalov, postgraduate, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", e-mail: a.kovalov@khai.edu, ORCID: [0000-0002-9493-9769](https://orcid.org/0000-0002-9493-9769)

The use of liquid hydrogen as a fuel for aviation is an important step towards decarbonizing emissions. In addition to environmental friendliness, hydrogen has a high heat of combustion, provides high heat transfer coefficients, and its reserves as a chemical element are virtually unlimited. Along with the issues of creating economically feasible H₂ technologies, technical implementation of H₂ engines, on-board H₂ storage and supply systems, the key problem is safety at all stages of use [1].

Hydrogen is easily flammable and has a wide range of flammability in air. Therefore, its leaks pose a danger to any variant of the hydrogen fuel system configuration both in ground transport and in aviation. Emergency leaks of hydrogen from pipelines, tanks or other elements of the fuel system can lead to catastrophic consequences both on the ground and during flight. In recent years, special attention has been paid to safety issues and various scenarios of hydrogen leaks and its mixing with air are being considered. CFD modeling is a key tool for predicting such processes [2]. Despite a fairly large number of modern studies in the field of modeling hydrogen leaks and the features of its mixing with air, today there is no universal and reliable approach to solving such problems. Cases of hydrogen leaks on board an aircraft are especially poorly studied, taking into account the extensive system of pipelines, complex design and compact arrangement of fuel system elements.

The aim of this study is to calculate the flow distribution of hydrogen in air, the change in the volumetric concentration of hydrogen over time, and the identification of areas with an explosive concentration of hydrogen in the event of an emergency hydrogen leak in the fuel system of a hydrogen aircraft engine.

One of the most dangerous scenarios when hydrogen leaks into the enclosed airspace of an aircraft wing or fuselage through a damaged fuel system element is considered. The developed model also allows to calculate the processes of mixing flows during hydrogen leakage from fuel tanks located inside the aircraft. The studied computational domain is a volume of air space 2.8 m x 1.2 m x 0.8 m, in which an element 2 m long and 0.4 m in diameter is placed. On the surface in the center of this element is a source of hydrogen leakage with a diameter of 10 mm. Hydrogen mass flow rates of 0.1...1 g/s are considered for cases with ventilation and in its absence.

The problem was solved in a three-dimensional formulation using CFD modeling. The process of mixing flows was modeled by solving a system of mass, momentum, and energy conservation equations with the addition of a convective-diffusion equation within the Species Transport model. The Realizable k- ϵ model was used to describe turbulence. The Pressure-Based Solver in a transient formulation was used as a solver for such a system of equations. Based on the results of the mesh convergence analysis, a hybrid mesh with a total number of elements of 0.83 million was selected. The hydrogen leakage model was validated by comparing calculations for different turbulence models with experimental data from other authors. The calculation error did not exceed 10%.

Based on the results of the calculations, the regularities of the hydrogen flow distribution in the air space around the fuel system elements, the change in the volume fraction of hydrogen over time, and the areas with explosive hydrogen concentrations and the conditions of their occurrence were determined.

Conclusion

Analysis of the results showed the maximum concentration of hydrogen in the air is observed in the core of the hydrogen flow and is about 90% by volume. The

diameter of such a core for the case without ventilation is almost independent of the hydrogen flow rate and in the range of hydrogen mass flows of 0.1...1 g/s is about 0.15 m. For the case of hydrogen leakage with a mass flow rate of 1 g/s and without ventilation, the explosive concentration of hydrogen in the air in the entire calculation area is reached very quickly. After 10 seconds, it occupies about 20% of the total volume, and after 60 seconds it is 60%. The explosive concentration of hydrogen in the air is established mainly in the first 60 seconds from the beginning of the leak for the case without ventilation and in its presence with air velocities of 0.5 m/s. In the case of ventilation in a horizontal direction with an air velocity of 1 m/s, hydrogen does not accumulate in the volume; it is all blown away by the air flow.

The results obtained allow for more accurate prediction of the consequences of an emergency hydrogen leak in the fuel systems of hydrogen aircraft engines, and for developing effective ways to identify hydrogen leaks, which will increase the reliability and safety of hydrogen systems in general.

The project is supported by the Clean Aviation Joint Undertaking and its members in the framework of Grant Agreement n° 101102019- HYDEA.

References

1. **Mubasshira M. M. R. et al.** The future of hydrogen-powered aviation: Technologies, challenges, and a strategic roadmap for sustainable decarbonization. *Advanced Energy Sustainability Research*. 2025. Article e202500223. DOI: <https://doi.org/10.1002/aesr.202500223>.
2. **Li Y. et al.** Safety analysis of hydrogen leakage accident with a mobile hydrogen refueling station. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 171. P. 619–629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.051>.

**Секція 9.
КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЄКТУВАННЯ
ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ.
СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ
В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТНИХ
ЗАСОБІВ. КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ
СИСТЕМАХ І МАШИНАХ**

УДК 621.486

**СТРУКТУРНО-ЛОГІЧНА СХЕМА ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТЕХНОЛОГІЇ ВИБОРУ СЕНСОРНИХ ВУЗЛІВ ДЛЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПАРКУВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ
МЕТОДІВ FUZZY BWM І FUZZY MARCOS**

Кононихін Олександр Сергійович, канд. техн. наук, доцент каф. АКІТ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: makonon@i.ua, ORCID ID 0000-0002-6396-6836

Малік Денис Олегович, аспірант,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: makonon@i.ua, ORCID ID 0009-0001-5863-2241

Моїсеєнко Ростислав Сергійович, аспірант,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: makonon@i.ua, ORCID ID 0009-0004-3720-7731

Стрімка урбанізація та збільшення кількості транспортних засобів у сучасних мегаполісах загострюють проблему дефіциту паркувального простору. Це призводить до ускладнення дорожнього руху, підвищення рівня викидів вихлопних газів та економічних втрат. Вирішення цієї проблеми лежить у площині впровадження концепції «Розумного міста», невід'ємною складовою якої є інтелектуальні паркувальні системи (ІПС).

Основою будь-якої ІПС є мережа сенсорних вузлів, що здійснюють безперервний моніторинг стану паркомісць (вільно/зайнято) у режимі реального часу. На сучасному ринку представлено широкий спектр апаратних рішень: магнітометри, ультразвукові та інфрачервоні датчики, системи відеоаналітики тощо. Кожна з цих технологій має власні переваги та недоліки, що робить процес вибору оптимального обладнання для конкретного інфраструктурного об'єкта нетривіальною інженерною задачею [1].

Вибір типу сенсорного вузла для ІПС є класичною задачею багатокритеріального прийняття рішень. Системний архітектор або особа, що приймає рішення (ОПР), повинна враховувати цілий комплекс суперечливих критеріїв: капітальні витрати на закупівлю, складність монтажу та обслуговування, енергоспоживання (час автономної роботи), точність детекції за різних погодних умов, а також затримку передачі даних.

Складність вирішення цієї задачі поглиблюється тим, що експертні оцінки характеристик обладнання часто є суб'єктивними, неповними або лінгвістично невизначеними (наприклад, «висока надійність», «помірне енергоспоживання»). Традиційні методи багатокритеріальної оцінки не здатні адекватно обробляти таку невизначеність.

Тому актуальним є розробка інформаційної технології, яка використовує апарат нечіткої логіки. Зокрема, інтеграція сучасного методу Fuzzy BWM (Best-Worst Method) [2] для розрахунку вагових коефіцієнтів критеріїв дозволяє значно знизити когнітивне навантаження на експертів та підвищити узгодженість їхніх оцінок порівняно з класичним методом аналізу ієрархій. Водночас застосування методу Fuzzy MARCOS [3] забезпечує високу стабільність фінального ранжування альтернатив навіть при зміні їх кількості, шляхом обчислення корисності відносно ідеального та антиідеального розв'язків [4]. Розробка структурно-логічної схеми такої технології дозволить формалізувати та автоматизувати процес проектування ІПС.

Метою дослідження є підвищення ефективності проектування паркінгів за рахунок розробки структурно-логічної схеми інформаційної технології вибору сенсорних вузлів для інтелектуальних паркувальних систем, яка базується на комплексному застосуванні методів багатокритеріального аналізу Fuzzy BWM та Fuzzy MARCOS.

Це дозволить мінімізувати вплив суб'єктивної невизначеності експертних оцінок та підвищити наукову обґрунтованість проектних рішень при розгортанні інфраструктури розумних парковок.

На рис 1 представлена розроблена структурно-логічної схеми інформаційної технології вибору сенсорних вузлів для інтелектуальних паркувальних систем на основі методів FUZZY BWM і FUZZY MARCOS

На першому етапі відбувається формування вхідних даних, що передбачає визначення двох ключових множин. Спочатку формується множина доступних альтернатив, яка включає потенційні апаратні рішення для моніторингу паркомісць, зокрема вбудовані магнітометри, ультразвукові датчики, інфрачервоні сенсори та системи відеоаналітики. Для їх об'єктивного порівняння також визначається множина критеріїв оцінки, що охоплює такі техніко-економічні показники, як вартість вузла, його енергоспоживання, точність детекції, затримка передачі даних у мережі, складність монтажу та стійкість до несприятливих погодних умов.

Після ініціалізації вхідних даних алгоритм розгалужується на два паралельні процеси обробки експертної інформації. На другому етапі застосовується метод Fuzzy BWM для визначення важливості кожного критерію. Експерти аналітично визначають найкращий та найгірший критерії з усієї множини, після чого формують вектори парних порівнянь найкращого до інших та інших до найгіршого, використовуючи лінгвістичні змінні, виражені трикутними нечіткими числами. Результатом цього етапу є обчислений вектор оптимальних нечітких ваг критеріїв.

Паралельно з цим, на третьому етапі здійснюється нечітке оцінювання самих альтернатив. Група експертів надає свої оцінки щодо кожної характеристики сенсорних вузлів за обраними критеріями. Оскільки оцінки різних експертів можуть відрізнятися, проводиться їх агрегування шляхом усереднення трикутних нечітких чисел. Виходом цього етапу є сформована початкова нечітка матриця рішень, яка відображає узагальнене бачення характеристик обладнання.

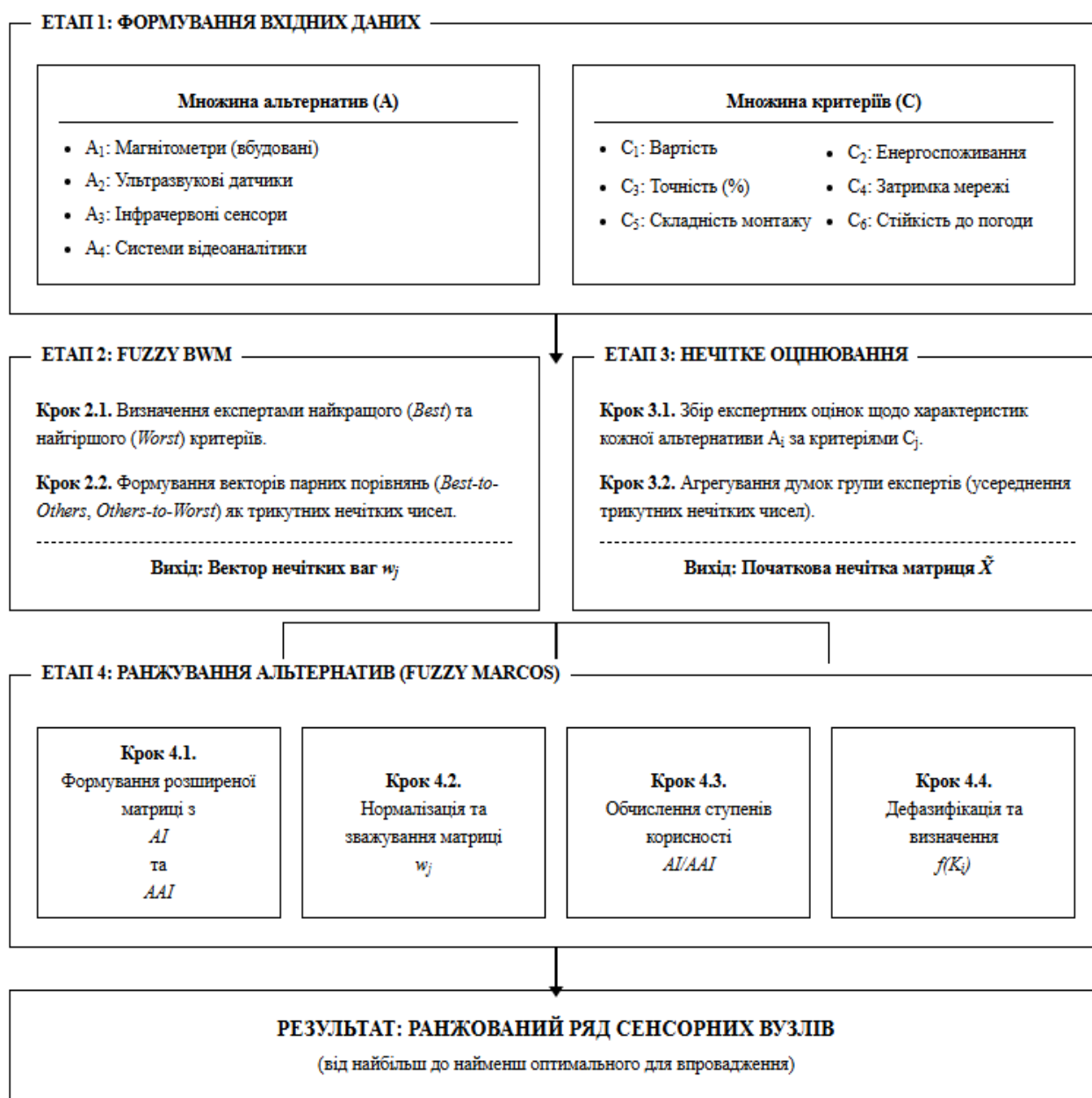


Рисунок 1 – Структурно-логічна схема інформаційної технології вибору сенсорних вузлів для інтелектуальних паркувальних систем на основі методів Fuzzy BWM і Fuzzy MARCOS

Четвертий етап об'єднує результати попередніх обчислень для остаточного ранжування альтернатив за допомогою методу Fuzzy MARCOS. Проце-

дура розпочинається з розширення початкової матриці шляхом додавання векторів ідеального та антиідеального розв'язків. Далі виконується нормалізація значень та їх зважування з використанням вектора нечітких ваг, отриманого на другому етапі.

Після цього розраховуються ступені корисності кожної альтернативи відносно опорних ідеального та антиідеального значень. Етап завершується дефазифікацією отриманих результатів та обчисленням фінальної функції корисності для кожної моделі сенсора.

Результатом виконання всіх кроків інформаційної технології є сформований ранжований ряд сенсорних вузлів. Альтернативи розташовуються у порядку спадання їхньої функції корисності, тобто від найбільш оптимального варіанту до найменш придатного. Це надає системним архітекторам та особам, що приймають рішення, математично обґрунтований інструментарій для вибору найкращого обладнання при розгортанні інфраструктури розумних парковок.

Висновки

У дослідженні розроблено структурно-логічну схему інформаційної технології вибору сенсорних вузлів для інтелектуальних паркувальних систем. Складну багатокритеріальну задачу вирішено шляхом інтеграції методів Fuzzy BWM та Fuzzy MARCOS, що дозволило об'єктивно врахувати техніко-економічні характеристики обладнання.

Практична цінність технології полягає у створенні математично обґрунтованого інструментарію для системних архітекторів проектів Smart City, що дозволяє оптимізувати витрати при розгортанні IoT-інфраструктури.

Література

1. **Кононихін О. С., Малік Д. О., Моїсеєнко Р. С.** Нечітка модель підтримки прийняття рішень для сенсорної мережі міського паркінгу. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. № 13 (54). С. 2272–2283.
2. **Stević Ž., Pamučar D., Puška A.** Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to Compromise solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering*. 2020. Vol. 140. 106231.
3. **Rezaei J.** Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*. 2015. Vol. 53. P. 49–57.
4. **Kumar S. et al.** Application of Integrated BWM Fuzzy-MARCOS Approach for Coating Material Selection in Tooling Industries. *Materials*. 2022. Vol. 15. 9002. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15249002>.

УДК 622.24

ПРОГРАМНЕ ТОРПЕДУВАННЯ СВЕРДЛОВИН З МЕТОЮ ЛІКВІДАЦІЇ ПРИХВАТІВ БУРОВИХ КОЛОН

Янютин Євген Григорович, докт. техн. наук, проф.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: e.yanutin@gmail.com, ORCID: 0009-0006-0325-6433

Горлов Ярослав Віталійович, студент ТП-43,
Харківський національний університет імені Василя Назаровича Каразіна
e-mail: yaroslav.gorlov@gmail.com, ORCID: 0009-0002-9864-9109

Воропай Олексій Валерійович, докт. техн. наук, проф. кафедри ДМ та ТММ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: voropay.alexey@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3396-8803

Шарапата Андрій Сергійович, канд. техн. наук, доцент кафедри ДМ та ТММ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: phd.sharapata@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0823-9262

Єгоров Павло Анатолійович, канд. техн. наук, доцент кафедри ДМ та ТММ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: phd.egpavel@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6616-9966

Вступ

Сучасна стратегія видобутку корисних копалин та розвитку геотермальної енергетики пов'язана з інтенсивним поглибленням свердловин. У таких умовах будівництва об'єктів нафтогазового комплексу зростає ймовірність виникнення аварій, серед яких найбільш деструктивними є прихвати бурильних колон. Це головна причина простоїв, що складають до 15-20% від загального часу будівництва свердловин [1], які наносять бурильній галузі значні збитки. Ліквідація прихватів у глибоких свердловинах залишається однією з найскладніших інженерних задач, оскільки традиційні методи часто виявляються малоефективними. Саме тому розробка і покращення методів ліквідації прихватів є надзвичайно важливою для підвищення продуктивності і рентабельності бурильної галузі.

Один із традиційних способів ліквідації прихватів базується на створенні потужного одноразового імпульсу в певній зоні бурильної колони. Проте такий підхід забезпечує лише тимчасове розшарування контактної зони з меншими зазорами, не руйнуючи повністю зв'язки на всій ділянці прихвату. Фундаментальні дослідження вказують на можливість використання хвильових деформаційних процесів для керування механічною системою "бурильна колона – затрубне середовище". Зокрема, результати моделювання нестационарного імпульсного навантаження оболонок типу Тимошенка на пружній основі [2–4] дозволяють:

- забезпечити методологію ідентифікації імпульсних навантажень на елементи бурильних колон [2], що є важливим для прогнозування динамічної міцності бурильних труб;

- врахувати масово-інерційні характеристики в'язкопружних опор [3], які є вагомими для оптимізації компоновки бурильної колони та зменшення або збільшення її резонансних коливань;

- використати механізм керування нестационарними коливаннями [4], який може бути застосований для активного «розгойдування» прихопленої колони за допомогою додаткових динамічних навантажень.

Це може підвищити надійність бурильних інструментів та забезпечити покращення методів вивільнення інструменту, що важливо для ліквідації аварій. Проте перехід від теоретичних моделей оболонок до практичних алгоритмів керованого вибухового впливу в обмеженому просторі свердловини досі залишається недостатньо опрацьованим.

На способи ліквідації прихватів бурильних колон були отримані два авторських свідоцтва [5, 6]. Перше свідоцтво було надано Ловлі С. А. [5], який є автором ліквідації прихватів труб за допомогою підриву одного заряду, який на каротажному кабелі спускається на місце проти прихвату і після підриву якого відбувається процес розхожування бурильної колони. Друге свідоцтво було видано декільком авторам [6]. Воно видано за спосіб струшування прихопленої колони за допомогою підриву декількох зарядів в програмному режимі. Ці заряди спускаються на багатожильному каротажному кабелі і розміщуються спеціальним чином проти зони прихвату.

В роботі Левчук К. Г. [7], зокрема, приведено описання сучасних технічних засобів і технологій вивільнення прихоплених колон від прихватів. Ця робота містить в собі 230 посилань на статті і монографії, що присвячені темі буріння свердловин.

Останнім часом з'явилося багато публікацій [8–14], в яких автори визнають необхідність створення нових ефективних методів запобігання прихватам бурильного інструмента та використання сучасних технологій, зокрема машинного навчання та штучного інтелекту, для раннього виявлення ризиків появи прихватів шляхом постійного моніторингу і діагностики параметрів процесу буріння. В цих публікаціях дослідники зосереджуються на різних механізмах прихоплень, таких як враховують геометрію стовбура свердловини, відкладення шламу та ерозію стінок свердловини. Зокрема, у роботі [14] описується управління стабільністю стовбура під час буріння на родовищах з використанням сучасних методів. Чисельне моделювання у роботі [9] використовується для аналізу механізмів прихоплень, пов'язаних із відкладенням шламу при різних режимах буріння. Метод прогнозування коефіцієнта тертя бурильної колони зі стінками свердловини за допомогою графової мережі пропонується у роботі [10]. Модель прогнозування рідкісних подій прихоплення на основі прихованої марковської моделі розроблена у роботі [13].

Існуючі методи торпедування свердловин базуються на одноразовому вибуховому навантаженні, що забезпечує лише короткочасний руйнівний вплив на зв'язки колони з затрубним простором. Це обмеження мотивує розробку альтернативних підходів, здатних генерувати тривалі нестационарні коливальні процеси в бурильній колоні в її прихваченій зоні.

У даному дослідженні висувається гіпотеза, що перехід від одноразового імпульсу до «резонансно-подібної» моделі впливу – шляхом ініціювання серії послідовних вибухів із програмно заданими затримками – дозволить створити тривалу суперпозицію деформаційних та гідродинамічних хвиль. Це, у свою чергу, має забезпечити формування збільшеного і стабільного зазору між колоною та породою за рахунок підвищення амплітуди вимушених коливань стінок труб.

Мета дослідження

Мета дослідження роботи, що викладається тут, полягає у розробці математичної моделі та експериментальній валідації технології програмного торпедування, що використовує енергію імпульсних впливів на елементи конструкцій бурильних колон у вигляді керованої послідовності декількох підривів зарядів напроти місця прихвату для інтенсифікації вибухового деформування бурильних колон. Це повинно робитися під час одного спуску-підйому багатожильного каротажного кабелю, на якому закріплені вибухові заряди. Нестационарні коливання елементів бурильної колони і середовища навколотрубного простору повинні створити умови для повного звільнення від прихвату. Автори назвали цей підхід – програмним торпедуванням бурильного інструмента з метою його звільнення від прихватів.

Матеріали та методи

В основу дослідження покладено математичне моделювання нестационарного імпульсного внутрішнього навантаження круглих циліндричних оболонок Тимошенка, взаємодіючих із середовищем (сальником або обваленою породою), модельованим одно- та двосторонньою пружною основою. Бурильна труба моделюється як пружна циліндрична оболонка теорії Тимошенка. Розроблено декілька схем розташування зарядів залежно від типу прихвату, включаючи конфігурації для локальних прихватів, ймовірних зон прилипання бурильної колони до стінок свердловини або зон ймовірного обвалу порід. Для реалізації технології на аварійних свердловинах розроблений наземний електронний блок керування (рис. 1) у складі каротажної станції, що подає електричні імпульси до зарядів і забезпечує програмовані часові затримки між підривами до шести зарядів (діапазон затримок: 1 мс – кілька хвилин) на глибинах до 6 км.

Результати та обговорення

Аналіз числових результатів математичного моделювання демонструє, що програмне торпедування з оптимальними часовими затримками (відповідно до часу проходження згинальних деформаційних хвиль в матеріалі бурильних труб чи хвиль тиску у внутрішній рідині) ініціює суперпозицію хвильових процесів, що призводить до вимушених коливань стінок труб із значно більшими амплітудами та тривалістю порівняно з традиційним одновиховим методом. Моделювання підтверджує формування стійкого зазору між трубами та затрубним середовищем після послідовного підриву серії зарядів, тоді як одноразове навантаження, забезпечує лише тимчасове та значно менше розшарування. Програмний метод торпедування створює умови для резо-

нансно-подібного руйнування прихватів. Це дозволяє не просто «струснути» колону, а цілеспрямовано знизити коефіцієнт тертя в парі «метал–порода», що може бути вирішальним фактором при ліквідації прихватів.



Рисунок 1 – Електронний блок керування

Експериментальні випробування на стендовій свердловині (Горобцівська площа, Полтавська область, жовтень 1984 рік) підтвердили високу надійність вибухової системи при п'яти спуско-підйомних операціях і програмного підриву трьох торпед. Застосування на аварійній промисловій свердловині «Римаровська-1» (глибина прихвату більше за 4835 м, грудень 1984 рік) продемонструвало ефективність технології при ліквідації аварії шляхом роз'єднання (відгвинчування) колони у верхній зоні прихвату за допомогою послідовного підриву трьох торпед.

Пізніше за допомогою спеціалістів (з міста Дніпро) в галузі програмного підриву зарядів в залізородних шахтах, розроблені і створені два промислових зразки електронних блоків програмного торпедування свердловин, які були передані до Полтавської експедиції з геофізичних досліджень в свердловинах.

Висновки

Проведені теоретичні дослідження і практичні експерименти вказують на новизну і ефективність запропонованого підходу програмного торпедування як методу ліквідації прихватів на глибинах до 6 км. На відміну від традиційного одноразового вибуху, використання серії імпульсів із прецизійними затримками від 1 мс дозволяє вийти на режим резонансно-подібного руйнування адгезійних зв'язків через керовану суперпозицію вибухових хвиль. Математичне моделювання на основі циліндричних оболонок типу Тимошенка дозволило теоретично обґрунтувати механізм виникнення вимушених коливань стінок труб, що є ключем до створення керованого зазору між колоною та затрубною породою. Практичні результати на свердловині «Римаровська-1» (4835 м) та експерименти на Горобцівській площі довели надійність наземної системи керування через каротажний кабель, що забезпечує стабільну суперпозицію хвиль навіть у середовищах із високим гідростатичним тиском.

Запропонована методика відкриває перспективи для подальшого покращення боротьби з прихватами бурильних колон за допомогою використання енергії вибухових матеріалів.

Цікавим і перспективним є використання на цьому шляху теоретичних матеріалів, висвітлених в публікаціях [2–4], [15,16]. В публікаціях [2–4] розглядаються різні питання специфіки імпульсного деформування елементів конструкцій, якими можна моделювати частини бурильного обладнання. Теоретичні методики і підходи, розглянуті у роботі [15] досліджують фізичну поведінку гранульованого матеріалу при динамічному нагнітанні рідини в обмеженому просторі (кавітаційні та вихорові ефекти), що може дозволити посилити ударну хвилю на звільнення колони при вибуховому її навантаженні. Спираючись на методологічний підхід [16] в майбутньому, оцінка поведінки елементів обладнання під дією серії імпульсних навантажень при ліквідації прихвату повинна включати критерії надійності і довговічності та прогнози витрат на технічне обслуговування, щоб гарантувати, що процес ліквідації аварії не призведе до порушення структурної цілісності бурового обладнання.

Література

1. Орловський В. М., Білецький В. С., Сіренко В. І. Буріння нафтових і газових свердловин. Львів : Новий Світ-2000, 2024. 320 с.
2. Voropay A. et al. Identification of the pulse axisymmetric load acting on a composite cylindrical shell, inhomogeneous in length, made of different materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 2, no. 7 (116). P. 21–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253356>.
3. Voropay A. et al. Modeling a Viscoelastic Support Considering Its Mass-Inertial Characteristics During Non-Stationary Vibrations of the Beam. *Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 10, no. 1. P. D8–D14. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(1\).d2](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).d2).
4. Yanyutin E., Voropay A. Controlling nonstationary vibrations of a plate by means of additional loads. *International Journal of Solids and Structures*. 2004. Vol. 41, no. 18. P. 4919–4926. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.02.062>.
5. Спосіб ліквідації прихоплення колон і труб : пат. 109276 СРСР. / Ловля С. А. № 451234 ; заявл. 12.05.1953 ; опубл. 15.08.1953.
6. Спосіб ліквідації прихоплення бурильної колони : пат. 1295797 СРСР. / Воробйов Ю. С. та ін. № 3856789 ; заявл. 20.02.1985 ; опубл. 07.03.1987, Бюл. № 9.
7. Левчук К. Г. Технічні засоби та технології звільнення зачепленої металевої бурильної колони. *Металофізика та новітні технології*. 2018. Т. 40, № 1. С. 45–137.
8. Othman E. B. et al. Application of Machine Learning to Augment Wellbore Geometry-Related Stuck Pipe Risk Identification in Real Time. *Offshore Technology Conference*. 2022. P. D41S002R004. DOI: <https://doi.org/10.4043/31695-MS>.
9. Zhu N., Huang W., Gao D. Numerical analysis of the stuck pipe mechanism related to the cutting bed under various drilling operations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 208. 109783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109783>.
10. Liu M. et al. Inertial Effect of Drill Pipe Friction Trend and Early Warning of Stuck Pipe. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2024. P. D21S015R004. DOI: <https://doi.org/10.2118/220991-MS>.
11. Katzmann L., Arvalo P., Starostin A. Ensuring Wellbore and Equipment Integrity via Data-Driven Adaptive Limit Modeling for Pressure Management and Stuck Pipe Prevention. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. 2025. P. D31S121R009. DOI: <https://doi.org/10.2118/228981-MS>.

12. **Nautiyal A., Mishra A. K.** Machine learning approach for intelligent prediction of petroleum upstream stuck pipe challenge in oil and gas industry. *Environment, Development and Sustainability*. 2025. Vol. 27. P. 24167–24193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02387-3>.
13. **D'Amicis S. et al.** Stuck pipe prediction from rare events in oil drilling operations. *Upstream Oil and Gas Technology*. 2023. Vol. 11. 100096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.upstre.2023.100096>.
14. **George J. G., Okonkwo O., Akinfolarin A.** Successful Management of Wellbore Stability to Mitigate Stuck Pipe Incidents in a Brownfield Development Drilling Campaign: A Case Study of a Land Well in the Niger Delta. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. 2025. P. D21S002R005. DOI: <https://doi.org/10.2118/228660-MS>.
15. **Rogovyi A. et al.** Reduction of Granular Material Losses in a Vortex Chamber Supercharger Drainage Channel. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V*. Cham : Springer International Publishing, 2022. P. 218–226.
16. **Andrenko P. et al.** Improving the Technical Level of Hydraulic Machines, Hydraulic Units and Hydraulic Devices using a Definitive Assessment Criterion at the Design Stage. *Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 24, no. 1. P. 57–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2021.01.057>.

УДК 621.313

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИЗМАТИЧНИХ LiFePO₄ АКУМУЛЯТОРІВ НА ОСНОВІ ЗВОРотної ЗАДАЧІ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ

Плахотний Олександр Петрович, д. техн. наук, проф. каф. ЕТ,

Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: o.plakhotny@chdtu.edu, ORCID ID 0000-0002-5045-6132

Йовченко Алла Василівна, канд. техн. наук, ст. викладач каф. АТЕ,

Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua, ORCID ID 0000-0002-7069-1092

Костьян Наталія Леонідівна, канд. техн. наук, доц. каф. АТЕ,

Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: n.kostian@chdtu.edu.ua, ORCID ID 0000-0002-1599-4007

Для транспортних систем, що працюють у режимах частих пусків і зупинок, високих пікових навантажень та обмеженого часу безперервної роботи, характерним є застосування енергоефективних і компактних джерел живлення. До таких систем належать міський електричний транспорт (електробуси, тролейбуси з автономним ходом), складська та промислова техніка, автономні логістичні платформи, безпілотні наземні транспортні засоби, спеціалізована військова техніка та ін. При їх роботі виникають короткі робочі цикли з інтенсивними режимами навантаження, що зумовлює доцільність використання призматичних акумуляторних батарей (АКБ) з огляду на їхню компактність, відносно низьку вартість, ефективне використання внутрішнього об'єму та достатні енергетичні характеристики за умов невеликого запасу енергії.

Термічний менеджмент є ключовим фактором продуктивності та безпеки АКБ. Призматичні елементи мають гірші умови тепловідведення порівняно з циліндричними через конструктивну неоднорідність і обмежену ефективність конвективного охолодження, що сприяє перегріву [1]. Зі зростанням потужності АКБ підвищуються температура та теплові градієнти, що зумовлює необхідність розроблення точних теплових моделей, зокрема з урахуванням теплоємності та теплопровідності [2, 3].

Літій-іонні акумулятори (LFP, NCA, NMC), попри високі енергетичні характеристики, потребують ефективного теплового контролю [4]. Відхилення температури від оптимального діапазону призводить до зниження ємності, ресурсу та безпеки, що обумовлює застосування систем терморегулювання (BTMS) [5–7].

Для проведення досліджень були обрані АКБ Westinghouse, 125 Ah. Їх активна частина складається з багатошарового електродного пакета типу «jelly-roll», розміщеного в алюмінієвому корпусі. Електродна структура включає катод (LiFePO_4 на Al-фользі), сепаратор та анод (графіт на Cu-фользі), просочені електролітом на основі LiPF_6 .

З огляду на складну багатошарову геометрію, для моделювання теплопереносу застосовано узагальнену (homogenized) макромодель, у якій активна зона представлена як однорідне пористе середовище з ефективними теплофізичними властивостями, тоді як корпус і клеми моделюються окремо. Такий підхід дозволяє адекватно відтворити теплові процеси без надмірного ускладнення скінчено-елементної сітки.

Важливою особливістю є врахування анізотропії теплопровідності. У площині шарів значення коефіцієнтів теплопровідності k_x , k_y значно вищі, ніж у поперечному до шарів напрямку k_z . Це обумовлено наявністю металевих струмозбірників і полімерних прошарків. Для бічних частин багатошарового електродного пакета типу «jelly-roll», що мають напівциліндричну форму, застосовано локальні циліндричні системи координат із різними значеннями коефіцієнтів теплопровідності по осям координат k_{rc} , k_{tc} , k_{zc} відповідно. Параметри анізотропії визначалися комбінуванням експериментальних даних та числового моделювання.

Експериментальні дослідження проведено на чотирьох призматичних комірках LiFePO_4 125 Ah із використанням BMS з функцією активного балансування. Температурний контроль здійснювався за допомогою тепловізора, пірометрів і термопар із реєстрацією даних у часі, а внутрішній опір вимірювався спеціалізованим приладом YAOREA YR1035+. Процес заряджання батарей здійснювався за допомогою регульованого імпульсного джерела живлення MS-1500-15 KNOA з вихідними параметрами 15 В, 100 А. Розряджання проводилося з використанням інвертора Nouli 4000W. Величина струму контролювалася і логувалася за часом за допомогою електровимірювальних кліщів з функцією підключення до комп'ютера.

Розрахунок нагрівання АКБ проведено у нестационарній постановці задачі від 0 до 3600 с при струмі заряджання 100 А, що забезпечує досягнення 90 %

заряду. Подальше зарядження здійснювалося у режимі зниження струму та підтримання напруги. Внутрішній опір чотирьох послідовно з'єднаних комірок становив 5,6 мОм, температура навколишнього середовища – 20 °С, зовнішні стінки підлягали природній конвекції з коефіцієнтом тепловіддачі 20 Вт/(м²·К).

Для першої ітерації анізотропні коефіцієнти теплопровідності активного матеріалу комірок задавалися: радіально у бічних напівциліндричних частинах і перпендикулярно до шарів у прямокутних частинах $k_{rc}=k_z=1$ Вт/(м·К), інші складові – 10 Вт/(м·К), теплоємність $C_p=1000$ Дж/(кг·К).

Наступним етапом проведено інтеграцію експериментальних даних з чисельним моделюванням для калібрування теплофізичних параметрів активного матеріалу (коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності). Оптимальна збіжність між експериментальними та розрахованими температурами на шести контрольних точках становила 7–8 % на момент часу 3600 с. На ранніх етапах зарядження відхилення досягали 11 %, проте при калібруванні параметрів пріоритет надавався кінцевому моменту зарядження високим струмом, що відповідає критичному тепловому стану комірок.

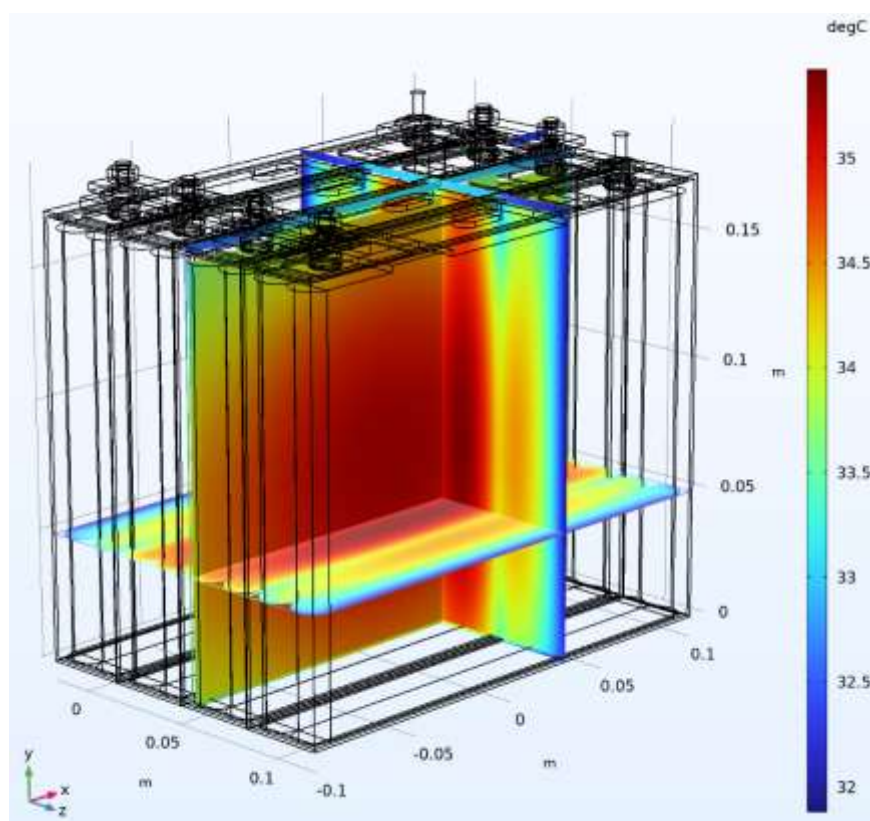


Рисунок 1 – Результати розрахунку теплових полів всередині акумуляторних батарей на момент часу 3600 с за каліброваних значень теплофізичних параметрів активного матеріалу комірок

Найкращі теплофізичні параметри активного матеріалу: $k_x=k_y=24$, $k_z=0,5$, $k_{rc}=0,5$, $k_{tc}=24$, $k_{zc}=24$ Вт/(м·К), $C_p=650$ Дж/(кг·К), де індекси відповідають напрямкам осей загальної та місцевих систем координат. Значення параметрів узгоджуються з літературними даними для Li-ion комірок NMC і LFP ємністю

20–44 Ah, хоча геометричні та ємнісні характеристики можуть відрізнятися. Наприклад, у [1] для pouch-батарей 44 Ah коефіцієнт теплопровідності в площині шарів становив 15,6 Вт/(м·К), перпендикулярно до шарів – 0,376 Вт/(м·К), теплоємність – 1250–1290 Дж/(кг·К); для АКБ 20 Ah – 25,8–27,9 Вт/(м·К) та 0,503–0,544 Вт/(м·К), теплоємність 541 Дж/(кг·К).

З уточненими параметрами розраховано температурні поля всередині батареї (рис. 1). Максимальна температура в центральних комірках досягла 35,5 °С, що трохи перевищує рекомендовану межу 35 °С для запобігання деградації, тоді як різниця температур між центральними та крайніми комірками не перевищує 2–3 °С, укладаючись у допустимі межі. Результати демонструють, що при заряджанні струмом 100 А (0,8 С) відбувається локальне перевищення критичної температури, але нерівномірність теплового поля залишається мінімальною.

Висновки

Запропоновано ефективний метод дослідження динаміки теплових полів у призматичних літій-іонних АКБ під час заряджання та розряджання. Показано, що поєднання чисельного моделювання з експериментальними вимірюваннями дозволяє визначати електрохімічні та теплофізичні параметри активного матеріалу з точністю, достатньою для інженерних розрахунків. Встановлено, що анізотропія теплофізичних характеристик внутрішніх елементів комірок істотно впливає на розподіл теплових полів при швидкій зарядці та високих струмах розряджання. Кількісно підтверджено, що теплопровідність у площині шарів та через площину відрізняється більш ніж на порядок.

Література

1. Al-Zareer M., Da Silva C., Amon C. H. Predicting anisotropic thermophysical properties and spatially distributed heat generation rates in pouch lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 2021. Vol. 510. 230362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230362>.
2. Steinhardt M. et al. Meta-analysis of experimental results for heat capacity and thermal conductivity in lithium-ion batteries: A critical review. *Journal of Power Sources*. 2022. Vol. 522. 230829. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230829>.
3. Fan H., Zhao Y. Identification of thermo-physical parameters of square batteries based on the lumped thermal model. *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Precision Mechanical Measurements (Proc. SPIE 13178)*. 2024. P. 259–265. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3032521>.
4. Giammichele L. et al. Evaluation of the influence of lithium-ion battery composition on thermal power generation. *Sustainable Energy & Fuels*. 2024. Vol. 8. P. 1566–1576. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3SE01452A>.
5. Ali H. M. Thermal management systems for batteries in electric vehicles: A recent review. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 5545–5564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.359>.
6. Lin J. et al. A review on recent progress, challenges and perspective of battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 167. 120834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120834>.
7. Tete P. R., Gupta M. M., Joshi S. S. Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical review. *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 35. 102255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102255>.

**Секція 10.
ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ.
ЕНЕРГЕТИКА І НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ.
ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ**

УДК 628.971

**АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ
ОСВІТЛЕННЯ ПІШОХІДНИХ ПЕРЕХОДІВ В УКРАЇНІ**

Гарбуз Максим Олександрович, студент, Харківський національний
автомобільно-дорожній університет, e-mail: garbuzmax3@gmail.com

Міжнародний досвід впровадження автономних систем освітлення пішохідних переходів демонструє різноманітні підходи до вирішення проблеми забезпечення безпеки дорожнього руху в умовах обмеженого доступу до централізованого електропостачання. Аналіз реалізованих проектів у європейських країнах та Північній Америці дозволяє виявити основні технологічні рішення, економічні показники ефективності та практичні результати впровадження таких систем [1]. Аналіз міжнародного досвіду виявляє основні технічні параметри успішних автономних систем: використання LED-технології з адаптивним управлінням потужністю, інтеграція датчиків присутності для оптимізації енергоспоживання, застосування сонячних панелей з акумуляторними системами для забезпечення автономності та дотримання міжнародних стандартів освітленості та безпеки.

Довговічність автономних систем освітлення пішохідних переходів визначається терміном експлуатації основних компонентів системи та витратами на їх технічне обслуговування протягом життєвого циклу. Світлодіодні компоненти характеризуються найтривалішим терміном експлуатації серед усіх елементів автономної системи. Згідно з дослідженнями, LED-елементи можуть функціонувати від 10000 до 50000 годин, що еквівалентно кількарічній роботі без необхідності заміни. Критерієм оцінки терміну експлуатації світлодіодів є показник L70, що відповідає моменту зниження світлового потоку до 70% від початкового значення [2].

Акумуляторні системи мають найкоротший термін експлуатації серед основних компонентів автономного освітлення. Літій-іонні акумулятори, що є оптимальним вибором для автономних систем, характеризуються терміном експлуатації 2 – 4 роки залежно від інтенсивності циклів заряд-розряд та умов експлуатації [3].

Сонячні панелі також характеризуються тривалим терміном експлуатації. Монокристалічні фотоелектричні модулі забезпечують стабільну роботу протягом 25 – 30 років з поступовою деградацією потужності на рівні 0,5 – 0,8% щорічно [2]. Дослідження довгострокової ефективності фотоелектричних

систем показало, що правильно спроектовані та встановлені панелі зберігають понад 80% початкової потужності після 25 років експлуатації.

Витрати на обслуговування автономних систем освітлення є значно нижчими порівняно з традиційними мережевими системами. Дослідження американської асоціації громадських робіт показало, що проактивне обслуговування може знизити рівень відмов обладнання на 30%. Основні витрати на обслуговування включають регулярне очищення сонячних панелей, перевірку з'єднань, калібрування датчиків та періодичну заміну акумуляторних батарей. Структура витрат на обслуговування протягом 20-річного періоду експлуатації розподіляється наступним чином: заміна акумуляторів складає 40 – 50% від загальних витрат на обслуговування, профілактичні роботи та очищення панелей – 25 – 30%, заміна світлодіодних модулів – 15 – 20%, ремонт контролерів та електронних компонентів – 10 – 15% [5].

Дослідження надійності автономних систем освітлення з використанням розподілу Вейбулла для прогнозування ймовірності відмов показало, що правильно спроектовані системи можуть забезпечувати коефіцієнт готовності понад 95% протягом першого десятиріччя експлуатації [2]. Основними причинами відмов є деградація акумуляторних батарей (60% відмов), несправності контролерів заряду (25% відмов) та механічні пошкодження (15% відмов).

Економічна ефективність автономних систем освітлення пішохідних переходів визначається співвідношенням капітальних інвестицій, експлуатаційних витрат та отриманих вигод протягом життєвого циклу обладнання. Комплексний економічний аналіз включає оцінку прямих витрат на впровадження та експлуатацію, а також непрямих економічних ефектів від підвищення безпеки дорожнього руху.

Аналіз структури капітальних витрат на впровадження автономної системи освітлення одного пішохідного переходу показує, що найбільшу частку становлять літій-іонні акумулятори ємністю 1,5 кВт·год вартістю 45 000 грн., що складає 30% від загальної суми інвестицій. Значними статтями витрат також є LED-світильники потужністю 2×50 Вт з адаптивним управлінням (25 000 грн.), монтажні та пусконаладжувальні роботи (25 000 грн.) та опорні конструкції з монтажними матеріалами (22 000 грн.). Контролер заряду MPPT та система управління коштують 18 000 грн., а фотоелектричні модулі потужністю 150 Вт – 15 000 грн. Таким чином, загальні капітальні витрати на автономну систему становлять 150 000 грн.

Традиційна система освітлення з підключенням до централізованої мережі потребує менших початкових інвестицій – 125 000 грн. Основну частину витрат становить прокладання кабельної лінії довжиною 200 метрів, що обходиться в 80 000 грн. або 64% від загальної суми.

Решта коштів розподіляється між монтажними роботами (18 000 грн.), підключенням до мережі з організацією обліку електроенергії (15 000 грн.) та придбанням двох натрієвих світильників потужністю по 150 Вт кожен загальною вартістю 12 000 грн.

Простий термін окупності додаткових інвестицій становить 2,9 року, що розраховується як відношення різниці капітальних витрат (25 000 грн.) до річної економії експлуатаційних витрат. Однак для повної оцінки економічної ефективності необхідно враховувати весь життєвий цикл системи, включаючи заміну акумуляторів через 4 роки експлуатації вартістю 45 000 грн.

Крім прямих економічних вигод, впровадження автономного освітлення забезпечує зниження аварійності на пішохідних переходах на 30 – 40%, що дозволяє уникнути значних соціальних та економічних втрат від дорожньо-транспортних пригод. Екологічний ефект полягає у зменшенні викидів CO₂ на 2,1 тонни щорічно, враховуючи структуру генерації електроенергії в Україні. Додатковою перевагою є повна незалежність від аварійних відключень централізованого електропостачання, що особливо актуально в умовах нестабільності енергосистеми.

Висновки

Освітлення пішохідних переходів є одним із факторів забезпечення безпеки дорожнього руху в темну пору доби та визначає умови видимості пішоходів для водіїв транспортних засобів. Стан освітлювальних систем пішохідних переходів у містах України потребує дослідження з урахуванням нормативно-технічної бази, проблем експлуатації та впливу на показники аварійності.

Література

1. Tomczuk K., Tomczuk P., Chrzanowicz M. Exploring the Feasibility of Autonomous Lighting Systems for Pedestrian Crossings in Off-Grid Areas. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 7. 3054. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14073054>.
2. Orejon-Sanchez R. D., Andres-Diaz J. R., Gago-Calderon A. Autonomous Photovoltaic LED Urban Street Lighting: Technical, Economic, and Social Viability Analysis Based on a Case Study. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 21. 11746. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132111746>.
3. L70 LED Lifetime Rating and Lumen Depreciation : веб-сайт. URL: <https://www.accessfixtures.com/led-lifetime-170/> (дата звернення: 05.02.2026).
4. How long do solar panels last? : веб-сайт. URL: <https://www.energysage.com/solar/how-long-do-solar-panels-last/> (дата звернення: 05.02.2026).
5. Sustainable Real Estate: From Solar to Zero Energy : веб-сайт. URL: <https://www.dot-guide.org/articles/sustainable-real-estate-from-solar-to-zero-energy.html> (дата звернення: 05.02.2026).

УДК 640.4:620.9:502.131.1

ІНТЕГРАЦІЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ГОТЕЛЬНОМУ СЕКТОРІ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Чернихівська Анна Володимирівна, кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри туризму та готельно-ресторанного бізнесу,
Київський національний університет технологій та дизайну,
e-mail: rus-an@ukr.net, ORCID ID 0000-0001-9642-8471

Інтеграція альтернативних джерел енергії та енергозберігаючих технологій у готельному секторі в контексті сталого розвитку є об'єктивно зумовленою трансформацією, що виникає на перетині економічної доцільності, екологічної відповідальності та стратегічного управління ресурсами.

Додатково слід наголосити, що така трансформація не є фрагментарним технічним оновленням окремих інженерних систем, а передбачає глибоку структурну модернізацію бізнес-моделі готельного підприємства. Йдеться про перехід від екстенсивного споживання ресурсів до інноваційно-орієнтованої моделі управління енергією, в якій пріоритет надається превентивному плануванню, цифровому моніторингу та оптимізації енергетичних потоків. У цьому контексті альтернативні джерела енергії та енергозберігаючі технології виступають не лише інструментами скорочення витрат, а складовими стратегічної політики декарбонізації, підвищення інвестиційної привабливості та формування довгострокової конкурентоспроможності готельного сектору [1].

Готельне господарство належить до видів діяльності з підвищеним рівнем енергоспоживання, оскільки безперервність сервісного процесу потребує цілодобового функціонування інженерних систем, штучного освітлення, вентиляції, кондиціонування повітря, приготування їжі, підігріву води та обслуговування номерного фонду. У структурі операційних витрат готельних підприємств енергоресурси займають вагомую частку, що в умовах зростання тарифів та нестабільності енергопостачання істотно впливає на фінансову стійкість бізнесу. Водночас сучасні екологічні стандарти та очікування споживачів формують нові вимоги до якості управління ресурсами, перетворюючи енергоефективність із додаткової опції на стратегічний імператив розвитку [1, 2].

Сталий розвиток готельного сектору передбачає збалансування економічних результатів із мінімізацією негативного впливу на довкілля та формуванням соціальної цінності. У цьому контексті альтернативні джерела енергії виступають інструментом структурної модернізації енергетичної моделі підприємства. Йдеться не лише про заміщення традиційних викопних ресурсів відновлюваними, а про системну перебудову принципів енергоспоживання, що охоплює етапи генерації, розподілу, накопичення та моніторингу енергії. Сонячні фотоелектричні системи, теплові насоси, біоенергетичні установки, геотермальні рішення та технології рекуперації тепла формують основу нової

енергетичної інфраструктури готелю. Їх упровадження дає змогу скоротити залежність від централізованих мереж, зменшити вуглецевий слід підприємства та підвищити автономність у кризових умовах (табл. 1) [3, 4].

Таблиця 1 – Альтернативні джерела енергії в готельному секторі

Вид джерела енергії	Технологічна основа	Сфера застосування в готелі	Орієнтовний рівень економії енергії	Стратегічний ефект для підприємства
Сонячні фото-електричні панелі	Перетворення сонячного випромінювання на електроенергію	Освітлення, робота інженерних систем, часткове покриття пікового навантаження	15–35% електроспоживання	Зменшення залежності від мереж, підвищення енергоавтономності
Сонячні колектори	Нагрівання теплоносія за рахунок сонячної енергії	Гаряче водопостачання, СПА-зони, пральні	40–70% витрат на підігрів води	Скорочення витрат на тепло, екологічна привабливість
Теплові насоси (повітря–вода, ґрунт–вода)	Використання низькопотенційного тепла довкілля	Опалення, охолодження, ГВП	30–50% у порівнянні з традиційними системами	Декарбонізація, довгострокова економія
Біомасові котли	Спалювання органічної сировини	Автономне теплопостачання	20–40% зниження витрат на паливо	Локальна енергонезалежність

Разом із тим ефективність альтернативної енергетики безпосередньо залежить від рівня загальної енергоефективності будівлі. Тому інтеграція відновлюваних джерел має супроводжуватися впровадженням енергозберігаючих технологій, спрямованих на оптимізацію споживання.

Сучасні готельні комплекси дедалі активніше використовують LED-освітлення з автоматизованими датчиками руху, інтелектуальні системи керування кліматом, багатофункціональні віконні конструкції з високим коефіцієнтом теплоізоляції, а також цифрові платформи управління будівлею.

Автоматизація процесів дозволяє регулювати температурні режими залежно від заповненості номерного фонду, що суттєво знижує непродуктивні витрати. Важливо, що такі рішення не знижують рівня комфорту гостей, а навпаки, підвищують його завдяки персоналізації середовища перебування.

Інноваційні системи, такі як BMS, рекуперація тепла та інтелектуальні термостати, дозволяють не лише оптимізувати енергетичні потоки, а й інтегрувати управління всіма інженерними системами в єдину цифрову платформу. Це створює умови для персоналізації сервісу, підвищення комфорту гостей та забезпечення комплексного контролю за енергоефективністю. Таким

чином, поєднання різних рівнів технологій – від базових до високотехнологічних – формує системний підхід до енергоменеджменту, який одночасно забезпечує економічну, екологічну та репутаційну вигоду для готельного підприємства (табл. 2) [1–4].

Таблиця 2 – Енергозберігаючі технології в готельному секторі

Технологія	Функціональне призначення	Ефект зниження споживання	Інвестиційна складність	Додатковий нематеріальний ефект
LED-освітлення з датчиками руху	Оптимізація освітлення номерів і коридорів	50–80% електроенергії на освітлення	Низька	Підвищення енергоефективного іміджу
BMS (Building Management System)	Автоматизоване управління всіма інженерними системами	15–30% загального енергоспоживання	Середня/висока	Цифровізація управління
Рекуперація тепла	Повернення тепла вентиляційних потоків	20–40% теплової енергії	Середня	Підвищення комфорту гостей
Інтелектуальні термостати	Регулювання температури залежно від присутності гостей	10–25% опалення	Низька	Персоналізація сервісу
Водозберігаючі аератори та сенсорні системи	Оптимізація споживання води	15–30% водоспоживання	Низька	Формування культури відповідального споживання

Економічний аспект інтеграції альтернативних джерел енергії пов'язаний із необхідністю значних початкових інвестицій, однак довгостроковий ефект проявляється у скороченні експлуатаційних витрат і зростанні вартості активу. У сучасних умовах інвестори дедалі частіше враховують екологічні критерії при оцінюванні ризиків, а фінансові установи пропонують спеціалізовані програми «зеленого» кредитування. Таким чином, енергетична модернізація стає елементом фінансової стратегії готелю. Крім безпосередньої економії ресурсів, підприємство отримує репутаційні переваги, що позитивно впливають на попит з боку екологічно свідомих туристів і корпоративних клієнтів.

Особливого значення набуває питання управління процесом енергетичної трансформації. Інтеграція альтернативних джерел енергії не може розглядатися як одноразовий технічний захід; вона потребує системного підходу, що включає проведення комплексного енергоаудиту, розроблення довгострокової стратегії та впровадження механізмів постійного моніторингу.

Соціально-екологічний вимір інтеграції альтернативної енергетики проявляється у зменшенні обсягів викидів парникових газів та формуванні культури відповідального споживання. Готель як відкритий соціальний простір впливає на поведінкові моделі гостей, демонструючи приклад раціонального використання ресурсів. Інформаційні кампанії щодо повторного використання рушників, роздільного збору відходів і свідомого споживання енергії стають частиною комунікаційної стратегії закладу. Таким чином, енергетична модернізація має не лише технічний, а й освітній ефект, сприяючи поширенню принципів сталого розвитку в суспільстві.

В умовах посткризового відновлення економіки та підвищених ризиків енергетичної нестабільності автономізація готельної інфраструктури набуває особливої актуальності. Децентралізовані системи генерації дозволяють мінімізувати вплив перебоїв електропостачання на якість сервісу, що є критично важливим для збереження конкурентоспроможності. Поєднання сонячних панелей із накопичувальними батареями, впровадження теплових насосів та систем рекуперації тепла створюють комплексну енергетичну екосистему підприємства, здатну адаптуватися до змін зовнішнього середовища.

Висновки

Узагальнюючи, слід зазначити, що інтеграція альтернативних джерел енергії та енергозберігаючих технологій у готельному секторі є багатовимірним процесом, який охоплює технічні, економічні, управлінські та соціальні аспекти. Її результатом стає формування нової моделі функціонування підприємства, орієнтованої на довгострокову ефективність і відповідальність перед довкіллям. Енергетична трансформація готельного бізнесу виступає не лише відповіддю на виклики сучасності, а стратегічною передумовою сталого розвитку галузі в умовах глобальних змін. Реалізація такого підходу потребує поєднання інноваційних технологій, професійного енергоменеджменту та усвідомленої позиції власників і споживачів, що в сукупності формує підґрунтя для переходу до кліматично нейтральної та економічно стійкої моделі готельного господарства.

Література

1. **Energy Community Secretariat.** National Energy and Climate Plan of Ukraine 2025–2030. Vienna : Energy Community Secretariat, 2024. URL: https://www.energy-community.org/dam/jcr:9d144283-08ed-410b-a670-7fd15c7782f2/1_NECP_EnMachineTranslation.pdf (дата звернення: 02.05.2026).
2. **World Bank et al.** Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4). Washington, DC : World Bank, 2025. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099022025114040022/pdf/P180174-ca39eccd-ca67-4bd8-b537-ff73a675a0a8.pdf> (дата звернення: 04.03.2026).
3. **Sarmiento A. et al.** Improved Energy Management in the Hotel Industry, Energy Key Performance Indicators, Benchmarking and Taxonomy Methodology. *Energies*. 2025. Vol. 18 (16). DOI: <https://doi.org/10.3390/en18164277>.
4. **Font X., Elgammal I., Bonilla-Priego M. J.** Investigating hotel sustainability “from the top”: insights from hotel marketing consortia managers and sustainability. *Journal of Sustainable Tourism*. 2024. Vol. 32, no. 5. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1080/09669582.2023.2210014>.

УДК 62-6.62-62

ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОВОЇ ПІДГОТОВКИ

Погорлецький Дмитро Сергійович, канд. техн. наук, доцент каф. ЕСЕУ, Херсонська державна морська академія, e-mail: dimon150582@gmail.com, ORCID ID 0000-0002-1256-8053

Грицук Ігор Валерійович, док. техн. наук, професор каф. АТГМ, Національний університет "Чернігівська політехніка", e-mail: grytsuk_iv@ukr.net, ORCID ID 0000-0001-7065-6820

Худяков Ігор Валентинович, канд. техн. наук, доцент каф. ЕСЕУ, Херсонська державна морська академія, e-mail: Igor.khudiakov563@gmail.com, ORCID ID 0000-0002-8900-7879

Метою даної роботи є дослідження екологічних показників транспортних засобів (ТЗ), двигуни яких переобладнані для роботи на газовому паливі та оснащені системою теплової підготовки на основі теплового акумулятора фазового переходу в умовах експлуатації.

Результати моніторингу параметрів технічного стану ТЗ у процесах дослідження передпускового та післяпускового прогріву ТЗ в умовах експлуатації приведені в роботі [1-3]. Реєстрація технічних параметрів ТЗ під час роботи на зрідженому газовому паливі проводиться аналогічно вимірюванням на нафтовому паливі (бензин). Звіти двох складових системи моніторингу ТЗ KIA CEE'D 2.0 5MT2, які входять до єдиної системи дистанційного моніторингу параметрів технічного стану двигуна ТЗ під час експлуатації і підсумковий звіт після розшифрування отриманої інформації, з системи моніторингу на основі лінії стандарту OBD-II, адаптер (сканер ELM327) приведені в [2-6].

На (рис. 1) продемонстровано витрати нафтового палива (бензин) в залежності від режиму теплової підготовки двигуна ТЗ, змінної температури оточуючого середовища (ОС), до досягнення температури охолоджувальної рідини двигуна ТЗ 50 °С у різних режимах прогріву. Найменша витрата палива спостерігалася під час прогріву ТЗ до температури охолоджувальної рідини 50 °С в режимі прогрів зупиненого ТЗ у режимі х.х. Робити висновок про найкращий варіант теплової підготовки двигуна ТЗ зарано. Цікавим було б отримати данні по викидам шкідливих речовин у відпрацьованих газах (ВГ) двигуна ТЗ в оточуюче середовище. Особливістю системи моніторингу ТЗ [3], є здатність показувати значення викидів шкідливих речовин у ВГ, тільки під час руху ТЗ, при зупиненому ТЗ отримувати ці значення неможливо. На нашу думку потрібно оцінити прогрів ТЗ згідно часу теплової підготовки, наявності пробігу ТЗ та викидів шкідливих речовин.

Методика проведення досліджень для визначення витрати палива, терміну прогріву двигуна ТЗ і викидів шкідливих речовин у ВГ двигуна ТЗ

містить фіксацію процесів теплової підготовки двигуна ТЗ, в змінних умовах експлуатації за варіантами режимів прогріву ТЗ приведена в [2-4]. Вимірювання параметрів технічного стану ТЗ, а також температурних параметрів системи охолодження двигуна ТЗ, виконувались з допомогою розробленої системи дистанційного моніторингу (СДМ) [1-5]. Під час проведення експериментальних досліджень ставилося завдання визначення витрати палива (бензин, газ) та кількості шкідливих речовин у викидах ВГ в оточуюче середовище під час використання системи теплової підготовки (СТП) на основі теплового акумулятору фазового переходу (ТАФП).

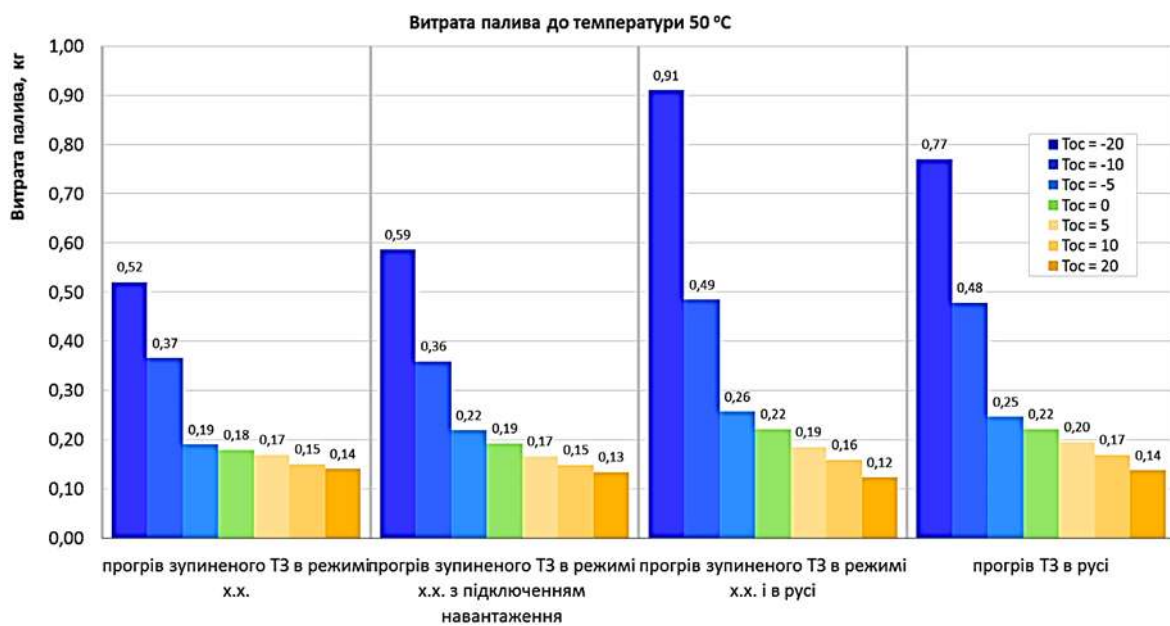


Рисунок 1 – Результати витрати палива (бензин) від значень температури оточуючого середовища до температури системи охолодження 50 °С, у різних режимах прогріву ТЗ

Експериментальні дослідження для визначення екологічних показників ТЗ, переобладнаних для роботи на газовому паливі, оснащених СТП на основі ТАФП, проводились у випробувальному центрі колісних транспортних засобів ДП «ДержавтотрансНДІпроект» («Лабораторія дослідження використання палив та екології»), згідно New European Driving Cycle (NEDC), (URL: <https://www.transportpolicy.net/standard/eu-light-duty-new-european-driving-cycle>) Дослідження проводили з використанням ТЗ KIA Ceed 2.0 5МКПП із двигуном G4GC, обладнаним системою живлення на зрідженому газовому паливі та СТП із ТАФП. Випробування автомобіля KIA Ceed 2.0 у ДП «ДержавтотрансНДІпроект» проводилися на роликовому стенді з імітацією режимів Європейського міського їздового циклу [1-5]. На (рис. 2) показані окремі результати експериментального дослідження, проведеного у випробувальному центрі колісних транспортних засобів ДП «ДержавтотрансНДІпроект», які були отримані за змодельованим Європейським міським їздовим циклом для ТЗ KIA CEE'D 2.0 5MT2 на бігових барабанах.

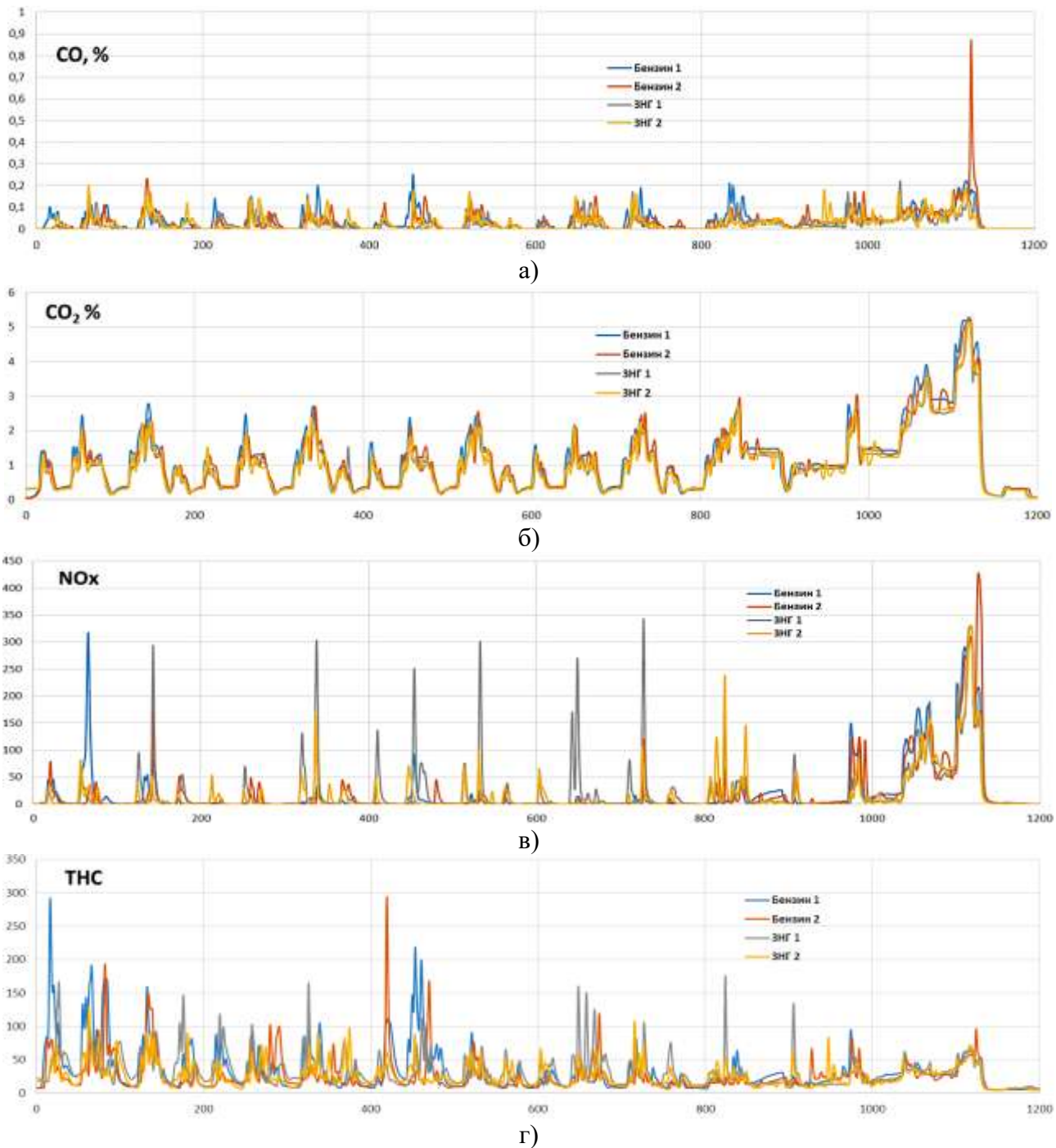


Рисунок 2 – Результати експериментального дослідження ТЗ KIA CEE'D 2.0 5MT2, переобладнаного для роботи на газовому паливі: а) викиди CO; б) викиди вуглекислого газу CO₂; в) викиди оксидів азоту; г) загальна кількість вуглеводнів

Були отримані зміни значення в широкому діапазоні параметрів технічного стану ТЗ, на (рис.2) показані деякі з них, а саме викиди CO, концентрація викидів вуглекислого газу CO₂, викиди оксидів азоту NOx та загальна кількість вуглеводнів THC у викидах шкідливих речовин відпрацьованих газів двигуна ТЗ.

Під час досліджень на бігових барабанах експериментальним шляхом були отримані навантажувальні характеристики у широкому діапазоні частот

обертання колінчастого валу двигуна ТЗ [5], вони були використані для опису поліноміальних залежностей, необхідних для визначення закономірностей зміни витрати палива та викидів шкідливих речовин при розрахунках на математичній моделі [2-5]. Деякі характеристики наведені на (рис. 3).

На (рис. 3) характеристики холостого ходу двигуна ТЗ, обладнаного СТП, яка працює на рідкому паливі (бензин) і на газовому (пропан–бутан). З отриманих залежностей можливо зробити висновок, що робота двигуна ТЗ з застосуванням СТП на газовому паливі зменшила концентрації оксиду вуглецю (СО), діоксиду вуглеводню (CO_2) та дещо збільшила викиди оксидів азоту (NO_x), але тільки на початку роботи двигуна ТЗ, потім вони зменшуються.

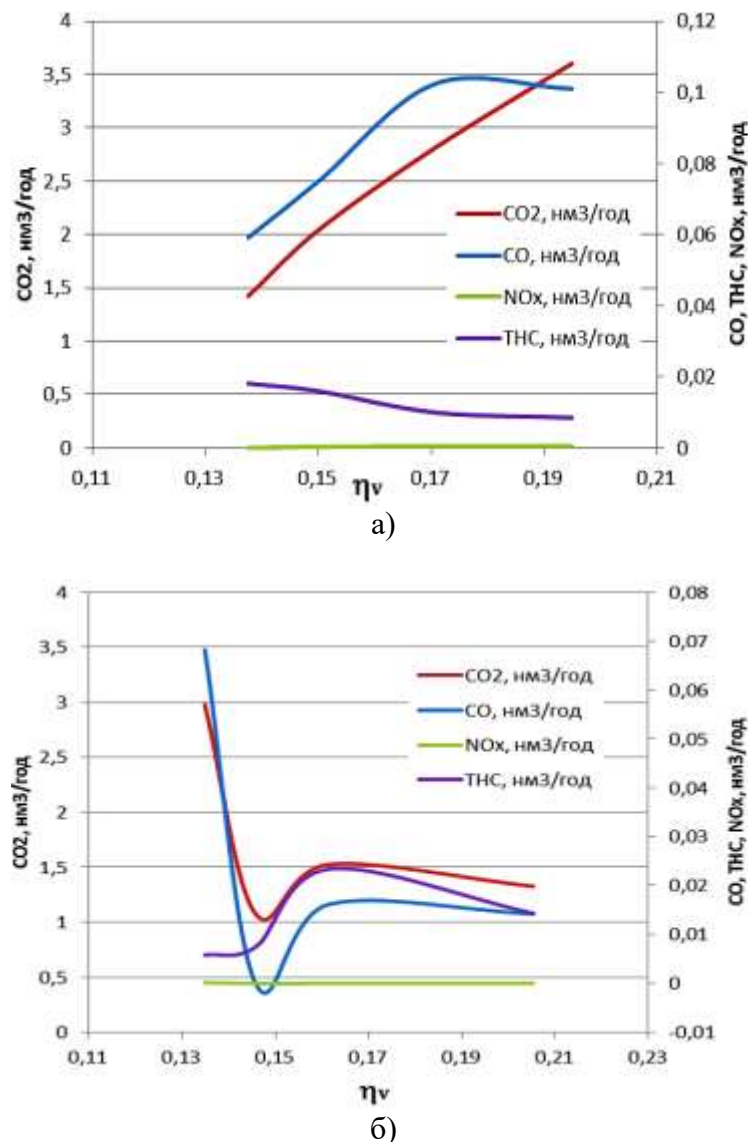


Рисунок 3 – Характеристика холостого ходу двигуна ТЗ, який працює на рідкому паливі (бензин) (а); газовому паливі (пропан–бутан) (б)

З характеристик, наведених на (рис.3), можливо зробити висновок, що застосування системи теплової підготовки дозволить під час роботи двигуна ТЗ на газовому паливі зменшити шкідливі викиди у відпрацьованих газах в

оточуюче середовище, це підтверджується зменшеними концентраціями вуглеводнів у відпрацьованих газах для малих навантажень. З представлених характеристик видно, що показники двигуна ТЗ, переобладнаного для роботи на газовому паливі, при використанні СТП кращі, а саме зменшилися концентрації шкідливих викидів.

Особливістю здійснення теплової підготовки двигуна ТЗ є те, що достатньо забезпечити теплову підготовку усієї охолоджуючої рідини в блоці циліндрів двигуна ТЗ, контурі дросельної заслінки, пічці (теплообмінник) салону ТЗ і газовому редукторі-випарнику. Цей підхід для забезпечення теплової підготовки формує рівномірний прогрів усіх елементів теплообміну та гарантує одразу після запуску двигуна переключення на подачу зрідженого газового палива. За рахунок цього відбувається економія бензину на прогрів двигуна та зменшення викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах ТЗ [1-6].

Висновки

У представлених результатах дослідження встановлено вплив системи теплової підготовки з тепловим акумулятором фазового переходу ТЗ з двигуном, переобладнаним для роботи на газовому паливі, на екологічні показники в процесах передпускового та післяпускового прогріву і продемонстровано можливості зменшення витрати палива двигуна ТЗ у межах від 62,8 до 33,1 %, в умовах експлуатації та зниження сумарних шкідливих викидів, зведених до рівня агресивності CO, на рідкому паливі 39 %, а на газовому – 20 % [2].

Література

1. **Волков В. П. та ін.** Особливості вимірювального комплексу для дослідження роботи газомоторного транспортного засобу з системою теплової підготовки в умовах експлуатації. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2018. № 13. С. 121–131.

2. **Грицук І. В. та ін.** Покращення показників паливної економічності та зниження викидів шкідливих речовин в оточуюче середовище транспортних засобів при використанні системи теплової підготовки. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали X-ої міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. (Вінниця, 14–15 квіт. 2022 р.). Вінниця : ВНТУ, 2022.

3. **Gritsuk I. et al.** Improving the Processes of Thermal Preparation of an Automobile Engine with Petrol and Gas Supply Systems (Vehicle Engine with Petrol and LPG Supplying Systems). *SAE Technical Paper 2020-01-2031*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.4271/2020-01-2031>.

4. **Погорлецький Д. С.** Структура вимірювального комплексу для дослідження роботи транспортного засобу з двигуном, обладнаним системою впорскування газового палива, в умовах експлуатації засобами ITS : монографія / за наук. ред. І. В. Грицука. Херсон : ХДМА, 2019. 442 с.

5. Перелік виробничих підрозділів ДП «ДержавтотрансНДПроект» : вебсайт / **Науково-виробнича лабораторія енергетики та екології транспорту**. URL: <https://www.insat.org.ua/phpfiles/otdel/> (дата звернення: 02.05.2026).

6. **Погорлецький Д. С. та ін.** Особливості визначення витрати палива та викидів шкідливих речовин двигунів транспортних засобів, що працюють на газовому паливі. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2021. № 1. С. 102.

УДК 656.07:504.3.054:620.9

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ФОРМУВАННЯ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ АСИМЕТРІЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУ: РОЛЬ ПІДХОДІВ TTW ТА WTW

Кириллова Олена Вікторівна, докт. техн. наук, професор,
завідувач кафедри «Управління портовою і сервісною діяльністю на водному транспорті», Одеський національний морський університет.
e-mail: kirillova18@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3414-7364>.

Кириллова Валерія Юріївна, канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,
Одеський національний морський університет.
e-mail: vk.onmu@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0738-0408>.

Вступ.

У контексті глобальної кліматичної політики та посилення вимог до декарбонізації транспортного сектору особливого значення набуває методологічно коректне оцінювання викидів парникових газів, яке забезпечує об'єктивну порівнюваність альтернативних енергетичних рішень [1].

Глобальні процеси декарбонізації транспортного сектору зумовлюють активний пошук альтернативних енергетичних рішень, зокрема використання зрідженого природного газу (LNG), електрифікації транспорту та гібридних енергетичних систем [2, 3].

Оцінювання кліматичної ефективності альтернативних енергетичних рішень в транспортних системах значною мірою залежить від методологічних підходів до обліку викидів парникових газів. Підхід Tank-to-Wheel (TTW), що враховує лише прямі викиди під час експлуатації транспортного засобу, не охоплює повний життєвий цикл енергії або палива і може викривлювати результати порівняння альтернативних транспортних технологій.

У цьому контексті особливої актуальності набуває застосування більш комплексного підходу Well-to-Wheel (WTW) [3, 4], який передбачає оцінювання викидів парникових газів на всіх етапах енергетичного ланцюга - від видобутку або виробництва енергоресурсів до кінцевого використання енергії транспортним засобом [5].

У цьому дослідженні обґрунтовується методологічний взаємозв'язок між системними межами оцінювання викидів парникових газів (TTW і WTW), забезпеченням кліматичної порівнюваності транспортних рішень та формуванням інвестиційної асиметрії декарбонізації.

Метою роботи є обґрунтування необхідності переходу від підходу TTW до WTW у процесі оцінювання кліматичної ефективності альтернативних енергетичних рішень у транспорті та визначення методологічних особливостей їх порівняння.

Наукова новизна дослідження полягає у формуванні концептуального взаємозв'язку між межами оцінювання викидів парникових газів (TTW та WTW), забезпеченням кліматичної порівнюваності транспортних рішень та виникненням явища інвестиційної асиметрії декарбонізації.

Методологічні підходи до оцінювання викидів у транспорті. Оцінювання викидів парникових газів у транспортному секторі здійснюється на основі різних методологічних підходів, які відрізняються межами системи та ступенем охоплення енергетичного ланцюга. Підхід Tank-to-Wheel враховує лише прямі викиди під час експлуатації транспортного засобу [4], тоді як при використанні електричної енергії або альтернативних видів палива значна частина викидів формується на попередніх етапах енергетичного ланцюга. Саме тому у сучасних дослідженнях застосовується підхід Well-to-Wheel, який охоплює весь енергетичний ланцюг [5]. WTW-підхід включає два основні етапи:

- Well-to-Tank (WTT) - оцінювання викидів, пов'язаних із видобутком, виробництвом і транспортуванням палива або енергії;
- Tank-to-Wheel (TTW) - оцінювання викидів, що виникають під час безпосередньої експлуатації транспортного засобу.

Сукупний ефект цих складових формує повний показник викидів Well-to-Wheel [5].

Незважаючи на широке використання підходів TTW та WTW у дослідженнях декарбонізації транспорту, у багатьох випадках вони розглядаються переважно як технічні методи оцінювання викидів, без належного аналізу їхнього впливу на формування інвестиційних рішень у сфері енергетичної трансформації транспорту. Водночас вибір меж системи оцінювання (TTW або WTW) може суттєво впливати на результати порівняння альтернативних енергетичних технологій. Це створює ризик методологічних викривлень у процесі прийняття стратегічних рішень щодо декарбонізації транспортних систем. З огляду на збереження високої частки транспортного сектору у викидах у країнах Європи, вимога методологічної порівнюваності оцінок стає практично значущою при формуванні політик і інвестиційних програм.

Формалізація оцінювання. У загальному вигляді сумарні викиди парникових газів за підходом Well-to-Wheel можуть бути представлені як:

$$E_{WTW} = E_{WTT} + E_{TTW} \quad (1)$$

де E_{WTW} - сумарні викиди парникових газів у межах повного енергетичного ланцюга;

E_{WTT} - викиди на етапах видобутку, виробництва та транспортування енергоресурсів;

E_{TTW} - викиди під час безпосередньої експлуатації транспортного засобу.

Для забезпечення порівнюваності транспортних рішень доцільно використовувати показник питомих викидів, нормований на транспортну роботу:

$$I_{WTW} = \frac{E_{WTW}}{Q \cdot L} \quad (2)$$

де I_{WTW} - інтенсивність викидів парникових газів,
 Q - маса вантажу,
 L - відстань перевезення.

Показник I_{WTW} може розглядатися як інтегральний індикатор кліматичної ефективності транспортної технології, що дозволяє здійснювати порівняльне оцінювання альтернативних енергетичних рішень на основі єдиних системних меж аналізу.

У випадку використання електричної енергії величина викидів визначається залежністю:

$$E_{WTT}^{el} = W_{el} \cdot EF_{grid} \quad (3)$$

де W_{el} - спожита електрична енергія,
 EF_{grid} - фактор викидів електроенергетичної системи.

Для LNG повноциклові викиди додатково включають метанову складову, пов'язану з явищем methane slip. У межах дослідження LNG розглядається як окремий підтип паливних енергетичних рішень, для якого:

$$E_{WTW}^{LNG} = E_{WTT}^{LNG} + E_{TTW}^{LNG} + E_{slip}^{LNG} \quad (4)$$

де E_{WTW}^{LNG} - сумарні повноциклові викиди парникових газів для LNG-рішення;

E_{WTT}^{LNG} - викиди на етапах видобутку, виробництва та транспортування LNG;

E_{TTW}^{LNG} - викиди під час експлуатації двигуна на LNG;

E_{slip}^{LNG} - метанова складова повноциклових викидів у CO₂-еквіваленті:

$$E_{slip}^{LNG} = m_{CH_4} \cdot GWP_{CH_4} \quad (5)$$

де GWP_{CH_4} - глобальний потенціал потепління метану;

m_{CH_4} - маса незгорілого метану у вихлопних газах, що визначається через енергоспоживання транспортного засобу FC та питомий коефіцієнт methane slip $EF_{slip}^{CH_4}$:

$$m_{CH_4} = FC \cdot EF_{slip}^{CH_4} \quad (6)$$

Запропонована формалізація дозволяє врахувати специфічні особливості LNG-технологій у межах підходу Well-to-Wheel та забезпечити методологічно коректне порівняння альтернативних енергетичних рішень у транспортних системах і технологіях.

Особливості оцінювання альтернативних енергетичних рішень.

Порівняння альтернативних транспортних енергетичних систем, зокрема LNG-технологій та електрифікації транспорту, демонструє значну залежність результатів оцінювання від обраної методології. У разі використання підходу TTW електричний транспорт практично не генерує прямих викидів парникових газів. Водночас у разі застосування підходу WTW до розрахунку включаються також викиди, пов'язані з виробництвом електроенергії, структура яких значною мірою залежить від енергетичного балансу країни. Аналогічно, застосування зрідженого природного газу як альтернативного палива дозволяє знизити викиди окремих забруднювачів у процесі експлуатації двигуна. Проте повна оцінка кліматичного ефекту потребує врахування всього ланцюга постачання палива. Таким чином, використання лише підходу TTW може формувати викривлене уявлення про екологічну ефективність альтернативних транспортних технологій.

Методологічна проблема кліматичної порівнюваності. Однією з ключових проблем у сфері екологізації транспортних систем є забезпечення методологічно коректної кліматичної порівнюваності альтернативних транспортних рішень. Кліматичну порівнюваність транспортних рішень доцільно розглядати як методологічну можливість коректного зіставлення альтернативних транспортних технологій на основі єдиних системних меж оцінювання викидів парникових газів та узгоджених принципів обліку повного енергетичного ланцюга. Порушення принципу такої порівнюваності може призводити до методологічних викривлень у процесі формування інвестиційних рішень у сфері декарбонізації транспорту. Застосування різних підходів до обліку викидів може формувати різні висновки щодо доцільності впровадження альтернативних енергетичних рішень у транспортних системах і технологіях. У цьому контексті застосування підходу Well-to-Wheel дозволяє забезпечити більш об'єктивну оцінку кліматичного впливу транспортних енергетичних рішень.

Інвестиційна асиметрія декарбонізації. Використання неповних методологічних підходів до оцінювання викидів може формувати явище, яке в межах цього дослідження пропонується визначати як *інвестиційну асиметрію декарбонізації (investment asymmetry of decarbonization)*. Під інвестиційною асиметрією декарбонізації доцільно розуміти ситуацію, за якої інвестиційні рішення щодо впровадження альтернативних транспортних технологій формуються на основі методологічно обмежених оцінок їхнього кліматичного впливу. У результаті окремі енергетичні рішення можуть отримувати необґрунтовані інвестиційні преференції, тоді як інші - недооцінюватися. Застосування підходу Well-to-Wheel дозволяє знизити ризики виникнення такої асиметрії та забезпечити більш збалансований розвиток альтернативних енергетичних рішень у транспортному секторі.

Таким чином, у дослідженні формується концептуальний взаємозв'язок між методологічними межами оцінювання викидів парникових газів (TTW і WTW), забезпеченням кліматичної порівнюваності альтернативних транспортних рішень та можливим виникненням інвестиційної асиметрії декарбонізації.

Такий взаємозв'язок дозволяє розглядати методологію оцінювання викидів як один із ключових чинників формування інвестиційних рішень у процесі енергетичної трансформації транспортного сектору.

Висновки

1. Декарбонізація транспортного сектору потребує застосування комплексних методологічних підходів до оцінювання кліматичного впливу альтернативних енергетичних систем [1-5].

2. Використання підходу Tank-to-Wheel не дозволяє повною мірою оцінити екологічні наслідки впровадження альтернативних транспортних технологій [4].

3. Підхід Well-to-Wheel забезпечує більш комплексне оцінювання викидів парникових газів, оскільки враховує весь енергетичний ланцюг [5].

4. Перехід до підходу WTW є необхідною умовою забезпечення методологічно коректної кліматичної порівнюваності альтернативних транспортних рішень та обґрунтованості інвестиційних рішень у сфері декарбонізації транспорту [5].

5. Некоректне визначення системних меж оцінювання викидів парникових газів може призводити до викривлення результатів кліматичної оцінки та, відповідно, до неефективних інвестиційних рішень у процесі декарбонізації транспортних систем.

6. У роботі обґрунтовано концептуальний взаємозв'язок між методологічними межами оцінювання викидів парникових газів (TTW та WTW), забезпеченням кліматичної порівнюваності транспортних рішень та формуванням інвестиційної асиметрії декарбонізації.

7. У роботі запропоновано використовувати поняття *інвестиційної асиметрії декарбонізації* (*investment asymmetry of decarbonization*), яке характеризує вплив методологічних меж оцінювання викидів парникових газів (зокрема підходів TTW та WTW) на формування інвестиційних рішень у сфері енергетичної трансформації транспортних систем і технологій.

Література

1. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press, 2022. 2029 p.

2. Transport : (Web resource) / **International Energy Agency**. Paris : IEA. URL: <https://www.iea.org/topics/transport> (date of access: 05.03.2026).

3. Bicer Y., Dincer I. Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 3017–3029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.050>.

4. EN 16258:2012. Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers). Brussels : European Committee for Standardization (CEN), 2012. 101 p.

5. ISO 14083:2023. Greenhouse gases – Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations. Geneva : International Organization for Standardization, 2023. 132 p.

УДК 504.054:621.43:004.9

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ ТРАНСПОРТНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У ЩІЛЬНІЙ ЗАБУДОВІ

Романов Борис Миколайович, аспірант,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
e-mail: borys.romanov.sci@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9895-3018

На сучасному етапі розвитку урбаністики проблема «міського теплового острова» (Urban Heat Island – UHI) вимагає переходу від загального моніторингу до детального аналізу мікроклімату окремих локацій. Традиційні методики оцінювання термічного стану міст, що базуються на даних метеостанцій, мають низьку просторову роздільну здатність і не дозволяють об'єктивно оцінити навантаження у «вуличних каньйонах» – зонах щільної забудови, де антропогенні теплові викиди акумулюються найбільш інтенсивно.

Центральним антропогенним чинником локального нагріву в межах вулично-дорожньої мережі є транспортні енергетичні установки (ТЕУ). Аналіз існуючих досліджень показує, що двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) генерують значний потік відчутного тепла (sensible heat flux), який є первинним фактором термічного забруднення приземного шару повітря [1]. Ситуація посилюється в умовах заторів, де низька швидкість руху та перехідні режими роботи ТЕУ призводять до нелінійного зростання температури навколишнього середовища [2]. Крім того, ефективність розсіювання цієї енергії критично залежить від морфології забудови (комплексної просторової структури та фізичної форми міських об'єктів), яка в умовах щільних міських блоків створює умови для утримання тепла [3].

Для подолання обмежень статичних методів оцінювання в останні роки все частіше пропонується залучення концепції «цифрових двійників» (Digital Twins). Це дозволяє перейти від епізодичних замірів до створення динамічних моделей, що інтегрують дані про трафік, геометрію середовища та метеорологічні параметри в єдину систему моніторингу [4].

Метою даної роботи є аналіз та систематизація існуючих методик оцінювання теплового впливу ТЕУ, а також визначення перспективних напрямків використання сучасних інструментів цифрового моделювання для побудови високоточних моделей локального теплового забруднення у щільній забудові.

Аналіз параметрів та значень теплового впливу транспортного потоку

Для об'єктивного оцінювання теплового стану міського середовища необхідно насамперед проаналізувати структуру та фізичні параметри теплової енергії, що генерується транспортними засобами. Аналіз методичних підходів,

викладених у роботі Li C. et al. [1], дозволяє класифікувати тепловий викид ТЕУ як потік відчутного тепла (Q_f).

Автори базують свої розрахунки на енергетичному балансі, де загальна енергія палива розподіляється на корисну механічну роботу (25–35%) та теплові втрати. Останні включають теплоту відпрацьованих газів (30–35%), а також енергію, що відводиться через систему охолодження та конвекцію від корпусу двигуна (30–35%). Таким чином, сумарна частка теплових викидів у приземний шар повітря становить 60–75%, що є базовим параметром для сучасних моделей антропогенного навантаження.

Особливого значення в останніх дослідженнях набуває чинник динаміки трафіку. Як зазначають Lee J. та Berkelhammer M. [2], інтенсивність теплового впливу має нелінійну залежність від швидкості потоку. Їхній аналіз доводить, що в режимах заторів («stop-and-go») локальне теплове навантаження зростає найбільш критично. Зокрема, встановлено кореляцію, згідно з якою зниження середньої швидкості потоку на кожні 16 км/год (10 миль/год) призводить до збільшення інтенсивності теплового аномального впливу на $0,36^{\circ}\text{C}$.

Ці дані свідчать про те, що сучасна методика оцінювання повинна враховувати не лише сумарну кількість спаленого палива, а й питомий час перебування транспортних одиниць на конкретній ділянці вулиці, що дозволяє точніше розрахувати локальну акумуляцію тепла.

Аналіз морфології забудови як чинника акумуляції тепла

Ефективність розсіювання теплових викидів ТЕУ безпосередньо залежить від просторової структури міського середовища. Аналіз досліджень Shareef S. та Altan H. [3] вказує на те, що конфігурація міських блоків та параметри «вуличних каньйонів» є визначальними у формуванні локальних температурних аномалій. Ключовим показником у сучасних методиках оцінювання виступає співвідношення висоти будівель до ширини вулиці (H/W), яке безпосередньо корелює зі здатністю середовища до самоохолодження. При високих значеннях H/W , що є типовим для зон щільної багатопверхової забудови, виникає ефект термічної пастки, де тепло, що виділяється двигунами, утримується між фасадами будівель через обмежену природну конвекцію.

Додатковим критичним параметром, що використовується в новітніх методах аналізу, є коефіцієнт відкритості неба (Sky View Factor, SVF). Як зазначають Lachapelle J. A. et al. [5], впровадження мікромасштабних 3D-моделей, зокрема моделі TUF-Pedestrian (Temperature of Urban Facets – Pedestrian), дозволяє детально розрахувати вплив затінення та багаторазового відбиття теплового випромінювання. Ця модель базується на тривимірному моделюванні енергетичного балансу поверхонь (facets), що дає змогу врахувати не лише пряме нагрівання повітря від ТЕУ, а й вторинне теплове випромінювання від нагрітих штучних поверхонь (асфальту, стін), що акумулюють енергію в умовах обмеженої аерації.

Аналіз перспективних ІТ-інструментів для реалізації методики оцінювання

Для практичної реалізації сучасних методик оцінювання критичне значення має перехід від статичних розрахункових моделей до динамічних систем на базі концепції «цифрових двійників» (Digital Twins). Як зазначають Agüera-Pérez A. et al. [4], використання відкритих ІТ-платформ дозволяє інтегрувати різноманітні потоки даних – від інтенсивності трафіку до метеорологічних параметрів – у єдине обчислювальне середовище. Це забезпечує можливість оцінювання теплового стану в масштабі реального часу, що є необхідним для оперативного управління міською інфраструктурою.

Аналіз новітніх підходів у сфері машинного навчання [6] та обробки геопросторових даних [7] показує зміну парадигми: від суто фізичного моделювання до методів, що базуються на даних (data-driven models). Використання інтелектуальних алгоритмів (наприклад, регресійних моделей на базі ансамблів дерев) дозволяє будувати високоточні теплові карти, базуючись на великих масивах інформації про інтенсивність руху та структуру викидів ТЕУ без необхідності встановлення надмірної кількості фізичних сенсорів [6]. При цьому методики збору даних, описані в роботі Yan X. et al. [7], дозволяють використовувати API геопросторових сервісів для отримання похвилинної динаміки транспортних потоків, що значно підвищує роздільну здатність оцінювання.

Важливим елементом сучасних систем стає впровадження «пояснюваного штучного інтелекту» (Explainable AI, XAI). Згідно з дослідженнями Xu F. et al. [8], методи XAI дозволяють не лише прогнозувати значення температури, а й інтерпретувати внесок кожного окремого чинника – наприклад, вагу щільності забудови порівняно з інтенсивністю заторів – у формування конкретної теплової аномалії.

Це забезпечує прозорість методики оцінювання та дозволяє верифікувати отримані результати з точки зору фізики процесів.

Висновки

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що локальне теплове забруднення у «вуличних каньйонах» є результатом складної динамічної взаємодії множини факторів. Опрацьовані результати досліджень [1, 2, 3, 5] підтверджують, що теплові викиди ТЕУ, параметри швидкісного режиму та морфологія забудови діють не ізольовано, а як складна термічна система.

Теоретичне узагальнення свідчить, що впровадження новітніх технологій ІТ, зокрема концепції цифрових двійників [4] та інтелектуального аналізу геопросторових даних [7], сприяє якісно новому рівню аналізу цієї системи. Головною перевагою такого підходу є можливість не лише прогнозувати загальну температуру, а й виконувати кількісну оцінку внеску кожного окремого чинника – від інтенсивності теплового потоку двигунів до ступеня впливу затінення будівель. Використання методів пояснюваного штучного інтелекту

(ХАІ) [8] дозволяє декомпонувати загальну картину нагріву, виділяючи частку антропогенного тепла ТЕУ як один із ключових параметрів.

Результати аналізу окреслюють перспективні напрями розвитку методологій оцінювання міського мікроклімату, що базуються на інтеграції інтелектуальних систем аналізу даних. Такий підхід створює наукове підґрунтя для пошуку обґрунтованих способів мінімізації теплового навантаження та покращення екологічного стану територій із щільною забудовою.

Література

1. **Li C. et al.** Do Electric Vehicles Mitigate Urban Heat? The Case of a Tropical City. *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 10. 810342. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.810342>.
2. **Lee J., Berkelhammer M.** Evaluating the Influence of Traffic Congestion on Surface Urban Heat Island Intensity. *Geophysical Research Letters*. 2025. URL: https://jangholee.com/files/2025_LeeBerkelhammer_GRL.pdf (дата звернення: 04.03.2026).
3. **Shareef S., Altan H.** Urban Block Configuration and Microclimate: A Review of Design Strategies. *Buildings*. 2024. Vol. 14 (8). 2367. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14082367>.
4. **Agüera-Pérez A. et al.** An Open-Source Urban Digital Twin for Enhancing Outdoor Thermal Comfort in the City of Huelva (Spain). *Smart Cities*. 2023. Vol. 6 (5). P. 2533–2555. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities6050113>.
5. **Lachapelle J. A. et al.** A microscale three-dimensional model of urban outdoor thermal exposure (TUF-Pedestrian). *International Journal of Biometeorology*. 2023. Vol. 67. 105315. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02241-1>.
6. Machine Learning in Modeling Urban Heat Islands: A Data-Driven Approach for Kuala Lumpur. *ResearchGate Preprints*. 2025. URL: <https://www.researchgate.net/publication/388815276> (дата звернення: 04.03.2026).
7. **Yan X. et al.** High-Resolution Traffic Flow Prediction and Vehicle Emission Inventory Estimation for Chinese Cities Using Geo-Spatial Data of Jinan City, China. *Atmosphere*. 2025. Vol. 16 (10). 1213. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos16101213>.
8. **Xu F. et al.** Characterizing the Thermal Effects of Urban Morphology Through Unsupervised Clustering and Explainable AI. *Remote Sensing*. 2025. Vol. 17 (18). 3211. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs17183211>.

**Секція 11.
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ КОНСТРУКЦІЇ, МАТЕРІАЛИ
ТА ТЕХНОЛОГІЇ В БУДІВНИЦТВІ**

УДК 699.86:697.133:536.2

**ОСОБЛИВОСТІ «ТЕПЛОВИХ МІСТКІВ» ТА ІНЖЕНЕРНО-
КОНСТРУКТИВНІ МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ЇХ ВПЛИВУ НА
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ**

Кузнєцов Владислав Андрійович, бакалавр IV курсу,
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізький
національний університет, e-mail: kouznetsov595@gmail.com,
ORCID: 0009-0002-6152-4409

Пастухова Сусанна Валеріївна, старший викладач кафедри ПЦБ,
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізький
національний університет, e-mail: susannapastukhova@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-0853-5611

Станом на сьогодні, у зв'язку зі зношеністю житлового фонду України, зростанням вартості енергоресурсів, підвищеними вимогами до скорочення викидів парникових газів та гармонізацією з нормами ЄС питання покращення енергоефективності житлових будівель не втрачає своєї актуальності. Так, однією з ключових причин, яка зумовлює появу вище перелічених проблем є тепловтрати будівель, які формуються через наявність, так званих, «теплових містків», які досить негативно впливають на енергоефективність житлового фонду і, мінімізація впливу яких є досить важливим та актуальним аспектом під час робіт з будівництва, реконструкції або реновації (термомодернізації).

Так, технічний стан більшості існуючих житлових будівель та відповідних енергетичних систем не дозволяє забезпечити необхідний рівень енергетичних характеристик будівель, а питомі витрати енергії в Україні значно перевищують аналогічні показники більшості країн Європи (рис. 1). Наприклад, енерговитрати на опалення 1 м^2 загальної площі в Україні становлять 250-400 кВт-год/ м^2 у рік, тоді як у Німеччині – 180, у країнах Скандинавії – 150, а у будинках, споруджених із застосуванням теплозберігаючих технологій – 60-80 [1, с. 35].

З огляду цього, як вже зазначалося однією з основних причин тепловтрат у будівлі є «теплові містки» («містки холоду»), що являють собою невеликі ділянки в будь-якій частині будівлі, теплопровідність яких значно вища, ніж на решті площі конструкції [2], через які тепло з приміщення просочується назовні.

На рис. 2 представлено основні типи «теплових містків» (А), приклади місць, де вони утворюються (Б) та вплив, які вони чинять на стан будівлі та людини (В).

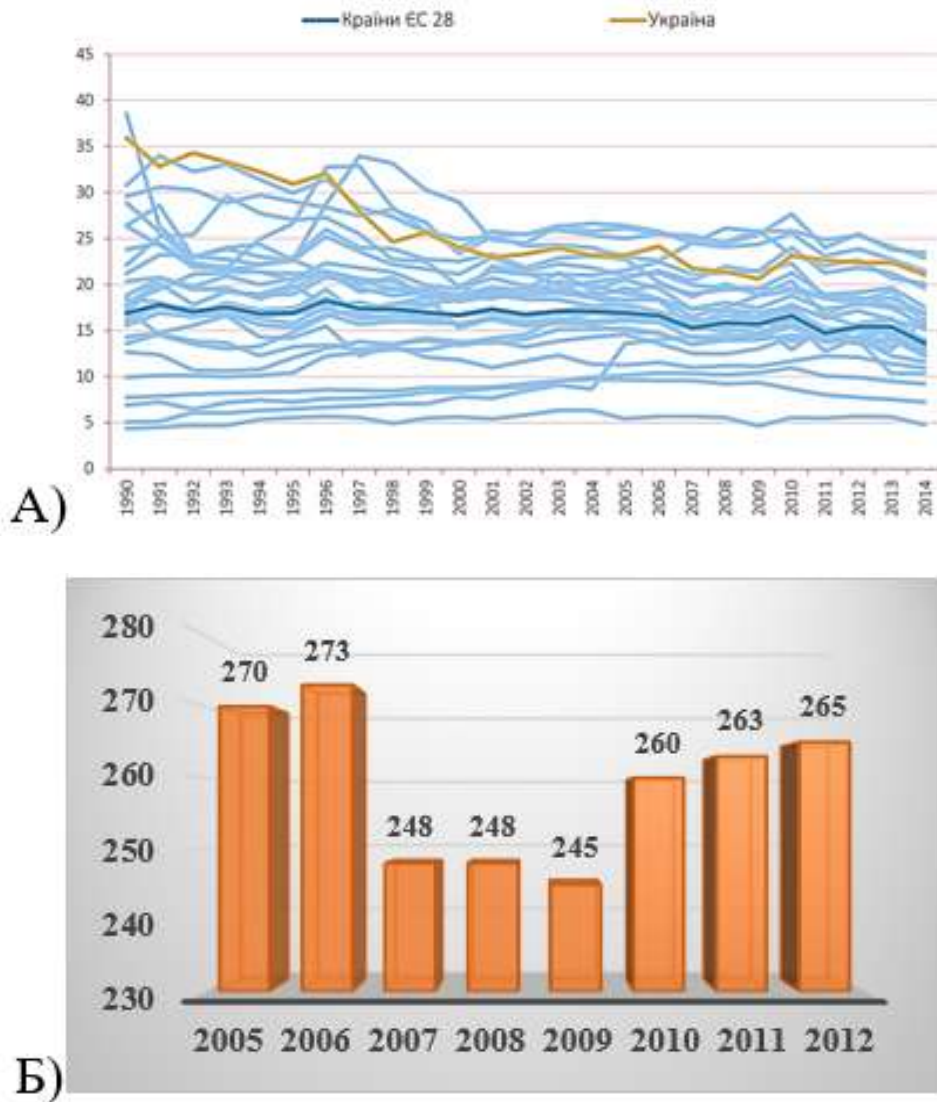


Рисунок 1 – Енерговитрати: А) Питоме споживання енергії побутовими споживачами, [кг н.е./м² заг. площі на рік] в Україні та країнах ЄС (1990-2014 рр.); Б) Питоме споживання енергії побутовими споживачами для опалення в Україні, [кВт-год/м² заг. площі на рік] в Україні (2005-2012 рр.)

У табл. 1 наведено приклади утворення «теплових містків» у характерних місцях відповідного типу житлової будівлі [3].

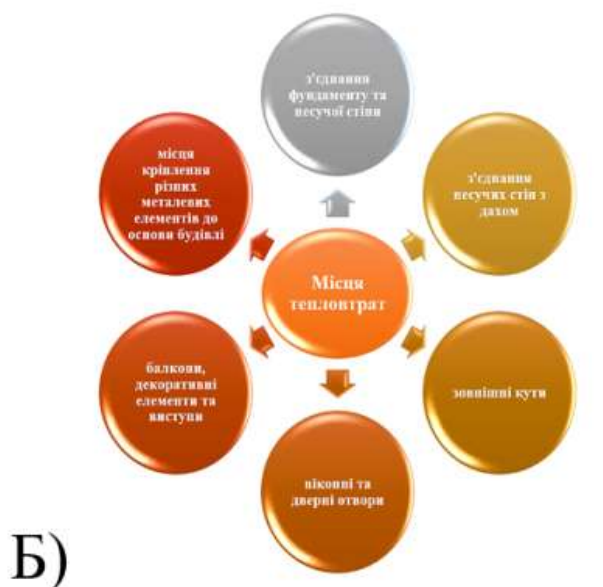
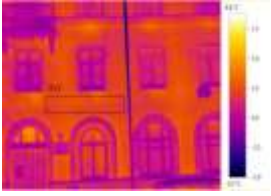
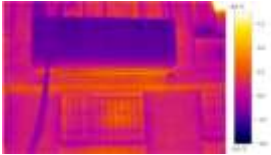

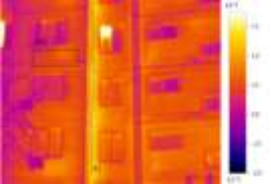
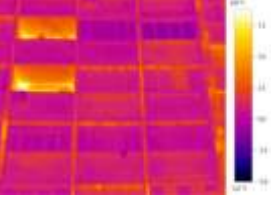
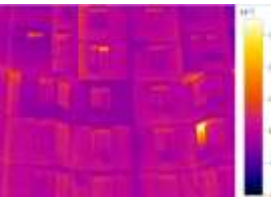

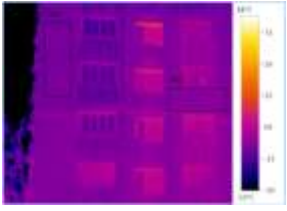


Рисунок 2 – Особливості «теплових містків»: А) Основні типи; Б) Місця найпоширеніших тепловтрат; В) Вплив на будівлю та людину

Таблиця 1 – Тепловтрати житлових будівель різного типу

№ п/п	Тип будівлі	Місця тепловтрат	Ілюстрація
1	«Сталінка» (1955 р.). Товщина стін з цегли 0,5 метра. 4 поверхи	Підвищені тепловтрати зарадіаторних ділянок стін (тепло від батарей, швидко виходить через стіни за ними)	
2	«Хрущовка» (1959 р.). Товщина стін з цегли 0,51 метра. 5 поверхів	Тепловтрати на виносі балконної плити та в зарадіаторних і міжвіконних зонах	
3	«Малосімейка» (1976 р.). Товщина стін з цегли 0,38...0,51 метра. 9 поверхів	Тепловтрати на стику стін з ґрунтом (неутеплені стіна I-го поверху або цоколь)	
4	«Панелька» (1997 р.). Проект серії 96. Товщина стін з керамзитобетонних панелей 0,35 метра, 9 поверхів	Утеплення відсутнє. Тепловтрати на стиках панелей та в зоні неопалюваного балкону	
5	«Панелька» (1998 р.). Проект серії КТ. Товщина стін з керамзитобетонної панелі лише 0,3 метра. 14 поверхів	Тепловтрати на стиках між панелями та в зонах незаскленних балконів	
6	Багатоповерхівка (2005 р.). Індивідуальний проект. Монолітно-каркасна, з цегли. Поверхів від 16 до 22	Хаотичне утеплення. Тепловтрати в зонах віконних прорізів та місцях примикання теплоізоляції	
7	Багатоповерхівка (2009 р.). Індивідуальний проект. Цегляна. 16 поверхів	Тепловтрати в зонах кріплення теплоізоляційних плит	

Продовження табл. 1

1	2	3	4
8	Багатоповерхівка (2017 р.). Індивідуальний проєкт. Монолітно-каркасна, з цегли. 26 поверхів	Утеплення мінеральною ватою. Часткові тепловтрати в зонах віконних прорізів	

Оскільки загальні температурні тепловтрати характеризуються коефіцієнтом теплопровідності, що складається з регулярних втрат усіх площ з їх регулярним коефіцієнтом теплопередачі та впливу «теплових містків» разом з коефіцієнтом точкового «теплового містка», то конструкцію без «теплових містків» можна визначити такою, в якій впливи, що забезпечуються «тепловими містками», менші або дорівнюють нулю (рис. 3) [4].

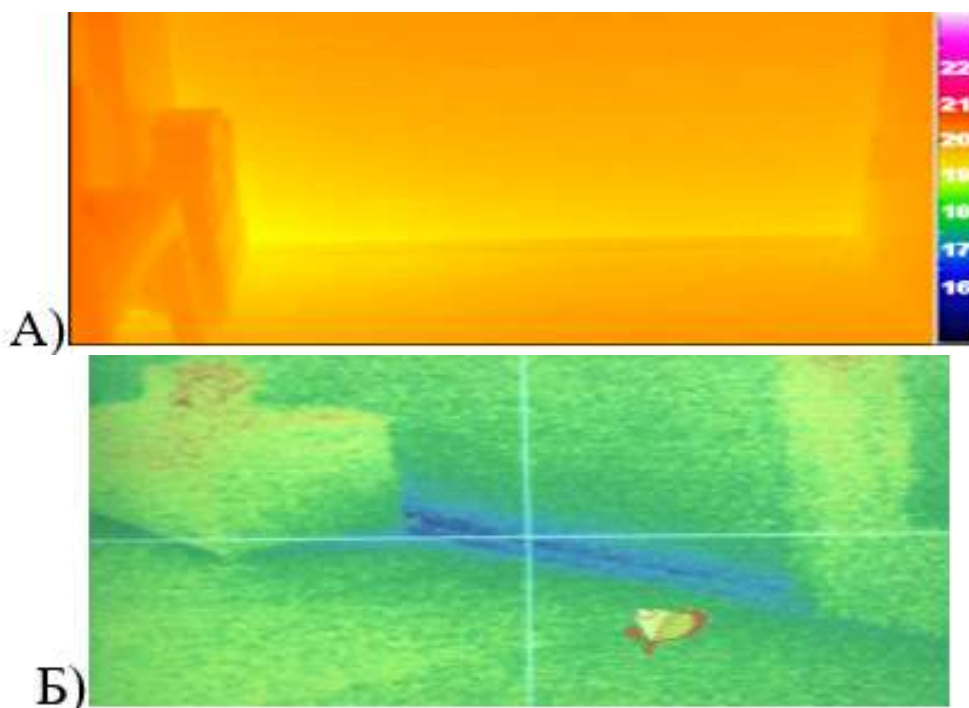


Рисунок 3 – Термографічне зображення зсередини, що показує відсутність «теплових містків»: А) Зовнішня стіна; Б) Примикання плінтуса до стіни

Для мінімізації впливу «теплових містків» на енергоефективність житлової будівлі слід впроваджувати відповідні інженерно-конструктивні методи [4; 5]:

- конструкційне проектування, що являє собою детальний розрахунок та структурне планування (наприклад, виконання теплотехнічних розрахунків або зведення будівель простої конфігурації (без складних елементів));

- вибір матеріалу, що передбачає підбір будівельних матеріалів з нижчою теплопровідністю для тих компонентів конструкцій, які можуть зумовлювати виникнення «містків тепла» (наприклад, суцільні конструкції з повнотілої цегли, пористих бетонних блоків, дерев'яні конструкції, конструкції з використанням елементів опалубки або збірних легких бетонних елементів);
- використання терморозривів, що включає використання спеціальних вкладишів з матеріалів з низьким коефіцієнтом теплопровідності в місцях з'єднання конструкцій (наприклад, терморозриви системи Schöck Isokorb дозволяють мінімізувати тепловтрати в місцях з'єднання балконних плит, козирків, лоджій та інших, виступаючих за контур будівлі, елементів);
- покращена ізоляція, що являє собою або безперервну теплоізоляцію всієї будівлі, або виконання додаткових заходів з поліпшення теплоізоляції в місцях розриву (віконні/дверні прорізи, зовнішні кути тощо);
- оптимізація вузлів примикання віконних та дверних блоків (утеплення відкосів, використання спеціальних склопакетів та покриттів);
- оптимізація вузлів цоколю та фундаментної плити, що передбачає ретельний процес утеплення та герметизацію стиків, зазорів, швів;
- вибір відповідної фасадної системи для збереження тепла та її ретельний монтаж, що стосується кріплень, анкерів, кронштейнів тощо;
- герметизація та ізоляція проходів інженерних комунікацій.

Висновки

Варто зазначити, що «теплові містки» – це зони в структурі будівлі, крізь які просочується досить значна кількість тепла, що на загальному плані веде зниження енергоефективності та поступового руйнування конструктиву будівлі. Для скорочення тепловтрат житлового фонду, слід використовувати відповідні методи, які здатні забезпечити комфортний мікроклімат, подовжити термін експлуатації та значно поліпшити енергоефективність житлової будівлі.

Література

1. Дячук О. та ін. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року : звіт / за заг. ред. Ю. Огаренко та О. Алієвої. Київ : АРТ КНИГА, 2017. 88 с.
2. Що таке місток холоду : веб-сайт / **Анжіо**. URL: https://angio.com.ua/ua/blog/chto_takoe_mostik_holoda.html (дата звернення: 18.02.2026).
3. Які будинки втрачають більше тепла? : веб-сайт / **ЛУН Місто**. URL: <https://lun.ua/misto/holod> (дата звернення: 18.02.2026).
4. What defines thermal bridge free design? : веб-сайт / **Passipedia — The Passive House Resource**. URL: https://passipedia.org/basics/building_physics_-_basics/what_defines_thermal_bridge_free_design (дата звернення: 18.02.2026).
5. Understanding Thermal Bridging + Its Impact on Building Heat Loss : веб-сайт / **h2x Engineering**. URL: <https://www.h2xengineering.com/blogs/understanding-thermal-bridging-impact-building-heat-loss/> (дата звернення: 18.02.2026).

УДК 69.07

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПРИЙОМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ МІНІМІЗАЦІЮ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЕНЕРГОВИТРАТ ЖИТЛОВОЇ БУДІВЛІ

Гапонова Людмила Вікторівна, завідувачка кафедрою
комп'ютерної графіки, канд.техн.наук, доцент
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
e-mail:gaplyudmila@gmail.com, ORCID 0000-0002-6038-2624

Конструктивно-інженерної системи інтелектуального будинку зводиться до математичного моделювання дослідження стану огорожувальних конструкцій, покриттів, інженерного обладнання, альтернативних джерел енергії; створення температурно-вологісного, світлового режимів будівлі для комфортного перебування в будівлях, що проектуються.

Параметри, що діють на комфортне перебування людини у приміщенні, взаємозалежні та взаємопов'язані. Мікроклімат в приміщенні розглядається як складна система, складові яких є температура зовнішнього повітря, вологість зовнішнього повітря, температура внутрішнього повітря в приміщенні, вологість внутрішнього повітря в приміщенні, інтенсивність освітлення, швидкість руху повітря, хімічний і бактеріологічний склад повітря в приміщенні, освітлення, інсоляція, ультрафіолетовий шум. Під час проектування енергозберігаючих будівель слід забезпечити проектом оптимальний життєвий цикл будівлі. Взаємозв'язок архітектурних та інженерних рішень у процесі проектування енергоефективного будинку розглянуто у роботі [1].

До основних принципів моделювання конструктивно-інженерної системи інтелектуального будинку належать природні (конструктивно-планувальні рішення, енергозберігаючі огорожувальні конструкції, кліматичне районування) та штучні (інженерно-технічне обладнання).

Взявши за основу системний підхід до побудови математичної моделі теплового балансу будівлі, створено методологію структурної моделі формування інтелектуальної будівлі (рис. 1).

Тепловтрати приміщення за рахунок теплопередачі через огорожувальні конструкції шляхом створення «будинку-термосу» на сьогоднішній день можна звести до нуля за рахунок створення легких енергозберігаючих багатошарових конструкцій для інтелектуального будинку. Кліматичні дані регіону холодного періоду 189 діб для м. Харкова при розрахунковій температурі зовнішнього повітря системи опалення $t_n = -23$ °C та розрахунковій температурі системи вентиляції становить $t_v = -11$ °C. Потреба додаткового тепла від системи опалення виникає при позитивному значенні величини теплового балансу:

$$Q_{от} = Q_{огр} + Q_{инф} - Q_{тех} - Q_{с.р.}, \quad (1)$$

де Q_{om} - тепло від системи опалення;

Q_{ogr} - тепловтрати приміщення за рахунок теплопередачі через зовнішні огорожі;

Q_u - витрата тепла на нагрівання зовнішнього повітря, що інфільтрується;

Q_{mex} - внутрішні технологічні та побутові тепловиділення;

$Q_{c.p.}$ - теплонадходження за рахунок сонячної радіації.

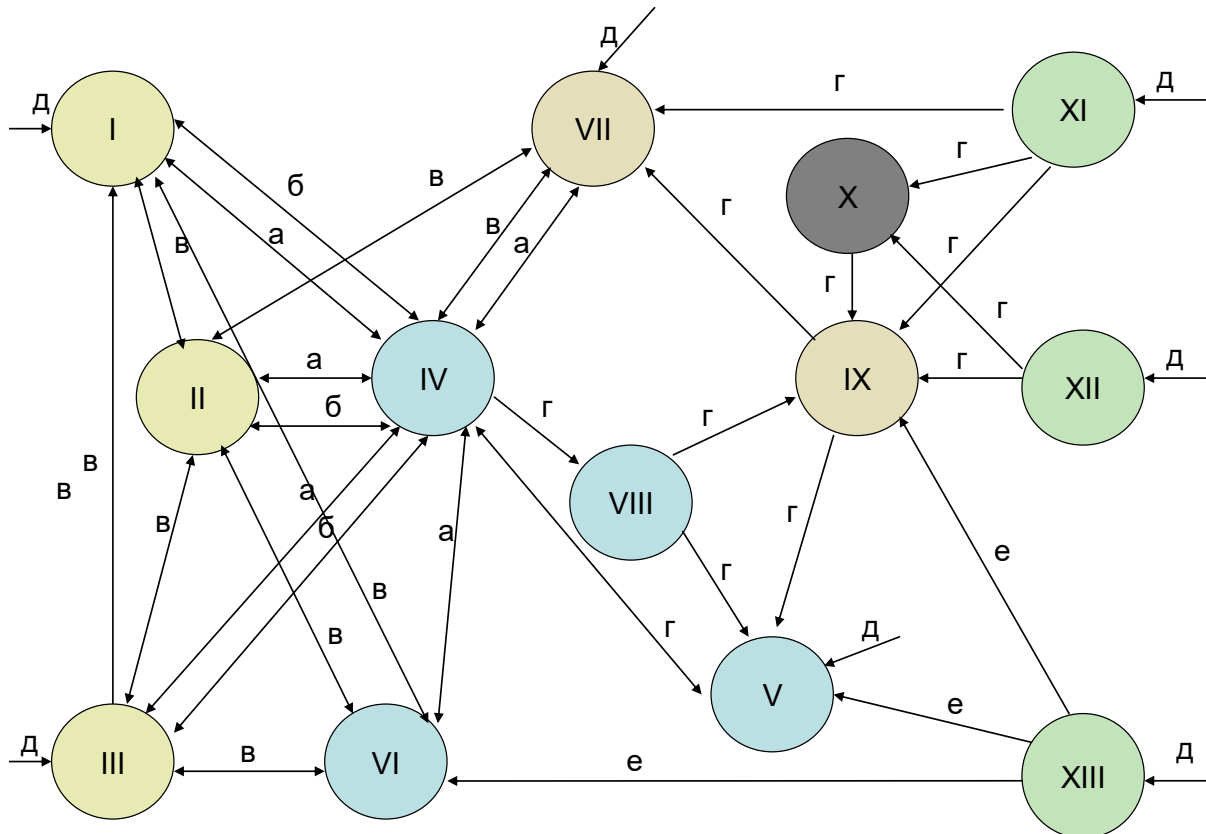


Рисунок 1 – Структурна модель будівлі: I – зовнішня поверхня огорожувальної конструкції; II – внутрішня поверхня огорожувальної конструкції; III – світловий отвір; IV – внутрішнє повітря; V – система кондиціонування повітря; VI - Внутрішнє обладнання;

VII – система опалення; VIII – система рекуперації тепла повітря, що видаляється;

IX – тепловий насос; X – акумулятор тепла; XI – енергія сонячної системи;

XII – енергія низькопотенційної теплоти (повітря, вода, ґрунт, вторинний енергоресурс);

XIII – енергія вітру. ; а) – характеризує передачу тепла конвекцією між поверхнею та

внутрішнім повітрям; б) – характеризує потоки тепла за рахунок фільтрації через

огорожувальні конструкції; в) – характеризує променистий теплообмін між поверхнями;

г) – характеризує конвективну теплоту, що безпосередньо передається з потоком речовини

(теплоносієм); д) – зв'язки з навколишнім середовищем; е) – характеризує передачу

електричної енергії

Потенціал відновлюваних енергоресурсів регіону в холодний період (опалювальний сезон) характеризується такими значеннями: потенціал соняч-

ної енергії – 4 (кВт годину/м² добу) у опалювальний сезон; потенціал теплоти ґрунту – 50 (Вт/п.м) на 1 п.м. довжини ґрунтового колектора; потенціал енергії вітру в холодний період прийнятий у розмірі 23 від річного і становить 1 м² площі робочого колеса – 260 (кВт год/м² сезон). Тепловтрати приміщення за рахунок теплопередачі через огорожувальні конструкції шляхом створення «будинку-термосу» на сьогоднішній день можна звести до нуля за рахунок створення легких енергозберігаючих багатошарових конструкцій для інтелектуального будинку. Детальна інформація про елементи та інженерні системи інтелектуального будинку міститься в табл. 1.

Таблиця 1 – Тепловий баланс будівлі

Теплопоступлення	Тепловтрати
Вироблення тепла за рахунок основних біологічних процесів, обміну речовин	Тепловипромінювання
Накопичення променевої енергії прямого та відбитого сонячного світла, приладів системи опалення.	Теплопередача в повітряне середовище, що має температуру нижче температури людського тіла
Теплопередача повітряним середовищем	Шляхом випаровування через дихальні шляхи, шкіру.

Корисна площа будівлі складає 585 м², обсяг – 2000 м³, кратність повітрообміну – одноразова (рис. 2).

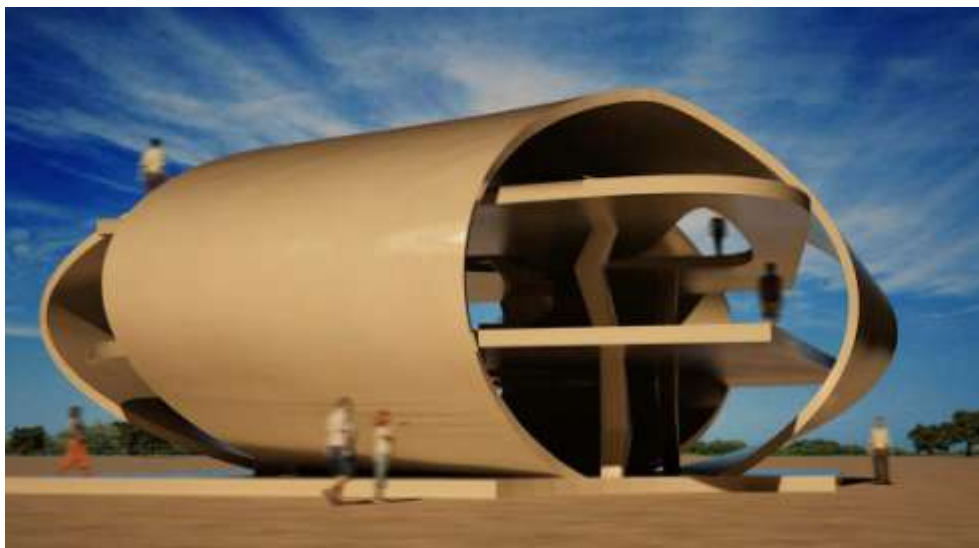


Рисунок 2 – Варіант енергоефективної будівлі

Технічний аналіз дозволив визначити характеристики застосовуваного обладнання для будівлі, що розглядається: вакуумні сонячні колектори площею 54 м² що становить приблизно 50% площі південного фасаду будівлі; шість термопаль глибиною по 15 м; вітроагрегат з вертикальною віссю обертання ротора площею робочого колеса 130 м²; парокompресійна теплонасосна установка потужністю близько 15 кВт; система рекуперації тепла вентиляційних

викидів із ефективністю 75 %. Теоретична обґрунтованість можливості створення комплексної системи інтелектуального будинку з огляду на відновлювану енергію сонця та ґрунту для теплового насосу, а також вітрову енергію дозволить обійтися без паливно-енергетичних ресурсів, отримати додаткову енергію та знизити забруднення навколишнього середовища.

Література

1. Шмуклер В. С., Гапонова Л. В. Наукові засади формування інтелектуального будинку. *Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Серія: Створення високотехнологічних екокомплексів на основі концепції збалансованого (стійкого) розвитку*. 2013. Вип. 68. С. 456–461.

УДК 691.3:697(728)

ТЕПЛОТЕХНІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ: СУЧАСНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПАСИВНОГО Й АКТИВНОГО ДОМОБУДУВАННЯ

Орел Євген Федорович, канд. техн. наук, доцент каф. ВПГЗ, Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: orel@kart.edu.ua, ORCID ID 0000-0002-6261-1558

Никитинський Андрій Володимирович, канд. техн. наук, доцент каф. БМКС,
Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: NykytynskyiAV@kart.edu.ua, ORCID ID 0000-0002-4923-8568

Ковальов Максим Олександрович, канд. техн. наук, доцент каф. БМГ,
Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: kovalev_bmg@kart.edu.ua, ORCID ID 0000-0003-2104-3061

У сучасному будівництві ключовим завданням стає формування енергоефективних конструкцій, здатних забезпечити мінімальні тепловтрати та оптимальне енергоспоживання протягом усього життєвого циклу будівлі. Розвиток концепцій пасивного та активного домобудування спрямований на створення архітектурно-конструктивних рішень, які дозволяють суттєво зменшити потребу в зовнішніх енергоресурсах. Відомо, що впровадження енергозберігаючих технологій знижує експлуатаційні витрати, підвищує тепловий комфорт та скорочує викиди парникових газів, що підтверджено у працях [1, 2]. Важливим напрямом підвищення енергоефективності є застосування матеріалів зі зменшеним теплотехнічним опором, зокрема бетонів із рециркульованими заповнювачами. Використання подрібнених бетонних і цегляних відходів дозволяє зменшити вуглецевий слід будівельної галузі та водночас оптимізувати теплотехнічні властивості конструкцій, оскільки такі матеріали мають нижчу

теплопровідність і підвищену термічну інерційність порівняно з традиційними заповнювачами [3–5]. Це відповідає принципам циркулярної економіки та сприяє формуванню сталих технологій у будівництві [6].

Пасивний будинок розглядається як система, у якій конструктивні рішення забезпечують мінімальні тепловтрати без застосування традиційних систем опалення чи кондиціонування. Основним критерієм є зменшення коефіцієнта теплопередачі огорожувальних конструкцій, що визначається формулою

$$U = \frac{1}{R_{\text{sum}}}, \quad (1)$$

де R_{sum} – сумарний термічний опір стіни, який, у свою чергу, визначається як

$$R = \frac{d}{\lambda}, \quad (2)$$

де d – товщина шару, а λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

У пасивних будинках значення (U) повинно бути у кілька разів нижчим за нормативне, що досягається збільшенням товщини теплоізоляційного шару до 30...40 см та застосуванням матеріалів із низькою теплопровідністю. Енергоощадні склопакети з багатошаровим покриттям та інертним газом забезпечують мінімальні втрати тепла через світлопрозорі конструкції, а герметичність оболонки будівлі зменшує неконтрольовані повітрообміни. Вентиляційні системи з рекуперацією тепла дозволяють повертати до 80–90% теплової енергії, що виходить із будівлі, нагріваючи припливне повітря без додаткових витрат енергії [1]. У таких конструкціях дедалі частіше застосовують будівельні суміші з рециркульованими заповнювачами, які зменшують теплопровідність матеріалу та підвищують енергоефективність огорожувальних елементів.

Активний будинок, на відміну від пасивного, не лише мінімізує тепловтрати, а й виробляє власну енергію за допомогою відновлюваних джерел. Фотоелектричні панелі, теплові насоси та системи акумулювання енергії забезпечують енергетичну автономність будівлі, а інтелектуальні системи керування оптимізують розподіл і споживання енергії [2]. Енергоефективність конструкцій активного будинку визначається балансом між тепловими надходженнями та втратами, що описується рівнянням

$$Q_{\text{бал}} = Q_{\text{надх}} - Q_{\text{втрат}}, \quad (3)$$

де $Q_{\text{надх}}$ включає сонячні та внутрішні теплові надходження, а $Q_{\text{втрат}}$ залежить від теплопровідності огорожувальних конструкцій та вентиляційних втрат.

Використання бетонів із рециклінговими компонентами у поєднанні з високоефективною теплоізоляцією дозволяє зменшити $Q_{\text{втрат}}$, що підвищує загальну енергоефективність будівлі протягом усього життєвого циклу.

Порівняння пасивних і активних будинків демонструє, що перший підхід орієнтований на мінімізацію споживання енергії, тоді як другий – на її вироб-

ництво та оптимізацію. Вартість будівництва пасивного будинку зазвичай на 10–20% вища за традиційну, тоді як активний будинок потребує найбільших інвестицій через складність інженерних систем. Окупність пасивних будинків становить у середньому 7–10 років, тоді як активних 10–15 років. Екологічність обох типів є високою, проте активні будинки можуть забезпечувати навіть позитивний енергетичний баланс, що робить їх ще більш ефективними у довгостроковій перспективі.

В Україні розвиток енергоефективного будівництва активізувався з 2010-х років. У межах програм GIZ «Енергоефективність у громадах» здійснюється модернізація житлового фонду та впровадження енергоощадних рішень. Водночас активне домобудування поки що менш поширене через високу вартість обладнання та недостатню державну підтримку, що підтверджено у дослідженнях [7, 8].

Висновки

Активне та пасивне домобудування формують два взаємодоповнювальні підходи до створення енергоефективних конструкцій. Пасивні будинки забезпечують мінімальні тепловтрати завдяки високоефективним матеріалам і конструктивним рішенням, тоді як активні будинки досягають енергетичної автономності через інтеграцію відновлюваних джерел енергії. Використання бетонів із рециркульованими заповнювачами є важливим елементом обох концепцій, оскільки такі матеріали зменшують теплопровідність конструкцій, підвищують їхню енергоефективність та скорочують вуглецевий слід будівництва. Поєднання цих технологій створює основу для формування житла майбутнього, яке поєднує комфорт, енергоощадність та технологічну досконалість.

Література

1. **Feist W.** Passive House Planning Package. Darmstadt : Passive House Institute, 2005. 150 p.
2. **Sartori I., Hestnes A. G.** Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*. 2007. Vol. 39, No. 3. P. 249–257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>.
3. **Meyer C.** The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*. 2009. Vol. 31, No. 8. P. 601–605. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>.
4. **Silva R. V. et al.** Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 65. P. 201–217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.
5. **Tam V. W. Y. et al.** A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 172. P. 272–292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>.
6. **Pacheco-Torgal F. et al.** Eco-efficient construction and building materials. Springer Series in Materials Science, 2013. 326 p.
7. **Міністерство розвитку громад та територій України.** Національна стратегія з енергоефективності будівель до 2050 року. Київ, 2020. 56 с.
8. **Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).** Енергоефективність у громадах II. Київ, 2018. 48 с.

УДК 620.1:691.24(697)

СПОСОБИ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ МІНЕРАЛЬНОЇ ВАТИ У ВИРОБНИЦТВІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Трикоз Людмила Вікторівна, докт. техн. наук, професор каф. БМКС,
Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: lvtrikoz@ukr.net, ORCID ID 0000-0002-8531-7546

Сташко Микола Валерійович, аспірант,
Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: stashko.mykola@gmail.com

Камчатна Світлана Миколаївна, канд. техн. наук, доцент каф. ВМЗ,
Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: kamchatnayasn@gmail.com, ORCID ID 0000-0001-5711-4146

Проблеми, пов'язані з накопиченням промислових відходів, мають глобальний характер, а ефективне управління будівельними та демонтажними відходами перетворилося на один із ключових викликів сучасності. Упровадження принципів циркулярної економіки у створення нових, екологічно стійких будівельних матеріалів стає важливою умовою розвитку будівельної галузі майбутнього. В Україні значне збільшення обсягів зруйнованих або демонтованих конструкцій спричиняє утворення великої кількості відходів, серед яких важливе місце займає мінеральна вата. Цей матеріал традиційно застосовувався як тепло-, звукоізоляційний та вогнестійкий компонент. Попри активне вивчення можливостей повторного використання будівельних відходів, питання рециклінгу мінеральної вати досі досліджене недостатньо. Метою статті є узагальнення наукових джерел щодо потенціалу застосування переробленої мінеральної вати у виробництві будівельних матеріалів, зокрема для покращення їх механічних характеристик, зниження теплопровідності та підвищення довговічності, що сприятиме сталому розвитку галузі.

Одним із напрямів утилізації відходів мінеральної вати, що утворюються під час реконструкції або демонтажу будівель, є повернення їх у виробничий цикл шляхом повторного плавлення. У роботі [1] порівнювали теплову поведінку первинної мінеральної вати та відходів знесення. Встановлено, що вони демонструють різні термічні реакції: первинна сировина проходить через газовиділення, фазові переходи та плавлення окремих компонентів, тоді як відходи характеризуються процесами склування, кристалізації та остаточного плавлення. Відходи починають плавитися за нижчої температури та потребують меншої кількості енергії, що робить їх повторне використання технологічно та екологічно доцільним. Перспективним напрямом є також лужна активація подрібненої мінеральної вати для отримання легких теплоізоляційних заповнювачів [2]. Отримані матеріали мали насипну густину 720–850 кг/м³ та

теплопровідність 0,075–0,094 Вт/м·К у сухому стані. Морфологія волокон впливала на реологію сумішей, сприяючи утворенню пор і дефектів, що знижувало міцність. Гідротермальне моделювання показало, що застосування таких заповнювачів у теплоізоляційних шарах підлог сприяє зменшенню вологості ґрунту та підвищенню температури поверхні.

У низці досліджень розглядається використання подрібненої мінеральної вати як наповнювача для цементних та композиційних матеріалів. У [3] зазначено, що застосування вторинних матеріалів як матриці, наповнювача або волокон часто призводить до зниження міцності порівняно з первинною сировиною, а також потребує контролю забруднень. Найбільш перспективними відходами для композитів визначено термопласти, мінеральну вату, гіпс і деревину.

У роботі [4] досліджено теплові та структурні властивості переробленої мінеральної вати з будівельних відходів. Зразки щільністю 50–120 кг/м³ мали теплопровідність 0,040–0,055 Вт/(м·К), що дозволяє використовувати їх як засипну ізоляцію або наповнювач для екструдованих матеріалів.

Після завершення експлуатації мінеральна вата класифікується як небезпечний відхід, що ускладнює її захоронення через низьку щільність та нестабільність форми. Це підкреслює потребу у безпечних та ефективних методах переробки.

У [5] описано термохімічну переробку мінеральної вати для отримання додаткового цементного матеріалу. Після плавлення при 1400 °С та подрібнення отримували аморфну склоподібну фазу з гідравлічною активністю, подібною до портландцементу. Однак висока енергоємність процесу стимулює пошук економніших рішень, зокрема подрібнення до стану мікронаповнювача [6]. У цій роботі мікрофрезеруванням отримували наповнювач і короткі волокна для штукатурних розчинів. Додавання до 1,2 мас.% знижувало міцність на стиск, але підвищувало міцність на вигин і зменшувало теплопровідність.

Завдяки високому вмісту аморфного SiO₂ перероблена мінеральна вата може бути сировиною для кремнеземних аерогелів, отриманих методом атмосферного сушіння [7]. Аерогелі характеризуються низькою теплопровідністю (22–26 мВт/(м·К)), високою питомою поверхнею (603–676 м²/г) та густиною 86–136 кг/м³. Використання відходів як сировини дозволяє зменшити вартість виробництва та обсяг відходів.

У роботі [8] досліджено вплив вторинних волокон мінеральної вати на властивості будівельних розчинів із природним та переробленим заповнювачем. Додавання 10–20% волокон знижувало густина, твердість, капілярне водопоглинання та міцність на стиск, але водночас зменшувало теплопровідність, усадку, підвищувало міцність на вигин і морозостійкість. Подібні результати отримано в [9] для гіпсових композитів із додаванням гумових гранул та волокон мінеральної вати. Такі матеріали мали нижчу щільність і теплопровідність, кращу водостійкість і достатні механічні характеристики для застосування у вологих приміщеннях.

Висновки

Аналіз наукових джерел свідчить, що відходи мінеральної вати можуть бути ефективно залучені до виробництва нових будівельних матеріалів. Їх використання у цементних, гіпсових, полімерних та композитних системах дозволяє зменшити екологічний вплив, знизити витрати на утилізацію та частково замінити первинну сировину. Додавання переробленої мінеральної вати здатне покращувати окремі властивості матеріалів — зменшувати теплопровідність, підвищувати довговічність та міцність на вигин. Водночас існують виклики, пов'язані зі збором, сортуванням, безпечним транспортуванням та відповідністю нормативним вимогам. Подальші дослідження та впровадження інноваційних технологій переробки сприятимуть більш раціональному використанню цих відходів і зменшенню їх негативного впливу на довкілля.

Література

1. **Schultz-Falk V. et al.** Melting behaviour of raw materials and recycled stone wool waste. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. Vol. 485. P. 34–41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.01.035>.
2. **Koh C. H. et al.** A circular approach to stone wool: Alkali-activated lightweight aggregates. *Developments in the Built Environment*. 2024. Vol. 19. 100506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100506>.
3. **Sormunen P., Kärki T.** Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing. *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 24. 100742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100742>.
4. **Domonkos M. et al.** Thermal properties of mineral wool insulation recovered from construction and demolition waste. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2022. Vol. 34. P. 6–10. DOI: <https://doi.org/10.14311/APP.2022.34.0006>.
5. **Doschek-Held K. et al.** Recycling of mineral wool waste as supplementary cementitious material through thermochemical treatment. *Waste Management & Research*. 2024. Vol. 42 (9). P. 806–813. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242x241237199>.
6. **Trejbal J. et al.** New possibilities for recycling of mineral wool separated from thermal insulation waste. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2022. Vol. 34. P. 122–126. DOI: <https://doi.org/10.14311/app.2022.34.0122>.
7. **Borzova M., Gauvin F., Schollbach K.** Upcycling Waste Mineral Wool into Ambient Pressure-Dried Silica Aerogels. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2025. Vol. 13 (7). P. 2955–2965. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c09976>.
8. **Ferrández D. et al.** Recovery of Mineral Wool Waste and Recycled Aggregates for Use in the Manufacturing Processes of Masonry Mortars. *Processes*. 2022. Vol. 10. 830. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10050830>.
9. **Zaragoza-Benzal A. et al.** Recovery of End-of-Life Tyres and Mineral Wool Waste: A Case Study with Gypsum Composite Materials Applying Circular Economy Criteria. *Materials*. 2023. Vol. 16. 243. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16010243>.

УДК 624.012.45

STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH COMPOSITE MATERIALS

Pustovoitova Oksana Mykhailivna, PhD, Associate Professor Department of Building Constructions, O.M. Beketov National University of Urban Economy, e-mail: oksana_pustov@ukr.net, ORCID ID 0009-0003-4774-6686

Atynian Armen Ovikovich, PhD, Associate Professor Department of computer graphics, Kharkov National Automobile and Highway University, Ukraine, e-mail: Armen.Atynyan@kname.edu.ua ORCID ID 0000-0002-0329-2702

Gvozdiuk Oleksandr Anatoliyovych, postgraduate, Department of Building Constructions, O.M. Beketov National University of Urban Economy, e-mail: gvozduksasha@gmail.com, ORCID ID 0009-0000-7856-9094

Enhancing the durability and operational reliability of buildings and structures is a priority task in modern construction. During their service life, load-bearing elements are subjected to factors that lead to a reduction in their load-bearing capacity, the development of defects, and, in some cases, a pre-emergency condition. Buildings slated for reconstruction or exhibiting signs of damage undergo technical inspection. Based on the inspection results, a technical report is prepared with recommendations for the restoration or strengthening of the structures. In cases where defect elimination is not possible through routine repairs, design solutions for strengthening the load-bearing elements are developed [1].

Work on strengthening historically valuable or technically complex structures, whose demolition is economically unfeasible or technically impossible, holds particular relevance. Alongside traditional strengthening methods using steel elements, technologies employing composite materials, specifically external reinforcement systems, have become widespread.

Modern composite materials, manufactured on a glass fiber basis, are characterized by high strength, linear-elastic behavior, low weight, and corrosion resistance. These properties ensure their effectiveness in the repair and strengthening of structures made of reinforced concrete, metal, wood, and other materials. External reinforcement elements are applied in the form of strips or sheets, which are bonded to the structure's surface using polymeric or polymer-cement adhesives. In service, these systems effectively absorb additional deformations, facilitating the redistribution of internal forces and enhancing the structure's load capacity [2].

The primary advantages of external GFRP reinforcement include the low self-weight of the strengthening elements, the possibility of installation without heavy lifting equipment, effectiveness in confined or complex construction conditions, corrosion resistance, suitability for use in aggressive environments, a minimal increase in the structure's cross-section dimensions, and reduced construction time. However, the application of such systems requires consideration of the temperature

limitations of the polymer matrix, proper preparation of the concrete substrate, and the involvement of qualified personnel.

External reinforcement systems are used to strengthen beams, floor slabs, columns, foundations, truss elements, and other structures, ensuring an increase in their load-bearing capacity and extending their service life. The use of glass-fiber materials allows for a reduction in labor intensity, shorter reconstruction timelines, and a significant increase in the efficiency of restoring buildings and structures that are in an unsatisfactory technical condition.

The application of glass fiber for strengthening reinforced concrete structures is driven by its high strength and linear-elastic properties, which ensure the material's effective performance within external reinforcement systems. Glass fiber materials are manufactured in the form of fabrics made from fibers obtained through the thermal treatment of raw materials in an inert atmosphere. In strengthening practice, they are applied as strips or sheets, functioning as additional reinforcement.

The attachment of external reinforcement elements to reinforced concrete structures is carried out using epoxy, epoxy-polyurethane, or polymer-cement adhesives, which ensure a reliable bond with the substrate. During service, these elements actively engage in absorbing the structure's deformations, accompanied by an increase in stresses within the strengthening layer and a rise in the load-bearing capacity of the element.

The main advantages of GFRP-based external reinforcement systems include: the low self-weight of the strengthening elements compared to steel solutions; the absence of a need for lifting equipment during installation; the feasibility of working in confined or enclosed spaces; effectiveness at sites with difficult transport access; suitability for operation in aggressive environments, particularly under the action of liquid aggressive media and the possibility of performing work underwater; the corrosion resistance and electrical non-conductivity of the material; reduced construction time; and the negligible thickness of the strengthening layer, which does not reduce the floor-to-floor height or alter the structure's geometric parameters.

Despite their significant advantages, GFRP-based external reinforcement systems have several limitations. Notably, the maximum service temperature of such systems is generally within the range of approximately 60–150 °C, necessitating the provision of thermal and fire protection. Elevated requirements are imposed on the strength and quality of the concrete surface preparation, and the execution of work requires the involvement of qualified personnel with specialized training.

The main requirements for the application of external reinforcement systems include: preventing the exceedance of the glass transition temperature of the polymer matrix and adhesive; ensuring adequate concrete strength (typically, a minimum compressive strength of 15 MPa, except in cases of jacketing for compression members where mechanical interlock is decisive); and a rational strengthening level, generally within 10–60% of the original load-bearing capacity. These systems are used for the longitudinal and transverse reinforcement of linear members, the jacketing of columns, supports, and corbels, as well as for strengthening slabs, truss elements, and other structures.

It should be noted that the application of composite systems does not halt ongoing corrosion processes in the steel reinforcement. Therefore, prior to strengthening, it is necessary to perform anti-corrosion treatment, restore the concrete cover, and ensure proper adhesion of the repair materials to the existing substrate.

Conclusions

External reinforcement with glass fiber strips is widely applied for the repair and restoration of reinforced concrete structures damaged due to reinforcement corrosion or the action of aggressive environments. Compared to traditional methods that require significant labor input and the installation of additional formwork, composite technology enables a reduction in construction time (within 1–3 weeks, depending on the scope), a multiple increase in the load-bearing capacity of elements, and an extension of the inter-repair service period. The use of glass fiber opens up possibilities for the effective restoration and service life extension of aging and damaged buildings.

References

1. **Pustovoi** O. M. et al. Research of deformation and strength characteristics of concrete columns with composite reinforcement. *Suchasne budivnytstvo ta arhitektura*. 2025. No. 11. P. 68–76. DOI: <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2025-11-68-76>.
2. **Trykoz L., Kamchatnaya S., Semenova-Kulish V.** Fiberglass coating of railway culvert pipes. *Proceedings of the International Scientific Conference on Transport Means* (Kaunas, 30 September 2020). Kaunas : Kaunas University of Technology, 2020. P. 442–445. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190687096> (date of access: 04.03.2026).

**ЗБІРНИК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ
III МІЖНАРОДНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
«ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ
ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ»
11–12 березня 2026 року
(Посвідчення УкрІНТЕІ від 11 грудня 2025 р. № 973)**

Відповідальність за зміст статей несуть автори

Відповідальний за випуск *Корогодський В.А.*

В авторській редакції

Видавець **ФОП Бровін О.В.**
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.
Формат 60x84/16 Ум. друк. арк. 12.09. Тир. 100 прим. Зам. 873.

Надруковано з макету замовника **ФОП Бровіна І.П.**
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (066) 822-71-30