

DOI: 10.30977/VEIT.2025.27.0

ISSN: 2226-9266



АВТОМОБІЛЬ І ЕЛЕКТРОНІКА СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ

**ЕЛЕКТРОННЕ НАУКОВЕ
СПЕЦІАЛІЗОВАНЕ
ВИДАННЯ**

ВИПУСК



ХАРКІВ

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Кафедра автомобільної електроніки

Автомобіль і Електроніка. Сучасні Технології

**Електронне наукове фахове видання
(друкована версія)**

27/2025

Vehicle and Electronics. Innovative Technologies

Electronic scientific professional edition

ISSN: 2226-9266

DOI: 10.30977/VEIT.2025.27.0

<https://veit.khadi.kharkov.ua/index>

Харків 2025

Журнал засновано в 2011 р. кафедрою Автомобільної електроніки, Харківського національного автомобільно-дорожнього університету– <https://veit.khadi.kharkov.ua>

ISSN: 2226-9266

DOI: 10.30977/VEIT.2025.27.0

Випуск сформовано 28.05.2025.

В журналі публікуються матеріали теоретичних та практичних досліджень присвячених перспективним напрямкам розвитку автомобільної електроніки, впровадженню та удосконаленню гібридних автомобілів та електромобілів, моделюванню транспортних процесів і систем, інформаційним технологіям й інтелектуальним системам на транспорті, сучасним технологіям діагностики систем і агрегатів транспортних засобів, а також методичним дослідженням підготовки спеціалістів у сфері транспорту.

Журнал також включає матеріали доповідей учасників Всеукраїнської науково-методичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку вищої освіти в Україні».

Затверджено: Вченою радою університету від 25.03.2011, протокол № 8

Журнал включено до **Переліку електронних наукових фахових видань України, категорія «Б» за спеціальностями – 113, 121, 122, 133, 151, 274, 275**, наказом Міністерства освіти і науки України № 612 від 07.05.2019 та **141, 142**, наказом Міністерства освіти і науки України № 975 від 11.07.2019.

Спеціальності: 113 - Прикладна математика
 121 - Інженерія програмного забезпечення
 122 - Комп'ютерні науки
 133 - Галузеве машинобудування
 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
 274 - Автомобільний транспорт
 275 - Транспортні технології (за видами)
 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 142 - Енергетичне машинобудування

Редакційна колегія

Головний редактор: Дзюбенко Олександр Андрійович, к.т.н., доц.

Заступник головного редактора: Аргун Щасяна Валіковна, д.т.н., проф.

Відповідальний секретар: Трунова Ірина Сергіївна, к.т.н., доц.

Члени редколегії: Абрамчук Ф. І. (д-р техн. наук, проф.), Бажинов О. В. (д-р техн. наук, проф.), Батигін Ю. В. (д-р техн. наук, проф.), Богаєвський О. Б. (д-р техн. наук, проф.), Богомолов В. О. (д-р техн. наук, проф.), Вдовиченко В. О. (канд. техн. наук, доц.), Волков В. П. (д-р техн. наук, проф.), Воронков О. І. (д-р техн. наук, проф.), Врублевський О. М. (д-р техн. наук, проф.), Гнатов А. В. (д-р техн. наук, проф.), Гурко О. Г. (д-р техн. наук, проф.), Горбачов П. Ф. (д-р техн. наук, проф.), Двадненко В. Я. (д-р техн. наук, проф.), Далека В. Х. (д-р техн. наук, проф.), Клименко В. І. (д-р техн. наук, проф.), Клец Д. М. (д-р техн. наук, проф.), Колодяжний В. М. (д-р фіз.-мат. наук, проф.), Корогодський В. А. (д-р техн. наук, проф.), Мигаль В. Д. (д-р техн. наук, проф.), Михалевич М. Г. (канд. техн. наук, доц.), Наглюк І. С. (д-р техн. наук, проф.), Ніконов О. Я. (д-р техн. наук, проф.), Подригало М. А. (д-р техн. наук, проф.), Полянський О. С. (д-р техн. наук, проф.), Сараєв О. В. (д-р техн. наук, проф.), Смирнов О. П. (д-р техн. наук, проф.), Солодов В. Г. (д-р техн. наук, проф.), Тропіна А. А. (д-р техн. наук, проф.), Чаплигін Є. О. (канд. техн. наук, доц.), Шуклінов С. М. (д-р техн. наук, проф.), Яніютін Є. Г. (д-р техн. наук, проф.)

Адреса редакції: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Автомобільний факультет, Кафедра автомобільної електроніки, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002,

Тел.: (057) 707-36-96; **e-mail:** ae.hnadu@gmail.com

<https://veit.khadi.kharkov.ua>

Статті друкуються в авторській редакції. Редакція не несе відповідальності за орфографічні, стилістичні чи інші помилки, допущені автором публікації.

ЗМІСТ

ТРАНСПОРТНА ІНФРАСТРУКТУРА, РОЗВИТОК МЕРЕЖІ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЕКОМОБІЛІВ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ТРАНСПОРТІ

Щасяна Аргун, Андрій Гнатов, Ольга Ульянець

Дослідження технічних характеристик та методів заряджання електромобіля

Hyundai Kona Electric.....6

Дмитро Бондаренко, Олександр Дзюбенко

Оцінка функціональності мобільних додатків для взаємодії з зарядною інфраструктурою

електромобілів в Україні.....1

МОДЕЛЮВАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ В АВТОМОБІЛЕБУДУВАННІ І ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ

Руслан Багач, Владислав Латвінський, Олександр Плахтій, Марина Філіп'єва

Комп'ютерне проєктування та моделювання енергетичних систем у навчальному

процесі.....7

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА І РЕМОНТУ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ. СЕРВІСНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ І ТЕХНІЧНИЙ ОГЛЯД АВТОМОБІЛІВ

Андрій Гнатов, Щасяна Аргун, Павло Сохін, Наталя Григоренко

Використання застосунку Car Scanner ELM OBD-II для діагностики

Hyundai Kona Electric.....48

Ігор Мамрут, Юрій Горбик

Розробка методики перевірки каналу вимірювання швидкості роликового стенду пересувної

станції діагностування (ПДС-Л).....60

ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ І ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

Володимир Сахно, Ігор Мурований, Світлана Шарай, Андрій Котенко

Порівняльний аналіз шарнірно-зчленованих автобусів за маневреністю.....69

Микола Цюман

Підвищення енергоефективності транспортних енергоустановок використанням

комбінацій традиційного та альтернативних палив.....80

Владислав Латвінський, Руслан Багач, Олександр Плахтій, Валентин Запорізький

Дослідження та оптимізація температурного режиму літій-іонних акумуляторів у складі

тягової батареї електромобіля.....99

Олег Смирнов, Анна Борисенко

Розробка прогностичної моделі деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей

електромобілів.....110

Ігор Рогозін, Сергій Новічонок, Андрій Нечаус, Антон Ісаєв

Шляхи вдосконалення автомобільного шасі засобу аеродромно-технічного забезпечення

польотів встановленням гібридного силового агрегата.....123

Нікіта Тараненко, Ірина Трунова

Дослідження методів машинного навчання для оптимізації енергоспоживання в гібридних

електромобілях з підзарядкою від мережі.....137

Станіслав Стельмашук, Василь Онищук, Валерій Стельмашук

До визначення стійкості автомобіля категорії M1 з причепом категорії O2 у

гальмівному режимі.....152

CONTENT

TRANSPORT INFRASTRUCTURE, DEVELOPMENT OF THE CHARGING STATION NETWORK FOR ECO-FRIENDLY VEHICLES. INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN TRANSPORT

Shchasiana Arhun, Andrii Hnatov, Olha Ulianets

Research on the main technical characteristics and charging methods of the Hyundai Kona Electric6

Dmytro Bondarenko, Oleksandr Dziubenko

Evaluation of the functionality of mobile applications for interaction with the electric vehicle charging infrastructure in Ukraine21

MODELING OF APPLIED PROBLEMS IN AUTOMOTIVE ENGINEERING AND TRANSPORT SYSTEMS

Ruslan Bahach, Vladislav Latvynskyi, Oleksandr Plakhtii, Maryna Filipieva

Computer design and modeling of energy systems in the educational process37

EQUIPMENT FOR THE MANUFACTURE AND REPAIR OF TRANSPORT VEHICLES. SERVICE MAINTENANCE AND TECHNICAL INSPECTION

Andrii Hnatov, Shchasiana Arhun, Pavlo Sokhin, Natalia Hryhorenko

Using the Car Scanner ELM OBD-II program for diagnosing Hyundai Kona Electric48

Ihor Marmut, Yuriy Gorbik

Development of a method for checking the speed measurement channel of the roller stand of a mobile diagnostic station (MDS-C)60

WAYS TO IMPROVE THE ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL INDICATORS OF MOTOR VEHICLES. ENERGY SAVING TECHNOLOGIES

Volodymyr Sakhno, Igor Murovanyi, Svitlana Sharai, Andrii Kotenko

Comparative Analysis of Articulated Buses in Terms of Maneuverability69

Mykola Tsiuman

Enhancing the energy efficiency of transport power units using combinations of traditional and alternative fuels80

Vladislav Latvynskyi, Ruslan Bahach, Oleksandr Plakhtii, Valentyn Zaporizkyi

Effects and Optimization of the Temperature Regime of Lithium-Ion Batteries in the Traction Battery of an Electric Car99

Oleh Smyrnov, Anna Borysenko

Development of a predictive model for the degradation of the capacity of lithium-ion batteries in electric vehicles110

Ihor Rohozin, Serhii Novichonok, Andrii Nechaus, Anton Isaiev

Ways to improve the chassis of an airfield flight support vehicle by installing a hybrid power unit123

Nikita Taranenko, Iryna Trunova

Research on machine learning methods for energy consumption optimization in plug-in hybrid electric vehicles137

Stanislav Stelmashchuk, Vasyl Onyshchuk, Valerii Stelmashchuk

To determine the stability of an M1 category vehicle with an O2 category trailer in braking mode152

Дослідження технічних характеристик та методів заряджання електромобіля Hyundai Kona Electric

Аргун Щ. В.¹, Гнатов А. В.¹, Ульянець О. А.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. У статті проведено дослідження технічних характеристик та способів заряджання електромобіля Hyundai Kona Electric. Проаналізовано розвиток поколінь цієї моделі, порівняно її акумуляторні батареї, зарядну архітектуру та швидкість заряджання. Визначено вплив ємності акумулятора на запас ходу та ефективність експлуатації. Розглянуто різні стандарти зарядних портів та їхню сумісність із зарядною інфраструктурою. Отримані результати можуть бути корисними для оцінки можливостей Hyundai Kona Electric у контексті електромобільного транспорту.

Ключові слова: електромобіль, зарядний порт, зарядна станція, високовольтна акумуляторна батарея, електротранспорт, ємність акумулятора, енергоефективність.

Вступ

Стрімкий розвиток електротранспорту спричинив зростання попиту на ефективні, енергоощадні та доступні електромобілі. Hyundai Kona Electric займає одну з провідних позицій у сегменті електричних кросоверів завдяки оптимальному поєднанню технічних характеристик, запасу ходу та варіативності способів заряджання. Дослідження ключових параметрів цієї моделі дозволяє оцінити її експлуатаційні можливості, економічну доцільність та екологічні переваги [1].

З огляду на активне впровадження електромобілів у міській та міжміській мобільності України, особливої уваги потребують питання ефективності використання акумуляторної батареї, продуктивності силової установки та швидкості заряджання [2, 3]. Оптимізація процесу заряджання є важливим аспектом експлуатації електромобілів, оскільки впливає на їхню зручність, довговічність акумуляторів та загальну економічну ефективність. Визначення найбільш доцільних способів заряджання Hyundai Kona Electric сприятиме підвищенню обізнаності користувачів та ефективному використанню електромобілів у різних умовах експлуатації [4].

Крім того, розвиток зарядної інфраструктури та вдосконалення акумуляторних технологій посилюють актуальність досліджень у цій сфері. Аналіз ефективності методів заряджання, зокрема змінного та постійного струму, дозволяє оцінити їхній вплив на експлуатаційні характеристики автомобіля та довговічність акумуляторної батареї [5–10].

Таким чином, вивчення технічних характеристик та способів заряджання Hyundai Kona Electric є важливим не лише для розуміння особливостей цієї моделі, але й для подальшого розвитку електротранспорту загалом. Отримані результати можуть бути корисними для виробників, операторів зарядних станцій та кінцевих користувачів, сприяючи підвищенню ефективності електромобілів і їх популяризації серед споживачів.

Аналіз публікацій

Ефективність електромобілів значною мірою визначається їхньою зарядною інфраструктурою, витратами енергії та факторами, що впливають на запас ходу. Важливим аспектом дослідження є автономні джерела живлення та перспективи їх інтеграції в зарядну інфраструктуру, що розглянуто в роботі [5].

Автори аналізують можливість використання альтернативних методів накопичення енергії, що може знизити залежність електромобілів від традиційних мережевих зарядних станцій.

Разом з тим, ефективність заряджання електромобілів залежить не лише від джерел живлення, але й від електромагнітних параметрів зарядних станцій. У дослідженні [6] проаналізовано особливості роботи станцій змінного струму, що дозволяє оцінити їхній вплив на електромережу, а також розглянуто питання стабільності та безпеки зарядного процесу.

Іншим ключовим аспектом досліджень є вплив характеристик електромобіля на його запас ходу та споживання енергії. Як показано в роботі [12], реальна витрата енергії суттєво залежить від режиму водіння, аеродинамічного опору та енергоспоживання допоміжних систем, таких як кондиціонування повітря та тепломенеджмент акумулятора. Ці фактори також є предметом дослідження [13], де автори розглядають вплив коефіцієнта аеродинамічного опору та ваги електромобіля на ефективність використання енергії.

Оптимізація процесу заряджання є ще одним важливим напрямом досліджень. У роботі [11] автори пропонують алгоритми підвищення безпеки заряду електромобілів, що включають аналіз структури зарядного обладнання та забезпечення стабільності електромережі під час заряджання. У свою чергу, у [14] розглядається оптимізація зарядного процесу з урахуванням змін у генерації електроенергії від відновлюваних джерел, зокрема вітрових електростанцій.

Питання впливу електромобілів на електромережу та можливості оптимізації зарядного процесу є предметом дослідження в [15]. Автори пропонують підходи до керування зарядним навантаженням з урахуванням тарифів на електроенергію та ємності акумуляторів, що дозволяє зменшити пікові навантаження на мережу. Подібні аспекти розглянуто і в [16–18], де аналізуються стратегії впорядкованого заряджання електромобілів, оптимізація розподілу потужності та потенційні економічні вигоди для користувачів.

Подальший розвиток зарядної інфраструктури та інтеграція інтелектуальних систем управління зарядними станціями є важливими напрямками досліджень, представленими в

[19]. У цій роботі пропонується система автоматизованого збору даних щодо параметрів заряджання в реальному часі, що дозволяє підвищити ефективність управління процесом зарядки електромобілів.

Таким чином, аналіз наукових публікацій показує, що ефективність електромобілів значною мірою залежить від характеристик акумуляторів, впливу експлуатаційних факторів на споживання енергії та методів заряджання. Подальше вдосконалення технологій зарядної інфраструктури та інтеграція інтелектуальних систем управління зарядним процесом є ключовими напрямками розвитку електротранспорту.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є дослідження основних технічних характеристик та способів заряджання електромобіля Hyundai Kona Electric для оцінки його експлуатаційних можливостей, енергоефективності та сумісності із зарядною інфраструктурою.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз публікації щодо споживання та витрат енергії електромобілями та методів їх ефективного заряджання;
- проаналізувати покоління випуску електромобіля Hyundai Kona та його технічні характеристики;
- дослідити електричну силову установку Hyundai Kona Electric та систему рекупративного гальмування електромобіля;
- дослідити особливості заряду електромобіля Hyundai Kona в залежності від ринку його збуту;
- дослідити питання ємності акумуляторної батареї та запропонувати методику розрахунку ємності блоку акумуляторів для джерела безперебійного живлення.

Еволюція моделей Hyundai Kona Electric

Автомобіль Hyundai Kona Electric вперше був представлений у березні 2018 р. як електрична версія компактного кросовера Kona, що вийшов на ринок у 2017 р. Ця модель швидко набула популярності завдяки збалансованому співвідношенню запасу ходу, продуктивності та ціни.

У вересні 2020 р. компанія Hyundai провела рестайлінг моделі, покращивши дизайн, мультимедійну систему та інтер'єр. Основні

технічні характеристики, включаючи параметри акумулятора та силової установки, залишилися незмінними.

Друге покоління Hyundai Kona Electric було представлено у грудні 2022 р., а продажі розпочалися в липні 2023 р. Ця версія отримала повністю перероблену платформу, збільшені габарити та вдосконалену архітектуру батарейного блоку. Зокрема, збільшено

запас ходу, покращено енергоефективність та оптимізовано процес заряджання.

Візуальні зміни між поколіннями Hyundai Kona Electric включають оновлення дизайну екстер'єру та інтер'єру. На рисунках нижче в Таблиці 1 представлено порівняння зовнішнього вигляду та салону автомобіля між поколіннями.

Таблиця 1 – Візуальне порівняння поколінь Hyundai Kona Electric

Модель	Зображення автомобіля Hyundai Kona Electric [20, 21]	
	Зовнішній вид	Салон автомобіля
Hyundai Kona Electric 2018-2019 років випуску		
Hyundai Kona Electric 2020 року випуску		
Hyundai Kona Electric SX2 другого покоління		

Як видно з таблиці 1, кожне покоління Hyundai Kona Electric отримувало оновлення екстер'єру та інтер'єру.

Перше покоління (2018-2019 рр.) має класичний компактний дизайн із плавними лініями та простим оформленням інтер'єру.

Рестайлінг 2020 року додав оновлену передню оптику, змінив форму бампера та покращив мультимедійну систему.

Друге покоління (з 2023 року) отримало значні зміни у дизайні: з'явилися більш футуристичні риси, світлодіодна смуга на пе-

редній частині, а також повністю новий салон з мінімалістичним інтерфейсом, широким екраном цифрової панелі приладів і покращеною ергономікою.

Окрім змін у дизайні, друге покоління Hyundai Kona Electric отримало суттєві технічні оновлення, зокрема вдосконалену архітектуру акумулятора, збільшену потужність зарядних пристроїв та покращену енергоефективність.

Основні зміни між поколіннями наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Порівняння технічних характеристик Hyundai Kona Electric

Характеристика	Перше покоління (2018-2022)		Друге покоління (з 2023 року)	
	Long Range	Standard Range	Long Range	Standard Range
Акумулятор (кВт·год)	64,0	39,2	65,4	48,4
Запас ходу (WLTP), км	450	305	454	377
Запас ходу (EVDB), км	400	270	390	340
Потужність електродвигуна, к.с. (кВт)	204 (150)	136 (100)	218 (160)	156 (115)
Максимальна швидкість, км/год	167	155	170	162
Потужність DC зарядного пристрою, кВт	77		105	
Час заряджання DC (10–80%), хв	~47		~34	
Потужність AC зарядного пристрою, кВт	7,2		11	
Довжина, мм	4180		4355	
Ширина, мм	1800		1825	
Висота, мм	1570		1575	
Колісна база, мм	2600		2660	

Як видно з таблиці 2, друге покоління Hyundai Kona Electric отримало збільшену ємність акумулятора у версії Standard Range (з 39,2 кВт·год до 48,4 кВт·год), що дозволило збільшити запас ходу майже на 70 км за циклом WLTP. У версії Long Range ємність батареї зросла незначно (з 64,0 кВт·год до 65,4 кВт·год), проте це супроводжувалося підвищенням енергоефективності та продуктивності електродвигуна.

Окрім змін у батарейному блоці, суттєво покращено можливості заряджання. Потужність швидкісного заряджання постійним струмом (DC) зросла з 77 кВт до 105 кВт, що дозволило скоротити час зарядки з 47 хв до 34 хв (при заряді від 10 % до 80 %). Також збільшена потужність змінного струму (AC) до 11 кВт замість 7,2 кВт у попередньому поколінні, що дає можливість швидше заряджати автомобіль від стандартних зарядних станцій.

Зміни торкнулися і габаритних розмірів: довжина автомобіля збільшилася з 4180 мм до 4355 мм, а колісна база – з 2600 мм до 2660 мм, що позитивно вплинуло на комфорт пасажирів та місткість багажного відділення.

Конкуренти на ринку.

Hyundai Kona Electric конкурує в сегменті електричних компактних кросоверів. Основними конкурентами є Opel Mokka-e, Peugeot e-2008, DS 3 E-Tense, Citroën ë-C4, Jeep Avenger EV, Kia Niro EV, Kia Soul EV, Chevrolet Bolt та Nissan Leaf e+.

Порівняно з конкурентами, Kona Electric другого покоління має одну з найкращих

швидкостей заряджання завдяки оптимізованій архітектурі акумулятора та підвищеній потужності зарядних пристроїв. Також покращена продуктивність електродвигуна, що забезпечує кращу динаміку руху та енергоефективність.

Висновки щодо розвитку поколінь

Аналіз змін між поколіннями Hyundai Kona Electric показує такі ключові тенденції:

- ефективніший акумуляторний блок, особливо у версії Standard Range, що сприяє збільшенню запасу ходу;
- суттєве зменшення часу заряджання завдяки зростанню потужності DC-зарядки з 77 кВт до 105 кВт;
- покращена потужність AC-зарядного пристрою з 7,2 кВт до 11 кВт, що забезпечує швидше заряджання від змінного струму;
- збільшення габаритних розмірів позитивно вплинуло на комфорт та практичність автомобіля.

Таким чином, Hyundai Kona Electric другого покоління отримав значні покращення у швидкості заряджання, запасі ходу та продуктивності, що робить його конкурентоспроможним у сегменті електричних компактних кросоверів.

Електрична силова установка Kona Electric

Конструктивні особливості силової установки. Hyundai Kona Electric оснащений електричною силовою установкою, яка включає електродвигун, високовольтну акумуляторну

батарею (АКБ), інвертор, систему керування живленням та редукторну трансмісію. Конструкція автомобіля передбачає відсутність традиційної коробки передач, що спрощує обслуговування та підвищує ефективність передачі потужності (рис. 1) [20].

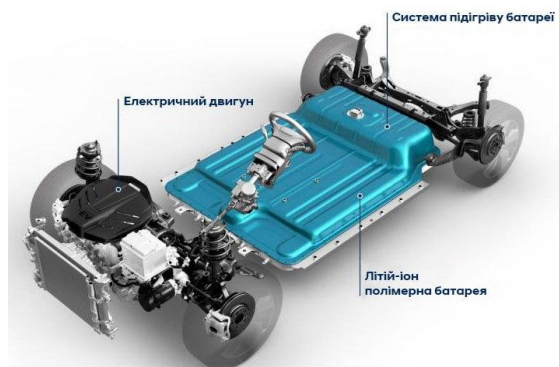


Рис. 1 – Основні компоненти електричної силової установки Hyundai Kona Electric

Основні компоненти силової установки:

- електродвигун – синхронний мотор на постійних магнітах, що забезпечує високу ефективність та моментальний крутний момент.
- інвертор – перетворює постійний струм батареї в змінний для роботи електродвигуна.
- блок керування силовою установкою (VCU) – відповідає за розподіл енергії та контроль роботи всіх електричних вузлів.
- Редукторна трансмісія – передає крутний момент від електродвигуна до ведучих коліс.

Акумуляторна батарея та її характеристики. В автомобілях Hyundai Kona Electric використовується літій-іонна полімерна акумуляторна батарея, що має низький ефект пам'яті та високу щільність енергії. АКБ розміщена під днищем автомобіля, що забезпечує низький центр ваги та покращену керованість.

Основні характеристики акумуляторних батарей Hyundai Kona Electric наведено в таблиці 3. Зміни між поколіннями включають збільшення ємності у версії Standard Range та оптимізацію архітектури акумулятора, що позитивно вплинуло на енергоефективність і запас ходу.

Оновлення другого покоління передбачають оптимізовану архітектуру акумуляторного модуля, що дозволило збільшити ефек-

тивність використання енергії та зменшити втрати при заряджанні (рис. 2).

Таблиця 3 – Характеристики акумуляторної батареї Hyundai Kona Electric

Характеристика	Перше покоління (2018-2022)		Друге покоління (з 2023 року)	
	Standard Range	Long Range	Standard Range	Long Range
Ємність батареї, кВт·год	39,2	64,0	48,4	65,4
Запас ходу (WLTP), км	305	450	377	454
Напруга батареї, В	327	356	358	358
Тип охолодження	Рідинне			



Рис. 2 – Електричний двигун Hyundai Kona Electric / Kia e-Niro

Продуктивність електродвигуна. Hyundai Kona Electric використовує синхронний електродвигун із постійними магнітами, що забезпечує високу ефективність і плавну динаміку руху.

Продуктивність електродвигуна є ключовим фактором у визначенні динамічних характеристик Hyundai Kona Electric. Друге покоління моделі отримало потужніший силовий агрегат, що позитивно вплинуло на прискорення та максимальну швидкість. У таблиці 4 наведено порівняння динамічних характеристик першого та другого покоління автомобіля у версіях Standard Range та Long Range.

Як видно з таблиці 4, потужність електродвигуна зросла у другому поколінні, що дозволило покращити динаміку розгону. У версії Long Range потужність зросла з 150 кВт до 160 кВт, а у Standard Range – зі 100 кВт до 115 кВт. Незважаючи на зменшення крутного моменту у новому поколінні, оптимізована система керування дозволяє підтримувати ефективне використання енергії та стабільну динаміку руху.

Таблиця 4 – Динамічні характеристики Hyundai Kona Electric

Характеристика	Перше покоління (2018-2022)		Друге покоління (з 2023 року)	
	Standard Range	Long Range	Standard Range	Long Range
Потужність, к.с. (кВт)	136 (100)	204 (150)	156 (115)	218 (160)
Крутний момент, Н·м	395	395	255	255
Максимальна швидкість, км/год	155	167	162	170
Розгін від 0 км/год до 100 км/год, с	~9,7	~7,6	~8,8	~7,8

Результати тестувань підтверджують збільшення енергоефективності другого покоління, що забезпечує покращену продуктивність та оптимізовану витрату енергії.

Система рекуперативного гальмування

Kona Electric оснащений інтелектуальною системою рекуперативного гальмування, що дозволяє відновлювати енергію під час уповільнення автомобіля. Водій може налаштувати рівень рекуперації за допомогою підкермових перемикачів (рис. 3) [20].

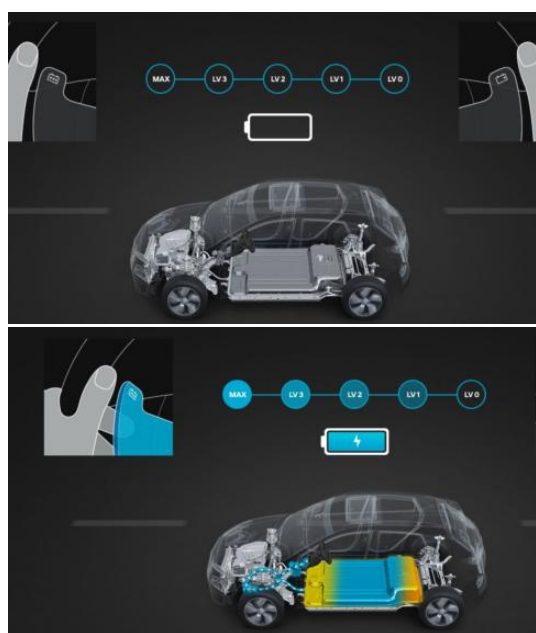


Рис. 3 – Регулювання рекуперативним гальмуванням

Рівні рекуперативного гальмування:

- Рівень 0 – відсутня рекуперація, авто-

мобіль котиться вільно;

- Рівень 1 – мінімальна рекуперація, зменшує втрати енергії;
- Рівень 2 – стандартний баланс між уповільненням та ефективністю;
- Рівень 3 – максимальна рекуперація, що дозволяє керувати автомобілем лише за допомогою акселератора (режим i-Pedal).

Удосконалений режим i-Pedal другого покоління дозволяє повністю зупинити автомобіль без використання гальм, що покращує ефективність руху в міських умовах.

Зарядна архітектура та швидкість заряджання

Ефективність використання електромобіля значною мірою залежить від його зарядної архітектури та швидкості заряджання, рис. 4. Hyundai Kona Electric підтримує зарядку змінним (AC) і постійним (DC) струмом, що дозволяє використовувати як домашні зарядні пристрої, так і швидкісні зарядні станції. У другому поколінні моделі зарядна система була оптимізована, що дозволило скоротити час заряджання та покращити енергоефективність.

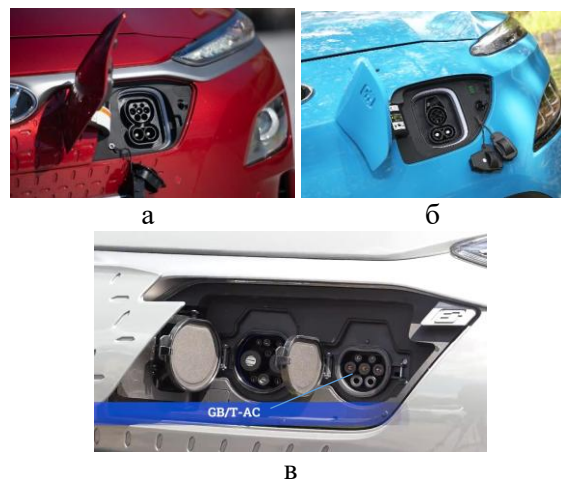
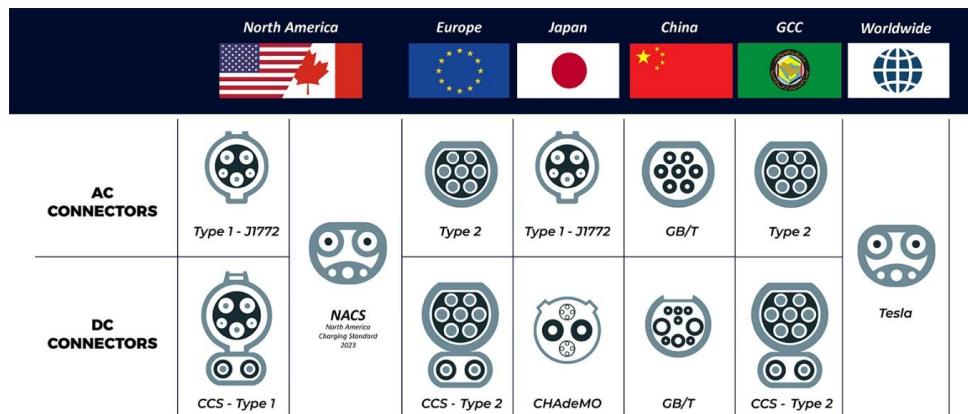


Рис. 4 – Зарядні порти Hyundai Kona Electric: а – CCS2; б – CCS1; в – GB/T

Типи зарядних портів Hyundai Kona Electric залежно від ринку збуту

Hyundai Kona Electric підтримує декілька стандартів зарядних портів, що забезпечує його сумісність із зарядною інфраструктурою різних регіонів. Основними стандартами є CCS Combo 1 та 2, Type 1 (J1772), Type 2 (Mennekes) та CHAdeMO, рис. 5 [22]. Докладний опис кожного з них представлено у розділі «Опис зарядних портів Hyundai Kona Electric».



*GCC – це назва регіонального союзу шести арабських держав на Аравійському півострові: Саудівська Аравія, ОАЕ, Кувейт, Катар, Оман та Бахрейн.

Рис. 5 – Типи зарядних портів для електромобілів в залежності від ринку збуту

Завдяки гнучкій архітектурі зарядки Hyundai Kona Electric адаптований для використання в різних країнах та може легко інтегруватися в існуючу інфраструктуру зарядних станцій.

Зарядження змінним струмом (AC)

Зарядження змінним струмом використовується в побутових умовах та на громадських АС-станціях, що мають потужність від 3,6 кВт до 22 кВт.

У першому поколінні Hyundai Kona Electric максимальна потужність АС-зарядки становила 7,2 кВт, що дозволяло зарядити батарею Long Range (64 кВт·год) приблизно за 9 годин від зарядного пристрою 220 В / 32 А.

У другому поколінні потужність АС-зарядки збільшено до 11 кВт, що скорочує час зарядження до 6 год 55 хв.

Переваги АС-зарядки:

- зручність для нічного зарядження вдома;
- мінімальне навантаження на акумулятор, що подовжує його ресурс;
- відносно низька вартість обладнання для зарядження.

Зарядження постійним струмом та швидкі зарядні станції

Зарядження постійним струмом (DC) використовується на швидкісних зарядних станціях, що дозволяє поповнити заряд акумулятора за короткий час.

У таблиці 5 наведено порівняння характеристик DC-зарядки між поколіннями Hyundai Kona Electric.

Таблиця 5 – Порівняння характеристик зарядної архітектури Hyundai Kona Electric

Характеристика	Перше покоління (2018-2022)	Друге покоління (з 2023 року)
Потужність АС-зарядного пристрою, кВт	7,2	11
Потужність DC-зарядного пристрою, кВт	77	105
Час зарядки DC (10-80%), хв	~47	~34
Сумісні станції, кВт	50, 100, 150	50, 100, 150, 350

Потужність швидкісної зарядки постійним струмом (DC) збільшилася з 77 кВт до 105 кВт, що дало змогу скоротити час зарядження акумулятора з 47 хв. до 34 хв. при використанні потужної швидкісної зарядної станції. Окрім цього, підтримка 11 кВт АС дозволяє ефективніше використовувати громадські зарядні станції змінного струму. Hyundai Kona Electric другого покоління підтримує зарядні станції до 350 кВт, хоча фактична швидкість зарядження обмежена 105 кВт через характеристики батареї.

Ці вдосконалення роблять Hyundai Kona Electric більш зручним для повсякденного використання та подорожей на далекі відстані.

Опис зарядних портів Hyundai Kona Electric

Hyundai Kona Electric підтримує декілька стандартів зарядних портів, що забезпечує його сумісність із зарядною інфраструктурою різних регіонів. У цьому розділі розгля-

нуто основні типи зарядних роз'ємів, їхні особливості та застосування.

Основними типами роз'ємів є J1772 (Type 1), Type 2 (Mennekes), CCS Combo 1, CCS Combo 2 та CHAdeMO, рис. 6 [23, 24].



Рис. 6 – Зарядні конектори

Порт J1772 (Type 1). Порт J1772 (відомий як Type 1) застосовується переважно в Північній Америці, Японії та країнах Азії. Він підтримує заряджання змінним струмом (AC) і використовується для рівня Level 1 (120 В) та Level 2 (240 В), що робить його зручним для домашнього заряджання (рис. 6) [23, 24].

Особливості порту:

- максимальна сила струму: 80 А (поширений варіант – 32 А);
- потужність заряджання: до 7,2 кВт при напрузі 220 В;
- час заряджання: ~3 години на 100 км пробігу; ~9,5 годин для повного заряду акумулятора Hyundai Kona Electric.

Недоліки J1772:

- Підтримує лише однофазне заряджання, що обмежує потужність.
- у Європі він майже не зустрічається, оскільки там стандартним роз'ємом є Type 2;
- в Україні на початковому етапі розвитку електротранспорту J1772 був одним із основних роз'ємів для AC-заряду, проте з кожним роком таких зарядних станцій стає все менше.

Через ці обмеження більшість сучасних електромобілів для європейського ринку використовують Type 2 або CCS Combo 2.

Порт Type 2 (Mennekes). Порт Type 2 є найпоширенішим у Європі, Великобританії та країнах Близького Сходу. Він розроблений для заряджання змінним струмом (AC) і підтримує як однофазне, так і трифазне підключення.

Особливості порту:

- максимальна потужність зарядки:
- однофазне підключення – 7,4 кВт;
- трифазне підключення – до 22 кВт

Вибір стандарту впливає на швидкість заряджання, сумісність із зарядною інфраструктурою та можливість використання як змінного (AC), так і постійного струму (DC).

(3×7,4 кВт);

- Час заряджання:
- ~1 година для пробігу 100 км;
- ~6 годин для повного заряду Hyundai Kona Electric другого покоління.

Type 2 має кілька переваг над J1772:

- може використовувати трифазне підключення, що значно скорочує час заряджання;
- став основним стандартом у Європі для AC-заряду;
- підтримується в Hyundai Kona Electric другого покоління, тоді як перше покоління випускалося з однофазним AC-портом.

Однак варто зазначити, що не всі електромобілі підтримують зарядні пристрої на 22 кВт. Наприклад: Tesla, Audi e-tron – можуть заряджатися на 22 кВт; Porsche Taycan у базовій версії – зарядний пристрій на 11 кВт (22 кВт доступний тільки у топових комплектаціях).

Таким чином, Hyundai Kona Electric із портом Type 2 сумісний з більшістю європейських AC-станцій, що забезпечує швидке та ефективне заряджання.

CCS Combo (Type 1 та Type 2). Стандарт CCS (Combined Charging System) є найпоширенішим у Європі та США і підтримує як змінний струм (AC), так і швидкісне заряджання постійним струмом (DC):

- CCS Combo 1 (CCS1) використовується в США, Канаді, Кореї.
- CCS Combo 2 (CCS2) є стандартом для Європи, Великобританії, України.

CCS – це розширена версія Type 1 або Type 2, яка має два додаткові контакти для заряджання постійним струмом (DC).

Переваги CCS:

- можливість заряджатися від АС-станцій через верхній роз'єм (Type 1 або Type 2);
- можливість заряджатися від DC-

станцій через нижній роз'єм CCS Combo (рис. 7);
підтримка високої потужності DC-зарядки (від 50 до 350 кВт).



Рис. 7 – Зарядні станції для електромобілів постійним струмом (DC)

CCS дозволяє підключати електромобіль до стаціонарних зарядних станцій, які передають енергію безпосередньо в батарею, минаючи бортовий зарядний пристрій.

У CCS роз'єми бувають першого та другого покоління:

- перше покоління – підтримує до 200 А;
- друге покоління – підтримує до 500 А (актуально для зарядок 800 В).

Hyundai Kona Electric другого покоління підтримує заряджання через CCS Combo 2, що робить його сумісним з більшістю швидкісних зарядних станцій в Україні.

Вдосконалена 800 В архітектура

Окрім стандартних 400 В систем, у сучасних електромобілях впроваджується 800 В архітектура, що має низку переваг:

- більш швидке заряджання – скорочує час зарядки удвічі;
- менший струм при однаковій потужності – зменшує навантаження на батарею;
- зниження теплового навантаження на АКБ, що подовжує її термін служби.

800 В архітектура використовується в Hyundai Ioniq 5, Kia EV6, Porsche Taycan, Lucid Air, Tesla Cybertruck та інших електромобілях нового покоління.

Однак Hyundai Kona Electric працює на стандартній 400 В платформі, що означає обмеження у швидкості заряджання в порівнянні з 800 В системами.

Оптимізація процесу заряджання Hyundai Kona Electric

Оскільки ефективність заряджання електромобіля залежить не лише від стандарту зарядного порту, а й від параметрів зарядної станції, температурних умов та характеристик акумуляторної батареї, доцільно розглянути ключові фактори, що впливають на швидкість та стабільність заряджання Hyundai Kona Electric.

Проведені дослідження заряджання Hyundai Kona Electric першого покоління показали, що максимальна швидкість заряду досягається при температурі батареї 25-30°C (рис. 8):

- при заряді 50% потужність заряджання становить 77 кВт (згідно з панеллю приладів Kona Electric);
- зарядна станція фіксує 75,5 кВт, що пояснюється особливостями алгоритмів роботи контролера;
- навколишня температура під час тесту становила -8°C, що підкреслює важливість термоменеджменту батареї для швидкого заряджання.

Таким чином, ефективне заряджання Hyundai Kona Electric залежить від температури батареї, потужності зарядної станції та характеристик бортового зарядного пристрою.

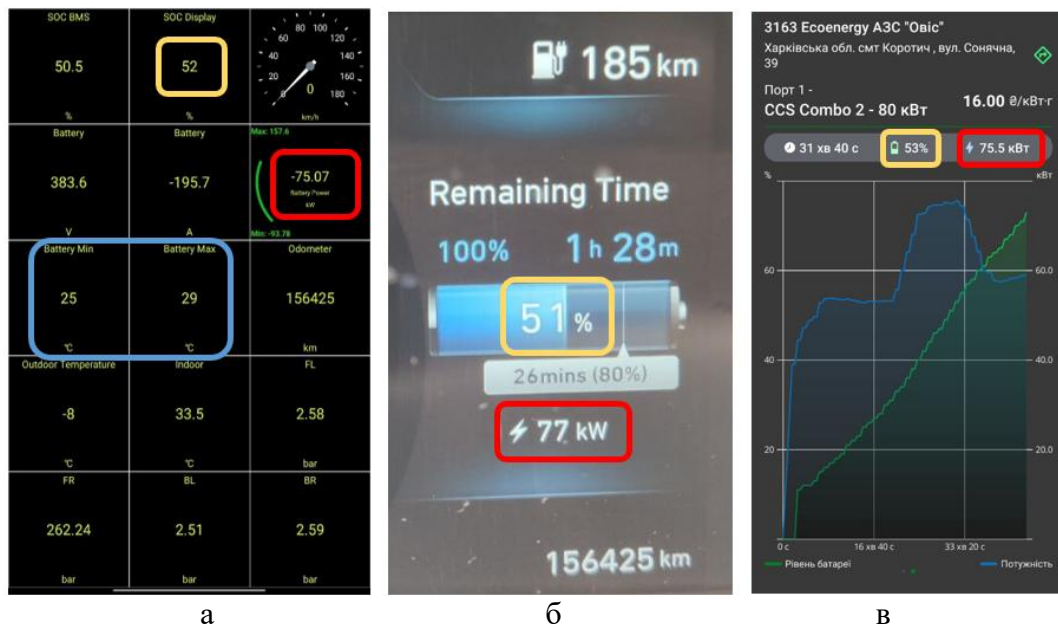


Рис. 8 – Заряд електромобіля Hyundai Kona Electric 1-го покоління випуску: а – показники сканеру Car Scanner ELM OBD2; б – показники панелі приладів Kona Electric; в – графік зарядної сесії Kona Electric

Характеристики акумуляторної батареї Hyundai Kona Electric

Hyundai Kona Electric оснащений літій-іонною акумуляторною батареєю (АКБ) з рідинним охолодженням, що забезпечує стабільну продуктивність, оптимальну робочу температуру та високу енергоефективність. У другому поколінні моделі оновлено архітектуру акумуляторного модуля, що дозволило збільшити запас ходу та покращити швидкість заряджання.

Для повного розуміння процесу заряджання електромобіля необхідно розглянути поняття ємності акумуляторної батареї, яка є однією з найважливіших технічних характеристик.

Ємність акумулятора визначає максимальну кількість електроенергії, яка накопичується в АКБ за повний цикл зарядки. вона вимірюється в А·год та кВт·год, що дозволяє оцінити запас енергії для роботи електродвигуна.

Номінальна ємність визначається за формулою:

$$Q = I \cdot t, \quad (1)$$

де Q – ємність акумулятора, А·год; I – постійний струм розряду акумулятора, А; t – час розряду батареї, год.

Величина електричної енергії, яка накопичена АКБ визначається як добуток показників сили струму заряду, напруги батареї і часу протікання цього струму:

$$W = I \cdot U \cdot T, \quad (2)$$

де W – енергія, що накопичує батарея, Дж; U – напруга акумулятора, В; I – постійний струм розряду акумулятора, А; t – час розряду акумулятора, год.

З урахуванням формули (1), електрична енергія, яка накопичена АКБ може бути визначена, як:

$$W = Q \cdot U, \quad (3)$$

де W – енергія, що накопичує батарея, Вт·год; Q – ємність акумулятора, А·год; U – напруга акумулятора, В.

При послідовному підключенні декількох акумуляторів однакової ємності, загальний показник даної зв'язки дорівнює сумі ємності всіх АКБ, що входить до її складу. В такому випадку енергія отриманого акумуляторного блоку визначиться, як перемноження електроенергії однієї батареї на їх кількість, рис. 9 [26].

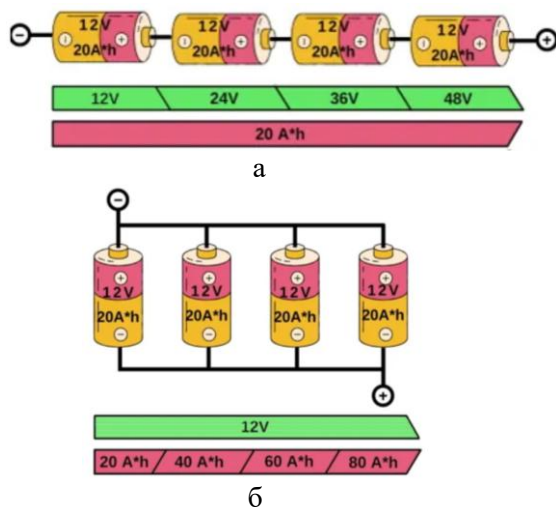


Рис. 9 – Схеми з'єднання акумуляторів: а – послідовне з'єднання АКБ; б – паралельне з'єднання АКБ

Ємність акумуляторної батареї та запас ходу

АКБ Hyundai Kona Electric представлена у двох варіантах: Standard Range та Long Range. Основні характеристики акумуляторних батарей першого та другого покоління наведені в таблиці 6.

Таблиця 6 – Порівняння характеристик акумуляторних батарей Hyundai Kona Electric

Характеристика	Перше покоління (2018-2022)		Друге покоління (з 2023 року)	
	Standard Range	Long Range	Standard Range	Long Range
Ємність батареї, кВт·год	39,2	64,0	48,4	65,4
Корисна ємність, кВт·год	~37,0	~62,0	~46,0	~63,0
Запас ходу (WLTP), км	305	450	377	454
Споживання енергії, кВт·год/100 км	14,3	15,0	14,7	15,7
Напруга батареї, В	327	356	358	358
Тип охолодження	рідинне			

Батарея Hyundai Kona Electric другого покоління має оптимізовану конструкцію та збільшену щільність енергії, що дозволило:

- збільшити ємність Standard Range на 23 %, що дало приріст запасу ходу на 72 км;

- покращити ефективність батареї, що зменшило середнє споживання енергії.

Технологічні особливості акумуляторної батареї

АКБ Hyundai Kona Electric має кілька важливих технічних характеристик, які забезпечують її надійність та довговічність:

- тип акумуляторних осередків: літій-іонний полімер (NMC – нікель-марганець-кобальт);
- охолодження: рідинне активне, що дозволяє контролювати температуру та запобігати перегріву;
- оптимізація роботи системи керування батареєю (BMS): забезпечує балансування осередків для рівномірного розряду та мінімізує деградацію АКБ.

Вдосконалена система керування батареєю у другому поколінні має покращені алгоритми енергозбереження, що дозволяє:

- оптимізувати використання ємності акумулятора залежно від умов експлуатації;
- покращити ефективність рекуперативного гальмування, що зменшує втрати енергії.

Розрахунок потрібної ємності акумулятора

Розрахунок спожитої потужності здійснюється в Вт, а ємність батареї, наприклад, для системи заряду електромобіля, або джерела безперебійного живлення (ДБЖ) – в А·год. Щоб розрахувати необхідну ємність акумуляторів для таких систем, необхідно провести нескладні підрахунки. Для кращого розуміння розглянемо конкретний приклад.

Припустимо, є навантаження, що споживає 1000 Вт, що вимагає резервування протягом 3 год. Так як величина накопиченої енергії залежить не тільки від ємності батареї, але і від її напруги, то потрібно загальну потужність (1000 Вт) поділити на робочу напругу акумуляторів.

Отже, величина необхідної ємності акумуляторної батареї визначається [24]:

$$Q = (P \cdot t) / (V \cdot k) \quad (4)$$

де Q – потрібна ємність акумуляторної батареї, А·год; P – потужність споживача, Вт; V – номінальна напруга акумуляторної батареї, В; T – час автономної роботи, год; k – коефі-

цієнт використання ємності, що враховує допустиму частку ємності, яку реально можна використовувати.

Запровадження коефіцієнта k зумовлене тим, що акумуляторна батарея може бути заряджена не повністю, а також тим, що глибокий розряд значно зменшує її строк служби. Наприклад, нова свинцево-кислотна батарея, що регулярно розряджається лише на 30 % від повної ємності перед наступним зарядом, здатна витримати приблизно 1000 таких циклів. Водночас, якщо глибина розряду зростає до 70 %, кількість можливих циклів знижується до близько 200 [27].

Отже, отримуємо, що для живлення даного навантаження протягом зазначеного періоду часу, якщо вибрати 12-вольтні акумулятори:

$$Q = (1000 \cdot 3) / (12 \cdot 0,7) = 357,1 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Це мінімально необхідна ємність АКБ для розглянутого випадку. В ідеалі краще брати джерело енергії з невеликим запасом (близько 20%) для того, щоб кожного разу не розряджати його повністю - це допоможе зберегти робочі характеристики АКБ протягом якомога більшого періоду часу.

$$Q = 357,1 \cdot 1,2 = 428,5 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Отже, для вирішення поставленого завдання необхідно мати 12-вольтні акумулятори сумарною ємністю не менше 429 А·год.

Вплив температури на ефективність батареї

Робоча температура акумулятора значно впливає на його продуктивність, швидкість заряджання та запас ходу. Дослідження показують такі тенденції:

- при температурі +25°C акумулятор працює в оптимальному режимі, що забезпечує максимальний запас ходу;
- при температурі -10°C запас ходу може зменшуватися на 15-20 % через збільшення енергоспоживання на обігрів батареї та салону;
- при температурі вище +35°C система охолодження активніше споживає енергію, що також може впливати на запас ходу.

У другому поколінні Hyundai Kona Electric впроваджено функцію попереднього кондиціонування батареї (Battery

Preconditioning), яка дозволяє:

- підтримувати оптимальну температуру осередків перед заряджанням;
- зменшити втрати енергії при низьких і високих температурах;
- скоротити час заряджання в холодну погоду.

Час заряджання в залежності від ємності батареї

Збільшення ємності батареї у другому поколінні вимагало вдосконалення системи заряджання. Основні показники часу зарядки наведено в таблиці 7.

Таблиця 7 – Час заряджання акумуляторної батареї Hyundai Kona Electric

Характеристика	Перше покоління (2018-2022)	Друге покоління (з 2023 року)
Потужність АС-зарядного пристрою, кВт	7,2	11
Потужність DC-зарядного пристрою, кВт	77	105
Час зарядки DC (10-80%), хв	~47	~34
Час зарядки АС (0-100%), год	~9	~6,5

Завдяки збільшенню потужності DC-зарядки у другому поколінні:

- зменшено час зарядки з 47 до 34 хв на станціях 150 кВт;
- збільшено потужність АС-зарядного пристрою до 11 кВт, що скорочує зарядку вдома з 9 до 6,5 год.

Висновки щодо акумуляторної батареї Hyundai Kona Electric

Оновлення батареї у другому поколінні Hyundai Kona Electric забезпечило такі переваги:

- збільшення ємності АКБ та покращення щільності енергії, що дало приріст запасу ходу;
- вдосконалення системи керування батареєю, що покращило її продуктивність та подовжило термін служби;
- оптимізація температурного режиму, що дозволяє досягти стабільної роботи в різних кліматичних умовах;
- скорочення часу зарядки, що робить

електромобіль більш зручним для користувачів.

Завдяки цим покращенням Hyundai Kona Electric другого покоління отримав ефективнішу, довговічнішу та зручнішу у використанні акумуляторну батарею, що робить його ще більш привабливим серед електромобілів свого класу.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено наступне:

- Hyundai Kona Electric другого покоління отримав покращену акумуляторну батарею, що забезпечує більшу ємність та збільшений запас ходу;
- застосована оптимізована система керування батареєю (BMS), яка покращує балансування осередків та зменшує деградацію акумулятора;
- впроваджена підтримка заряджання змінним струмом (AC) з потужністю 11 кВт та постійним струмом (DC) з потужністю 105 кВт, що скорочує час зарядки;
- проаналізовано сумісність зарядних портів Hyundai Kona Electric із зарядною інфраструктурою в різних регіонах, визначено основні стандарти зарядних роз'ємів;
- визначено, що оптимальний температурний режим акумулятора (25-30°C) дозволяє досягати максимальної швидкості заряджання та зменшити втрати енергії при низьких і високих температурах;
- температурний режим є одним із ключових факторів, що впливають на експлуатацію акумуляторної батареї. Відхилення від оптимального діапазону температур може знижувати швидкість заряджання та спричиняти прискорену деградацію акумуляторних елементів.

Отримані результати показують, що Hyundai Kona Electric є конкурентоспроможним електромобілем, здатним ефективно використовувати сучасні зарядні технології. Результати дослідження можуть бути корисними для споживачів, розробників зарядної інфраструктури та виробників акумуляторних систем.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Zoryna, T. G., Aliaksandrovich, S. A., Valeeva, Y. S., Kalinina, M. V., Ilikova, L. E., & Suvonovich, E. Y. (2022, June). Measures to stimulate the development of electric transport as a tool for the development of the territory. In 2022 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE) (pp. 1-7). IEEE.
2. Plakhtii, O., Prokhorova, V., Bagach, R., Zhuchenko, O., Yermilova, N., & Perets, K. (2023, October). Research of Accumulator Blocks of Electric Vehicles and Charging Station Based on Current Source Rectifier. In 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (pp. 1-6). IEEE.
3. Arhun, S., Migal, V., Hnatov, A., Ponikarovska, S., Hnatova, H., & Novichonok, S. (2020). Determining the Quality of Electric Motors by Vibro-Diagnostic Characteristics. EAI Endorsed Trans. Energy Web, 7(29), e6.
4. Joshi, A., Sharma, R., & Baral, B. (2022). Comparative life cycle assessment of conventional combustion engine vehicle, battery electric vehicle and fuel cell electric vehicle in Nepal. Journal of Cleaner Production, 379, 134407.
5. Arhun, S., Hnatov, A., Sokhin, P., & Kunicina, N. (2025). Autonomous Power Sources for Electric Vehicles and Their Charging Infrastructure. Energy Storage, 7(1), e70121.
6. Hnatov, A., Arhun, S., Sokhin, P., & Ulianets, O. (2024). Research of the main electromagnetic parameters during the operation of an AC charging station for electric vehicles. Automobile Transport, (54), 42–50. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2024.54.0.05>
7. Arhun, S., Hnatov, A., Hnatova, H., Patlins, A., & Kunicina, N. (2020, November). Problems that have arisen in universities in connection with COVID-19 on the example of the Double Degree Master's Program "Electric Vehicles and Energy-Saving Technologies". In 2020 IEEE 61th international scientific conference on power and electrical engineering of Riga Technical university (RTUCON) (pp. 1-6). IEEE.
8. Zabasta, A., Peuteman, J., Kunicina, N., Kazymyr, V., Hvesenya, S., Hnatov, A., ... & Ribickis, L. (2020). Research on cross-domain study curricula in cyber-physical systems: A case study of Belarusian and Ukrainian Universities. Education Sciences, 10(10), 282.
9. Borodenko Y. M., Hnatov A. V., Arhun S. V., Sokhin P. A. (2023) Energy aspects of automobile transport development. Automobile Transport, (53). P.37-50. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2023.53.0.05
10. Аргун, ІІ. В., Гнатів, А. В., & Ульянець, О. А. (2016). Екологічний та енергоефективний

- атомобільний транспорт та його інфраструктура. № 2 (77), 18–27. Argun, Sh. V., Hnatov, A. V., & Ulianets, O. A. (2016). Ekolo-hichniy ta enerhoefektyvnyi avtomobilnyi transport ta yoho infrastruktura [Ecological and energy-efficient automotive transport and its infrastructure]. No. 2 (77), 18–27. [in Ukrainian]
11. Haiyan, Z., Dawei, C., & Yu, L. (2022, April). Research on key influencing factors of endurance mileage of battery electric vehicle. In 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE) (pp. 235-239). IEEE.
 12. Kremzow-Tennie, S., Hellwig, M., & Pautzke, F. (2020, December). A study on the influencing factors regarding energy consumption of electric vehicles. In 2020 21st International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM) (pp. 1-6). IEEE.
 13. Linru, J., yuanxing, Z., taoyong, L., xiaohong, D., & jing, Z. (2020, December). Analysis on charging safety and optimization of electric vehicles. In 2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC) (pp. 2382-2385). IEEE.
 14. Lv, X., Chang, X., Wang, J., Li, D., & Meng, X. (2023, December). Research on Charging Control of Electric Vehicle Charging Station Based on New Energy Consumption. In 2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2) (pp. 76-80). IEEE.
 15. Zheng, K., Teng, S., & Zhao, Y. (2023, July). Research on Optimal Scheduling Strategy for Electric Vehicle Charging and Discharging Based on Time-of-Use Electricity Price. In 2023 6th Asia Conference on Energy and Electrical Engineering (ACEEE) (pp. 519-524). IEEE.
 16. Chen, F., Li, F., Hong, R., Guo, M., Dai, Z., & Mo, R. (2022, February). Research on sequential charging control strategy considering charging continuity of electric vehicle. In 2022 12th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE) (pp. 96-101). IEEE.
 17. Wang, D., Shi, Q., Kong, W., & Dai, H. (2023, December). Research on the Development of Electric Vehicles and Vehicle to Grid. In 2023 4th International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems (AEES) (pp. 614-619). IEEE.
 18. Miao, T., Zhang, W., Zhou, Y., & Xiao, J. (2024, June). Research on the hierarchical scheduling model of Vehicle-to-grid electric vehicles. In 2024 6th International Conference on Energy Systems and Electrical Power (ICESEP) (pp. 1478-1481). IEEE.
 19. Zhichun, Y., Yu, S., & Fan, Y. (2021, December). Research on Orderly Charging Strategy of Electric Vehicles Based on Intelligent Fusion Terminal. In 2021 International Conference on Power System Technology (POWERCON) (pp. 2210-2214). IEEE.
 20. Представляємо абсолютно нову KONA другого покоління. (n.d.). <https://hyundai.com.ua/node/5518/> Predstavliaiemo absoliutno novu KONA druhoho pokolinnia. (n.d.). [Introducing the all-new second-generation KONA]. <https://hyundai.com.ua/node/5518/> [in Ukrainian].
 21. Тест Hyundai Kona Electric – офіційний і далекобійний. (n.d.). <https://hyundai.com.ua/node/2804> Test Hyundai Kona Electric – ofitsiinyi i dalekobiinyi. (n.d.). [Hyundai Kona Electric test – official and long-range]. <https://hyundai.com.ua/node/2804> [in Ukrainian].
 22. EV charging connectors: A comprehensive guide. (n.d.). *MAAS Middle East*. <https://maas-middleeast.com/ev-charging-connectors-a-comprehensive-guide/>
 23. Patlins, A., Kunicina, N., Hnatov, A., Arhun, S., & Hnatova, H. (2020). Development of a complex for laboratory and practical works based on a solar charging station for electric vehicles. In Transport Means-Proceedings of the International Conference (pp. 187-192).
 24. CCS, CHAdeMO, Type2, GB/T, SAE J1772 та інші літери: розбираємо стандарти зарядок. (n.d.). <https://nextcar.ua/news/ccs-chademo-type2-gbt-sae-j1772-i-drugie-bukvy-razbiraem-standarty-zaryadok/> CCS, CHAdeMO, Type2, GB/T, SAE J1772 ta inshi litery: rozbyraiemo standarty zaryadok. (n.d.). [CCS, CHAdeMO, Type2, GB/T, SAE J1772 and other letters: Understanding charging standards]. <https://nextcar.ua/news/ccs-chademo-type2-gbt-sae-j1772-i-drugie-bukvy-razbiraem-standarty-zaryadok/> [in Ukrainian].
 25. Що таке ємність акумулятора. (n.d.). <https://elektrovoz.com.ua/ua/blog/chto-takoe-emkost-akkumuljatora.html> Shcho take emnist akumuljatora. (n.d.). [What is battery capacity?]. <https://elektrovoz.com.ua/ua/blog/chto-takoe-emkost-akkumuljatora.html> [in Ukrainian].
 26. Схеми з'єднання акумулятора. (n.d.). <https://www.elwinn.com.ua/skhemy-soyedeneniya-akkumulyatora/> Skhemy z'iednannia akumuljatora. (n.d.). Battery connection diagrams. <https://www.elwinn.com.ua/skhemy-soyedeneniya-akkumulyatora/> [in Ukrainian]
 27. Миколайчук, І. П., & Стаценко, Д. В. (2020). Розрахунок та дослідження екологічного персонального транспортного засобу. І Всеукраїнська конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Інноватика в освіті, науці та бізнесі: виклики та можливості», 290–294. Mykolaichuk, I. P., & Statsenko, D. V. (2020).

Rozrakhunok ta doslidzhennia ekolohichnoho personalnoho transportnoho zasobu [Calculation and research of environmental personal vehicle]. I All-Ukrainian Conference of Higher Education Applicants and Young Scientists "Innovation in Education, Science and Business: Challenges and Opportunities", 290–294. [in Ukrainian]

Аргун Щасяна Валіковна¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451, e-mail: shasyana@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Гнатів Андрій Вікторович¹, д.т.н., проф., завідувач каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0667430887, e-mail: kalifus76@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Ульянець Ольга Анатоліївна¹, асистент каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0957336312, e-mail: olga.ulyanets@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9384-4557>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Research on the main technical characteristics and charging methods of the Hyundai Kona Electric

Abstract. Problem. The growing adoption of electric vehicles (EVs) necessitates an in-depth analysis of their technical characteristics and charging capabilities to ensure their efficient operation and integration into existing infrastructure. The Hyundai Kona Electric, as a compact crossover EV, has undergone significant improvements across its generations, particularly in battery capacity, charging speed, and power management efficiency. However, a systematic study comparing these changes and their impact on vehicle performance remains limited. **Goal.** This study aims to analyze the main technical characteristics and charging methods of the Hyundai Kona Electric to assess its operational capabilities, energy efficiency, and compatibility with charging infrastructure. A comparative analysis of the vehicle's generations is conducted, focusing on battery evolution, energy consumption improvements, and the efficiency of different charging methods. The research is based on the examination of technical documentation, scientific publications, and experimental studies to provide a comprehensive evaluation of the Hyundai Kona Electric's technological advancements. **Methodology.** The study is based on a comparative analysis of battery specifications, energy efficiency, and charging speed between different Hyundai Kona Electric generations. Various charging standards are examined, including Type 1 (J1772), Type 2

(Mennekes), CCS Combo 1 and 2, and CHAdeMO, considering their compatibility with home and public charging stations. Additionally, the impact of battery temperature on charging performance is evaluated to determine optimal operational conditions. **Results.** The findings highlight notable improvements in the second-generation Hyundai Kona Electric, including an increased battery capacity (65.4 kWh for the Long Range version) and extended driving range. The introduction of an optimized Battery Management System (BMS) enhances cell balancing and reduces battery degradation. Furthermore, the new model supports AC charging at 11 kW and DC fast charging at 105 kW, significantly reducing charging time compared to the previous generation. It is determined that maintaining a battery temperature range of 25–30°C optimizes charging efficiency and minimizes energy losses. **Originality.** This research provides a comprehensive evaluation of the technological progression of Hyundai Kona Electric, offering insights into improvements in battery technology and charging efficiency. It introduces an analytical framework for assessing the impact of battery capacity, temperature, and charging infrastructure on EV performance. **Practical value.** The results of this study are valuable for electric vehicle consumers, charging infrastructure developers, and battery manufacturers. The insights contribute to optimizing the charging process, selecting appropriate infrastructure, and improving user awareness regarding the efficient operation of Hyundai Kona Electric. This research supports the broader goal of accelerating EV adoption and advancing sustainable transportation solutions.

Key words: Hyundai Kona Electric, battery capacity, charging efficiency, Battery Management System, CCS, energy consumption, electric vehicle infrastructure.

Shchasyana Arhun¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0993780451, e-mail: shasyana@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Andrii Hnatov¹, professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department, tel. +38 0667430887, e-mail: kalifus76@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Olha Ulianets¹, assistant professor of Vehicle Electronics Department, tel. +38 0957336312, e-mail: olga.ulyanets@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9384-4557>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Оцінка функціональності мобільних застосунків для взаємодії з зарядною інфраструктурою електромобілів в Україні

Бондаренко Д.І.¹, Дзюбенко О.А.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. В статті досліджуються мобільні застосунки, що використовуються для пошуку та вибору зарядних хабів електромобілів в Україні. Проведено оцінку функціональності та проаналізовано інформативність застосунків-агрегаторів та застосунків мереж зарядних станцій. Результати показують, що існує незначний розрив в функціональності застосунків, а інформація застосунків-агрегаторів не співпадає з даними застосунків мереж. Дослідження дозволяє виявити недоліки формування зарядної інфраструктури електромобілів та визначити напрямки їх усунення.

Ключові слова: електромобіль, зарядна інфраструктура, мобільний застосунок, застосунок-агрегатор, застосунок зарядної мережі, функціональність, інформативність, планування маршруту.

Вступ

Екосистема електричного транспорту зазнає сталого розвитку. Розробляються не тільки нові транспортні засоби - удосконалюється елементна база, технології виробництва, зарядна та сервісна інфраструктура. Ведеться пошук принципово нових джерел живлення [1]. Взаємодія зарядної станції та електромобіля є частиною зарядної інфраструктури. В цій частині процес забезпечує інтерфейс користувача – мобільний застосунок, завдяки якому впорядковується заряджання електричного транспортного засобу [2].

Аналіз публікацій

При аналізі досвіду запровадження електричного транспорту в Нідерландах - країні, яка є світовим лідером в цьому напрямку, - мобільні та інтернет-застосунки визначено як заходи додаткового стимулювання розвитку галузі, які спрощують отримання споживачем актуальної інформації про зарядну інфраструктуру [3].

Прогнозується, що інтелектуальні системи можуть допомогти підтримати впровадження електромобілів, особливо в країнах, де галузь тільки розвивається [4].

Сьогодні в Україні використовуються застосунки не тільки іноземних, а й вітчизняних розробників. Вітчизняні розробки підтримують гідну конкуренцію, навіть з урахуванням того, що для нашої країни електричний транспорт є, відносно, новою галуззю. На думку вчених [5] розвинений ІТ- сектор нашої країни має враховуватися як сильна сторона при аналізі перспектив розвитку електротранспорту.

В ході досліджень науковцями визначено основні напрями використання мобільних застосунків [6], зокрема:

- функціональна панель, яка дозволяє керувати процесом заряджання транспортного засобу, а також надає інформацію про доступність та вартість заряджання;
- планування маршруту враховуючи оптимальне розташування зарядних станцій;
- сплата вартості заряджання;
- можливість надавати відгуки за результатами користування послугою.

За результатами опитування [7] було виявлено та ранжовано потреби, яким має відповідати мобільний застосунок для заряджання електромобіля (Рис. 1).

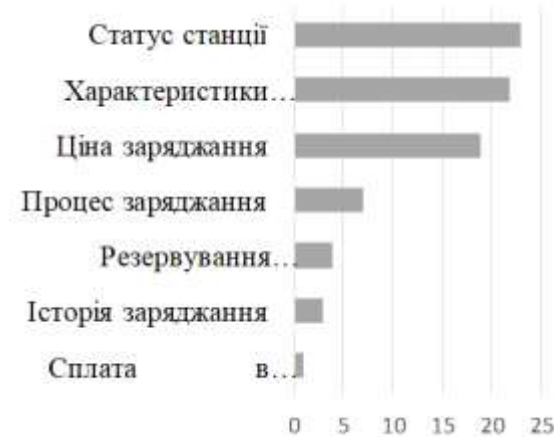


Рис. 1. Потреби, яким мають відповідати мобільні застосунки [7]

Інші дослідження показали, що через велику кількість застосунків, які пропонують різні рівні функціональності та сумісності, користувачі електромобілів часто стикаються з плутаниною. Складні інтерфейси, повільний час відгуку та неточні дані про наявність зарядних станцій або ціни, перешкоджають процесу заряджання. Багатьом застосункам бракує інтуїтивно зрозумілої навігації, що ускладнює користувачам пошук важливої інформації про типи зарядних пристроїв, статус у режимі реального часу або варіанти оплати. В результаті те, що мало б бути простим процесом, перетворюється на складне та трудомістке завдання і це перешкоджає впровадженню електромобілів [8].

Щодо інформаційної наповненості застосунків, встановлено наступне: застосунки зарядних мереж мають більш вузьку інформацію, зазвичай, про розташування та характеристики зарядних станцій лише однієї мережі, а застосунки-агрегатори надають дані багатьох мереж. Натомість, точність інформації застосунків зарядних мереж вища, оскільки вона виходить від власника, а відомості агрегатора, в значній частині, формуються за рахунок коментарів, відгуків та фотографій користувачів, тому вони не такі надійні та актуальні [9].

В пошуках вирішення проблеми був проведений аналіз більш ніж 300 мобільних

застосунків, які пропонуються на App Store в Німеччині. Те, наскільки застосунок відповідає очікуванням користувачів, визначалося по рейтингу на платформі. В результаті було запропоновано створення маркету сервісів на зарядній станції (the service store at the charging station), за наявності якого, споживач може зарядити автомобіль на будь-якій обраній станції, незалежно від її мережевої приналежності. Дослідники зазначили, що одним з кроків має бути створення спеціальної мобільної платформи [10], яка візьме на себе, зокрема, функції інформування про стан зарядної станції та прокладення маршруту до неї.

Розвиток мобільних рішень полягає у використанні застосунків, в якості складової «розумної» системи заряджання для створення профілю користувача, який використовуватиметься системою для управління зарядною інфраструктурою та ресурсами [11].

На даному етапі, оцінка функціональності та аналіз інформативності мобільних застосунків необхідна для з'ясування стану справ в цьому питанні та дозволить визначити подальший напрямок не тільки в їх розробці, а в розвитку зарядної інфраструктури в цілому.

Мета та постановка задачі

Ціллю роботи є оцінка функціональності та аналіз інформативності мобільних застосунків, які використовуються в Україні.

Для оцінки функціональності застосунків запропоновано наступну методику: за кожен основну функцію, яку забезпечує застосунок, присвоюється один бал, загальний результат визначатиметься сумою балів. Більша сума свідчатиме про більшу функціональність.

Контекстну реалізацію всіх застосунків для заряджання електромобілів виконано у вигляді географічної мапи, на якій умовними символами позначено розташування зарядних станцій та їх характеристики.

За змістом застосунки бувають двох типів: агрегатори та застосунки певних зарядних мереж.

Агрегатори пропонують карту зарядних станцій різних операторів, застосунки зарядних мереж виглядають як мапа зарядних станцій, на якій вказані зарядні станції однієї зарядної мережі.

Аналіз інформативності застосунків буде виконано шляхом нарративного порівняння інформації, яку надають агрегатори та інформації з застосунків зарядних мереж стосовно зарядних станцій на визначеній локації.

Оцінка інформативності мобільних застосунків

Основні функції, які можуть виконувати застосунки-агрегатори:

- *Фільтр*: фільтрування зарядних станцій по типу зарядного роз'єму, виду струму та потужності, відповідно до технічних характеристик транспортного засобу;

- *Маршрут*: прокладення маршруту (пропозиції зарядних станцій за маршрутом руху) відповідно заданих користувачем умов: рівень заряду силової батареї на початку та в кінці маршруту, температури навколишнього середовища, стану дороги, пріоритетів – швидка подорож або комфортне заряджання, наявність необхідних інфраструктурних об'єктів на маршруті (готель, крамниця, ресторан, СТО, тощо);

- *Прогноз*: прогнозне визначення часу руху, часу, витраченого на заряджання та суми, яку доведеться сплатити за заряджання;

- *Рейтинг*: рейтингова система зарядних станцій, сформована за відгуками користувачів;

- *Відгуки*: користувач має можливість надавати змістовні відгуки щодо стану станцій та процесу заряджання автомобіля.

Основні функції, які може виконувати застосунок зарядної мережі:

- *Фільтр*: фільтрування станцій по типу зарядного роз'єму, виду струму та потужності;

- *Маршрут*: прокладання маршруту від місця знаходження користувача до обраної станції;

- *Стан*: відображення стану зарядних портів (вільно, зайнято) на обраній станції та можливість дистанційного резервування зарядного порту;

- *Рейтинг*: якщо мережа налічує значну кількість зарядних станцій - рейтингова система зарядних станцій, сформована за відгуками користувачів;

- *Відгуки*: користувач має можливість надавати змістовні відгуки щодо стану станцій та процесу заряджання автомобіля.

1. PlugShare

Мобільний застосунок PlugShare обслуговує компанія PLUGSHARE LLC (teamagent@recargo.com, 11835 W Olympic Blvd Los Angeles, CA 90064 United States +1 562-632-5591). Мобільний застосунок реалізовано на платформах: IOS, Android. Його можна використовувати в автомобілі з Android Auto та CarPlay.

Програма має понад 1 млн. завантажень з Google Play та рейтинг 4,8 з 5 за 41,5 тис. відгуків [30]. На App Store рейтинг застосунку складає 4,8 з 5 за 7,7 тис. оцінок [15]. За типом цей застосунок – агрегатор зарядних станцій.

За описом, наведеним на платформах для завантаження, PlugShare — це найбільша у світі спільнота водіїв електромобілів. Водії надають світлини й відгуки про зарядні станції, що допомагає спільноті робити якомога більш інформовані рішення. Застосунок надає можливість отримати інформацію про зарядні станції наступних мереж в Північній Америці, Європі та більшості країн світу: YASNO E-mobility, GreenWay, AutoEnterprise, Ionomy Ukraine, Supercharger, GO TO-U, Kaufland eCharge, TOKA, Lidl eCharge, Renovatio Asset Management [30].

Можливість задати параметри транспортного засобу реалізовано як через веб інтерфейс так і через мобільний застосунок [12]. Зарядні станції фільтруються відповідно до заданих параметрів електромобіля (за типами зарядних роз'ємів). Показується до якої мережі (власник) відноситься зарядна станція.

Без задання параметрів транспортного засобу на мапі доступна ручна фільтрація зарядних станцій за потужністю, наявністю роз'ємів, кількістю точок заряджання, мережею, до якої належить станція та додатковими зручностями.

Планування поїздок доступно як через веб так і через мобільний застосунок. Система фільтрує зарядні станції відповідно до характеристик автомобіля та показує їх на прокладеному маршруті.

Зарядні станції, які вказано в застосунку, отримують рейтинг, так званий Plugscore, від найменшого 1 до найвищого 12 на підставі відгуків користувачів. Відгуки можна робити

на будь-якій мові, переклад на загальновідомі мови відсутній, тому ситуація, коли для того, щоб зрозуміти відгук, його треба переводити самостійно, трапляються часто. При прокладенні маршруту можна обрати відображення тільки тих зарядних станцій, які мають рейтинг не нижче встановленого. Загалом, використання рейтингової системи, яка формується за відгуками користувачів, вбачається доцільним при великій кількості зарядних станцій, коли рейтинг є додатковим засобом моніторингу технічної станції – як технічного стану, так й, наприклад, зручності її розташування або типових ситуації, які заважають використанню.

Оцінка функціональності застосунок-агрегатора – 4 бали (Фільтр, Маршрут, Рейтинг, Відгуки).

Переваги: застосунок безкоштовний, найбільша з розглянутих застосунків кількість відображених зарядних станцій, «живі» рейтинги та відгуки користувачів.

Недоліки: немає планування часу поїздки, з урахуванням необхідності заряджання, немає прогнозу витрат на заряджання електромобіля.

2. Chargemap - Charging stations

Мобільний застосунок *Chargemap - Charging stations* обслуговує компанія CHARGEMAP (contact@chargemap.com, 7 ALLEE CERES 67200 STRASBOURG France +33 7 83 85 31 59). Застосунок представлено на платформах IOS та Android. Його можна використовувати в автомобілі з Android Auto та CarPlay.

Програма налічує більше 1 млн. завантажень з Google Play та рейтинг 3,3 з 5 за 19,6 тис. відгуків [31]. На App Store рейтинг застосунку складає 4,9 з 5 за 30 оцінками [40]. За типом цей застосунок є агрегатором.

Відповідно до опису, карта Chargemap містить понад 500 000 зарядних точок і охоплює більшість європейських зарядних мереж. Це дозволяє легко знаходити зарядні станції у Франції, Німеччині, Нідерландах, Бельгії, Швейцарії, Італії, Іспанії, Австрії, Великобританії, Норвегії та багатьох інших країнах Європи [31].

Параметри транспортного засобу можна задавати як через веб інтерфейс, так і безпосередньо через мобільний застосунок

[13]. Відображення зарядних станцій фільтрується відповідно до заданих параметрів електромобіля (за типами зарядних роз'ємів). Показується до якої мережі відноситься зарядна станція. Планування маршруту доступно через веб та у застосунку але, якщо через веб інтерфейс надається маршрут із зазначенням на ньому розміщення зарядних станцій, то в застосунку маршрут пропонується, не тільки з урахуванням технічних характеристик транспортного засобу, а й може бути враховано визначений користувачем рівень заряду силової батареї на старті та фініші маршруту, плановану середню швидкість руху й запропоновано певні зарядні станції, надано прогноз часу заряджання та прогноз витрат на оплату заряджання.

Зарядні станції ранжуються на мапі в залежності від потужності (slow 3-22 KВт, fast 23 - 99 KВт, very rapid 100-199 KВт, ultra rapid 200+ KВт), також відображається можливість використання при зарядці дисконтної картки Chargemap Pass. Веб-інтерфейс мапи передбачає можливість розміщення відгуків та виставлення рейтингових балів, проте водії не користуються цим інструментом, від того «живої» інформації про стан зарядної станції система не надає.

Система відображає он-лайн доступність роз'ємів станції для заряджання.

Оцінка функціональності застосунок-агрегатора – 5 балів (Фільтр, Маршрут, Прогноз, Рейтинг, Відгуки).

Переваги: безкоштовне використання, глобальне покриття, велика кількість відображених зарядних станцій, планування маршруту, з урахуванням бажаного рівня заряду на старті та на фініші, пропозицією зарядних станцій на маршруті, прогнозованим часом заряджання та розміром витрат на оплату, он-лайн відображення доступності зарядної станції.

Недоліки: мобільний застосунок не прокладає маршрути в Україні, хоча це доступно через веб, система вдається курсових помилок при прогнозі витрат, у разі маршруту пролягає по території кількох країн, де використовуються різні валюти. Фактично, немає «живих» рейтингів зарядних станцій – неможливо прогнозувати працездатність певної точки заряджання.

3. A Better Route Planner

Мобільний застосунок *A Better Route Planner (ABRP)* обслуговується компанією Iternio Planning AB (bo@iternio.com, Scheelevägen 15 223 70 Lund Sweden, +46 70 611 59 22). Застосунок доступний на платформах iOS та Android, та його можна використовувати в автомобілі з Android Auto та CarPlay. Налічує понад 500 тис. завантажень з Google Play, маючи при цьому рейтинг 4,3 з 5 за 9,73 тис. відгуків [32]. На App Store рейтинг застосунку складає 4,1 з 5 за 23 оцінками [41].

За типом цей застосунок є агрегатором.

В описі програми вказано, що достатньо просто обрати модель свого автомобіля, ввести місце призначення, щоб отримати повний план поїздки, включаючи зупинки заряду та тривалість поїздки [32].

Планування поїздок доступно як через веб так і через мобільний застосунок [14]. Система пропонує маршрут не тільки з урахуванням характеристик транспортного засобу, а й з урахуванням визначеного користувачем рівня заряду на старті та фініші маршруту, швидкості руху та стану дороги, відсотка деградації силової батареї, побажань щодо зупинок для заряджання, наприклад, якщо треба проїхати маршрут швидше, система запропонує багато коротких заряджань на «швидких» станціях і, навпаки, якщо час поїздки не є критичним – одне або кілька тривалих заряджань на станціях, зручних для відвідування на маршруті але, можливо, не надто потужних. Система прогнозує час, необхідний для заряджання та витрати на оплату заряджання, однак налаштування всіх опцій доступно лише в платній версії системи.

Зарядні станції показано на мапі в залежності від доступності зарядних слотів в точці заряджання. Роз'єми та потужність обираються автоматично, виходячи з раніше введених характеристик транспортного засобу. Рейтингові бали, відгуки та фотографії щодо зарядних станцій можна розміщати як через веб-інтерфейс так і через мобільний застосунок проте водії цим майже не користуються.

Система відображає он-лайн доступність роз'ємів станції для заряджання.

Оцінка функціональності застосунку-агрегатора – 5 балів (Фільтр, Маршрут,

Прогноз, Рейтинг, Відгуки).

Переваги: глобальне покриття, планування маршруту, з урахуванням великої кількості користувацьких налаштувань. Система відображає он-лайн доступність роз'ємів станції для заряджання. Є можливість запропонувати виправлення в описі зарядної станції.

Недоліки: повні налаштування лише в платній версії, у порівнянні з іншими агрегаторами помітно менша кількість відображених зарядних станцій, рейтингова система зарядних станцій не використовується.

4. GO TO-U: EV Charging

Застосунок *GO TO-U: EV Charging* обслуговує компанія GO TO-U Inc. (3415 South Sepulveda Blvd, Suite 1100, Los Angeles, California, 90034, contact@go-tou.com, +1 310 361 98 99). Програму представлено на платформах iOS, Android.

Налічує понад 50 тис. завантажень з Google Play і має рейтинг 4,9 з 5 за 1,02 тис. відгуків [39]. На App Store рейтинг застосунку склав 4,8 з 5 за 1,4 тис. оцінок [16]. Застосунок мережі зарядних станцій.

В описі застосунку головною особливістю зазначено унікальну технологію резервування, яка дозволяє заздалегідь зарезервувати зарядну станцію на потрібний час і дату [39].

Мапа зарядних станцій та планування маршруту доступні лише через мобільний застосунок. Реалізовано можливість платного резервування обраної зарядної станції (у разі, якщо це технічно можливо) через застосунок. Програма містить актуальні відгуки щодо зарядних станцій та надає швидку реакцію на відгуки. Візуально станції відображаються на мапі, як доступні для заряджання, зайняті та неробочі (в процесі ремонту або технічного обслуговування).

Станції ранжовано за максимальною потужністю 2-21 кВт, 22-49 кВт, 50-119 кВт та 120-250 кВт, що позначено на мапі відповідною піктограмою. Станції, які є на мапі, фільтруються відповідно до технічних характеристик технічного засобу – за потужністю та наявністю відповідного зарядного конектора. При відображенні інформації про певну станцію, показується тариф на заряджання.

Реалізовано функцію автоматичного заряджання автомобіля Plug and Charge (на тих станціях, які підтримують цю функцію і лише для зарядних роз'ємів CCS). Для того, щоб функція запрацювала треба зробити налаштування через застосунок при першому підключенні.

Планування маршруту можливо лише від місця знаходження до обраної зарядної станції, при цьому точки початку та фінішу обираються в застосунку, а сам маршрут прокладається в іншому застосунку для навігації.

Оцінка функціональності застосунку мережі зарядних станцій – 5 балів (Фільтр, Маршрут, Стан, Рейтинг, Відгуки).

Переваги: можливість он-лайн відслідковування стану зарядної станції (наявності вільних портів), можливість резервування зарядних станцій, швидка обробка звернень користувачів через відгуки про зарядні станції, реалізовано функцію Plug and Charge.

Реєстрація в застосунку дозволяє прив'язати до акаунту спосіб оплати, бачити баланс на рахунку та здійснювати оплату заряджання з використанням застосунку.

Недоліки: Незручна система планування маршруту.

5. TOKA Network

TOKA Network. Застосунок обслуговується компанією FNNEVCS TOKA LLC (2 of. 38 vul. Solovtsova Mykoly Kyiv Ukraine 01014, dev@toka.energy, +380 67 225 6688). Застосунок представлено на платформах IOS, Android. Налічує більше 50 тис. завантажень з Google Play та має рейтинг 3,5 з 5 за 246 відгуками [33]. На App Store рейтинг застосунку склав 3,2 з 5 за 50 оцінками [18]. Застосунок мережі зарядних станцій.

TOKA Energy – провідна компанія в Україні, яка розвиває інфраструктуру для електротранспорту – сповіщає опис програми [33].

Мережа налічує близько 1,6 тис. зарядних станцій. Найбільше представлена в Київській та Львівській областях, хоча, в цілому, покриває всю територію України. Сайт має інформаційний характер, основні інструменти доступні через мобільний застосунок [17]. В застосунку реалізовано карту мережі зарядних станцій. По певній

станції надається інформація щодо відстані до станції, потужності, кількості портів, наявності роз'ємів та їх зайнятості, тарифів, наведено фотографію станції та коротку інструкцію щодо її місцезнаходження. Вказується рейтинг станції (від 1 до 5 балів), сформований за відгуками користувачів. Налаштування по характеристиках транспортного засобу немає, прокладання маршруту можливе тільки від місця знаходження до обраної зарядної станції через сторонній застосунок для навігації. Вибір характеристик зарядної станції доступний через налаштування фільтрів за типом порту та максимальній потужності.

Реєстрація в застосунку дозволяє прив'язати до акаунту спосіб оплати, бачити баланс на рахунку та здійснювати оплату заряджання з використанням застосунку.

Реалізована функція автоматичного заряджання автомобіля Plug and Charge (на тих станціях, які підтримують цю функцію і лише для зарядних роз'ємів CCS). Для того, щоб функція запрацювала треба при першому підключенні зв'язатися зі службою підтримки по телефону.

Оцінка функціональності застосунку мережі зарядних станцій – 5 балів (Фільтр, Маршрут, Стан, Рейтинг, Відгуки).

Переваги: простий та зрозумілий застосунок.

Недоліки: невелика кількість станцій в мережі, відсутність можливості резервувати порти, функцію Plug and Charge реалізовано але її підключення здійснюється в «ручному» режимі - через телефонний контакти зі службою підтримки.

6. E-mobility YASNO

Застосунок E-mobility YASNO обслуговується компанією YASNO ENERGY EFFICIENCY LLC (8, Litera 20 D, vul. Khokhlovkyh Simi Kyiv Ukraine 04119, emobility@yasno.com.ua, +380 99 341 2605).

Програму представлено на платформах IOS та Android. Налічує більше 10 тис. завантажень з Google Play і має рейтинг 3,8 з 5 за 70 відгуками [34]. На App Store рейтинг застосунку склав 3,1 з 5 за 30 оцінками [20]. Застосунок мережі зарядних станцій.

Мережа зарядних станцій YASNO E-mobility – один з багатьох напрямів, що реалізує операційний холдинг D.Solutions.

Сайт YASNO має розділ, присвячений мережі зарядних станцій – там вказана лише загальна інформація [19]. Взаємодія користувача з мережею здійснюється за допомогою мобільного застосунку.

Наразі, мережа нараховує близько 100 станцій, які рівномірно розподілені по території країни. Значна кількість станцій знаходиться в м. Києві.

Мобільний застосунок пропонує мапу зарядних станцій із зазначенням відстані від локації користувача до обраної зарядної станції. Маршрут руху прокладається за допомогою сторонніх навігаційних застосунків. Щодо обраної зарядної станції надається інформація про наявні порти та їх потужність, коротка інструкція щодо знаходження станції та процесу заряджання (наприклад, необхідність мати власний кабель для зарядки на порті Type2). Також вказується стан порту (вільно або зайнято) та тариф на оплату заряджання. Можливість віддаленого резервування портів відсутня. Після реєстрації в застосунку, попри те, що в реєстраційній формі вводяться дані транспортного засобу, автоматична фільтрація пропонованих зарядних станцій відповідно до технічних характеристик електромобіля не здійснюється, натомість доступне ручне налаштування фільтрів по виду роз'єму, характеристиці зарядного струму та потужності, наявності вільних портів. Реєстрація в застосунку дозволяє прив'язати до акаунту спосіб оплати, бачити баланс на рахунку акаунту та здійснювати оплату заряджання з використанням застосунку. Реалізована функція автоматичного заряджання автомобіля Plug and Charge (на тих станціях, які підтримують цю функцію і лише для зарядних роз'ємів CCS). Для того, щоб функція запрацювала треба зробити налаштування через застосунок при першому підключенні. Відгуки користувача та рейтинг станцій в застосунку не реалізовані.

Оцінка функціональності застосунку мережі зарядних станцій – 3 бали (Фільтр, Маршрут, Стан).

Переваги: простий та зрозумілий застосунок, наявність інструкцій щодо специфіки процесу заряджання на певній станції, реалізовано функцію Plug and Charge.

Недоліки: невелика кількість станцій в

мережі, відсутність в застосунку автоматичної фільтрації пропонованих зарядних станцій відповідно до технічних характеристик транспортного засобу, немає рейтингу станцій та відгуків користувачів.

7. UGV Chargers

Застосунок UGV Chargers обслуговується INFOKOM LTD TOV (26-A, Kv. 14, pr. Motorobudivnykiv Zaporizhzhia Ukraine 69068, infocom.ltd.dev@gmail.com, +380 50 827 7778). Мобільний застосунок реалізовано на платформах IOS, Android. Програма має більше 500 завантажень з Google Play [35]. На App Store рейтинг застосунку склав 4,2 з 5 за 12 оцінками [22]. Застосунок мережі зарядних станцій.

На сьогодні мережа налічує близько 100 станцій, основна локалізація Запоріжжя, Київська область, Вінниця та Чернівці, кілька станцій заплановано до встановлення за кордоном – в Словаччині, переважна більшість станцій має потужність від 7 до 22 кВт, лише 10 станцій мережі дозволяють швидке заряджання та мають потужність від 80 до 160 кВт. На сайті доступна мапа зарядних станцій, на якій вказується розташування та статус зарядних станцій мережі, потужності та зарядні порти, якими укомплектовано станції [21]. Мапа дозволяє знайти найближчу зарядну станцію, побачити її статус (робоча, на техобслуговуванні, зайнята), забронювати станцію для зарядної сесії на потрібний час – до цієї функції підключені всі зарядні станції мережі, побудувати маршрут до найближчої станції (через сторонній застосунок для навігації). Вказаний функціонал є доступним як на сайті, так і в мобільному застосунку.

В мобільному застосунку реалізовано також функцію білінгу. Зарядні станції мережі підтримують технологію Plug and Charge (лише на станціях, які мають для зарядні роз'єми CCS).

Оцінка функціональності застосунку мережі зарядних станцій – 3 бали (Фільтр, Маршрут, Стан).

Переваги: реалізовано повний функціонал взаємодії з користувачем як через сайт так і через мобільний застосунок, застосунок зручний та інформативний.

Недоліки: невелика кількість станцій в мережі, переважна кількість станцій невеликої

потужності, всього 10 станцій мережі мають порти з роз'ємами CCS на яких реалізовано функцію Plug and Charge, відсутність відгуків користувачів та рейтингу станцій.

8. ECOFACTOR EV Charging

Застосунок ECOFACTOR EV Charging обслуговується компанією EKOFAKTOR NETWORK TOV (Bud. 14 B of. 3, VUL. KOMITETSKA M. ODESA Ukraine 65091, support@ecofactor.eu, +34 665 35 62 89).

Мобільний застосунок реалізовано на платформах IOS, Android. Налічує понад 50 тис. завантажень з Google Play, має рейтинг 4,8 з 5 за 2,21 тис. відгуками [36]. На App Store рейтинг застосунку складає 4,9 з 5 за 5,4 тис. відгуків [24]. Застосунок мережі зарядних станцій.

Опис програми пропонує долучитися до мережі ECOFACTOR, де понад 180 тис. електромобілістів з України, Європи та Центральної Азії об'єднуються навколо простого та надійного процесу зарядки електромобіля [36].

Мапа зарядних станцій на сайті має низьку інформативність – наведено лише розташування зарядних станцій та кількість зарядних портів на кожній з них [23]. Мобільний застосунок дещо примітивний. Відображається місцезнаходження зарядної станції, вид струму, кількість, потужність та тип зарядних портів та їх доступність (вільно, зайнято, на технічному обслуговуванні). За допомогою ручних фільтрів можна обирати відображення зарядних станцій за типом порту та потужності. Застосунок наводить тарифи по оплаті заряджання по обраній станції. Прокладення маршруту від місця знаходження споживача до зарядної станції реалізується через зовнішній застосунок для навігації. Рейтингової системи станції мережі не мають, надавати відгуки користувачі не можуть.

Компанією реалізовано цікавий бізнес-підхід до створення та розвитку станцій - система об'єднує більше 350 операторів, кожна фізична або юридична особа, що придбала хоча б одну зарядну станцію, автоматично стає оператором. Кожен з них має доступ до власного облікового кабінету, де надається вся необхідна інформація, незалежно від кількості встановлених станцій. Крім того, мережа має ключових

партнерів – операторів Ionity, який має власну мережу зарядних станцій та Viwatt, який поки не має повноцінної власної мережі але на партнерських умовах встановив кілька найбільших в Україні хабів швидкого заряджання [25].

Оцінка функціональності застосунку мережі зарядних станцій – 3 бали (Фільтр, Маршрут, Стан).

Переваги: в мережу об'єднано велику кількість операторів, що дозволило забезпечити широке покриття території України – мережа налічує кілька тисяч зарядних станцій.

Недоліки: малоінформативний сайт, примітивний застосунок, рейтингова система зарядних станцій та можливість відгуків для споживачів відсутня.

9. IONITY

Застосунок IONITY, обслуговується компанією IONITY GmbH (Moosacher Str. 84 80809 München Germany, support@ionity.eu, +49 89 62824841) та представлений на платформах IOS, Android. Застосунок налічує понад 50 тис. завантажень з Google Play та рейтинг 4,0 з 5 за 6,76 тис. відгуками [37]. На App Store рейтинг 4,5 з 5 за 120 відгуками [27]. Мережа зарядних станцій.

Згідно з описом, застосунок дозволяє знаходити надійні та зручні станції IONITY у 24 країнах Європи вздовж ключових автомагістралей і маршрутів [37].

На сьогодні мережа нараховує близько 800 зарядних станцій в Україні з рівномірним покриттям та більшою концентрацією в Києві, Одесі, Дніпрі, Харкові, Львові, Ужгороді. Також мережа має близько 5 тис. станцій швидкої зарядки в Європі.

Мапа зарядних станцій мережі, наведена на сайті, має інформативний характер – відображено лише локалізацію станцій та типи портів, доступних на ній [26].

Мобільний застосунок дозволяє побудувати маршрут від точки старту до місця призначення, з урахуванням технічних характеристик транспортного засобу, рівня зарядки силової батареї на старті та фініші маршруту, погодних умов. Застосунок наводить прогнозований час руху, рекомендує станції для заряджання на маршруті, вказує час заряджання на цих станціях, тариф на оплату та суму до сплати.

Також в застосунку можна побачити прогнозований об'єм викидів CO² за весь час руху маршрутом. Мобільний застосунок не відображає наявні в Україні станції мережі й, навіть при плануванні маршруту по Україні не пропонує станції власної мережі. Натомість, розташовані в нашій країні станції є в білінгу у іншого оператора ринку – мережі ECOFACTOR. Інформація про стан зарядного порту не надається. Рейтингу станцій та відгуків користувачів застосунок не містить.

Оцінка функціональності застосунку мережі зарядних станцій – 2 бали (Фільтр, Маршрут).

Переваги: велика мережа сучасних станцій швидкого заряджання.

Недоліки: відсутність власного білінгу в Україні, дія мобільного застосунку не розповсюджується на зарядні станції, встановлені в Україні.

10. EVA Chargers

Мобільний застосунок *EVA Chargers*, обслуговується компанією *ChargerSystem Inc* (5512 Broken Sound Blvd NW Unit 880 Boca Raton, FL 33487 United States, info@chargersystem.com, +1 754-236-3886). Мобільний застосунок реалізовано на платформах: IOS, Android. Він налічує більш ніж 10 тис. завантажень з Google Play, маючи рейтинг 4,4 з 5 за 1,29 тис. відгуками [38]. Рейтинг на App Store складає 4,7 з 5 за 2 тис. відгуків [29].

За типом – застосунок мережі зарядних станцій. Опис на платформах суттєвої інформації не містить.

На сьогодні мережа *EVA Chargers* об'єднала в собі мережу *Infinity* та мережу зарядних станцій компанії *AutoEnterprise AE Charging Point*. За даними сайту, зарядні станції мережі розташовано в 14 країнах, мережа налічує більше ніж 1700 потужних зарядних станцій постійного струму та більше 4 тис. зарядних станцій змінного струму [28].

Мапи зарядних станцій на сайті немає. Мобільний застосунок пропонує мапу, на якій вказано локації зарядних станцій. При виборі станції система надає її адресу, кількість, тип та потужність зарядних портів, стан портів (доступний або заряджає). Зазначено тарифи на оплату заряджання,

спосіб оплати та мінімальну суму для зарядки. Також наводиться режим роботи станції та фотографії її місцезнаходження. Працює рейтингова система, рейтинг певної станції визначається за відгуками та коментарями користувачів.

Прокладення маршруту від локації користувача до обраної зарядної станції можливо за допомогою сторонніх навігаційних застосунків. Можливість дистанційного бронювання портів система не підтримує. Деякі станції мають функцію схожу на *Plug and Charge* власної розробки компанії.

Оцінка функціональності застосунку мережі зарядних станцій – 5 балів (Фільтр, Маршрут, Стан, Рейтинг, Відгуки).

Переваги: велика мережа, наявність рейтингової системи яка формується за відгуками користувачів.

Недоліки: відсутність мапи зарядних станцій на сайті, значна кількість малопотужних зарядних станцій, а також, судячи по відгуках, станцій, технічний стан яких потребує покращення.

Результати оцінки функціональності застосунків

Chargemap - *Charging stations* та *A Better Route Planner (ABRP)* як застосунки-агрегатори забезпечують всі основні функції і отримали по 5 балів, мобільний застосунок *PlugShare* набрав на один бал менше, оскільки він не забезпечує прогнозного визначення часу руху, витрат часу та коштів на заряджання автомобілю.

Застосунки зарядних мереж *GO TO-U: EV Charging*, *TOKA Network*, *EVA Chargers* мають максимальну кількість балів функціональності – 5.

E-mobility YASNO, *UGV Chargers* та *ECOFACOTR EV* отримали по 3 бали, оскільки в цих застосунках не реалізовано рейтингову систему зарядних станцій мережі, користувачі не мають можливості залишати відгуки.

Функціональність застосунку *IONITY* оцінено в 2 бали – не надається інформація про стан зарядної станції, немає рейтингової системи та відгуків користувачів.

Аналіз інформативності мобільних застосунків

Для аналізу інформативності застосунків

визначено територію радіусом 1,5 км в центральній частині Івано-Франківська (рис. 2).

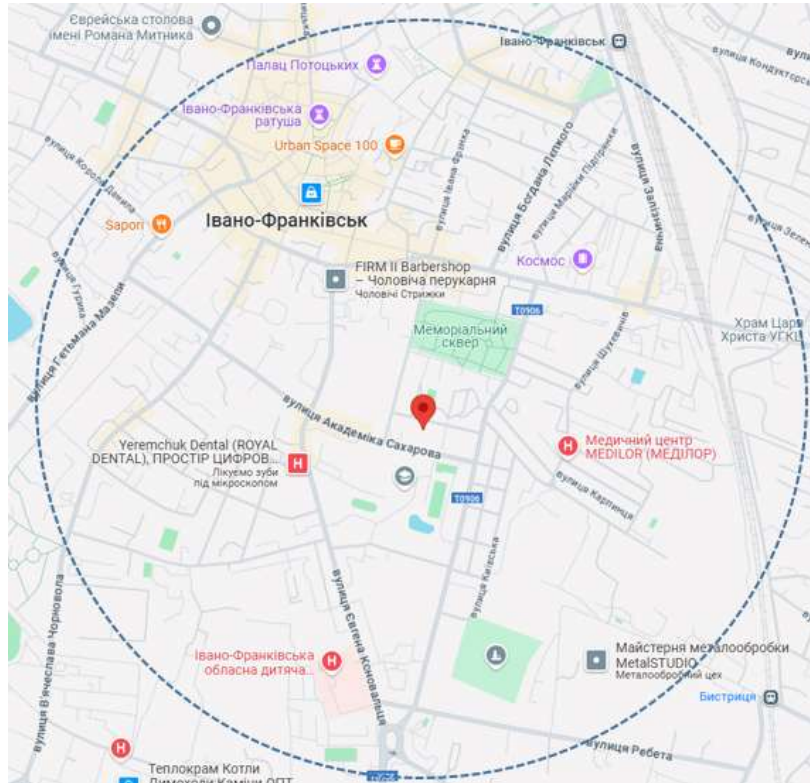


Рис. 2. Межі території, запропонованої для аналізу інформативності мобільних застосунків

Для фільтрації інформації в залежності від технічних характеристик транспортного засобу обрано електроавтомобіль 2017 Nissan Leaf I 30kWh з зарядними роз'ємами J1772 та CHAdeMO.

За даними агрегатора PlugShare, на обраній території розташовано три зарядних станції (Рис. 3).

Зарядна станція 7.0 PlugScore, вул. Грюнвальдська, 7, яка має 2 зарядних порти J-1772 та два порти Type 2, інформації про те, до якої мережі відноситься станція та чи є вільний доступ до зарядної станції або нею користуються лише особи, що проживають в готелі, застосунок не надає. Відгуків мало, найсвіжіший відгук про станцію датований груднем 2024 р., відгук позитивний. Визначимо цю станцію, як Станція 1.

Застосунок вказує належність станції з рейтингом 10 PlugScore до мережі Infinity Charge за номером 1664, вул. Андрія Мельника. Станція має 2 зарядних порти J-1772 та один порт Type 2. Хоча зарядну станцію розміщено на підземному паркінгу

будинку №10, про це в застосунку не зазначено.

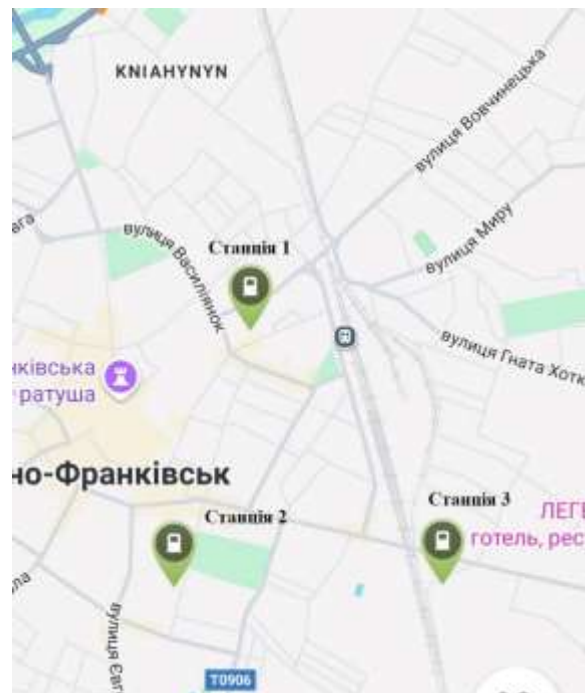


Рис. 3. Екран застосунку PlugShare

Відгуків багато, найсвіжіший відгук про станцію датований груднем 2024 р., відгук негативний – станція не працює, служба підтримки не відповідає. Визначимо цю станцію, як Станція 2.

Зарядна станція з рейтингом 7,6 PlugScore відноситься до мережі ТОКА за номером 296. Розташована за адресою вул. Хриплинська, 9. Має один зарядний порт J-1772 та один порт Туре 2. Відгуків багато, останній відгук датований вереснем 2024 р., відгук позитивний. Визначимо цю станцію, як Станція 3.

Агрегатор Chargemap вищезазначених станцій не відображає (Рис. 4), натомість наводить розташовану в центральній частині міста зарядну станцію, яку пов'язує з мережею AutoEnterprise, за адресою: Південний бульвар, 21. За даними застосунку, станція має один порт CHAdEMO, максимальною потужністю 20 кВт. Відгуків по цій станції немає. Визначимо цю станцію, як Станція 4.

Застосунок-агрегатор ABRP (Рис. 5) пропонує станцію, що знаходиться за адресою вул. Андрія Мельника – одну з тих, що пропонував застосунок PlugScore (Станція 2), однак визначає її приналежність до мережі AutoEnterprise. Вказано, що станція має 2 зарядних порти J-1772

максимальною потужністю 9,2 кВт та один порт Туре 2 максимальною потужністю 22 кВт. Рейтингу станція немає, відгуки користувачів відсутні, про те, що станція знаходиться на підземному паркінгу не зазначено.

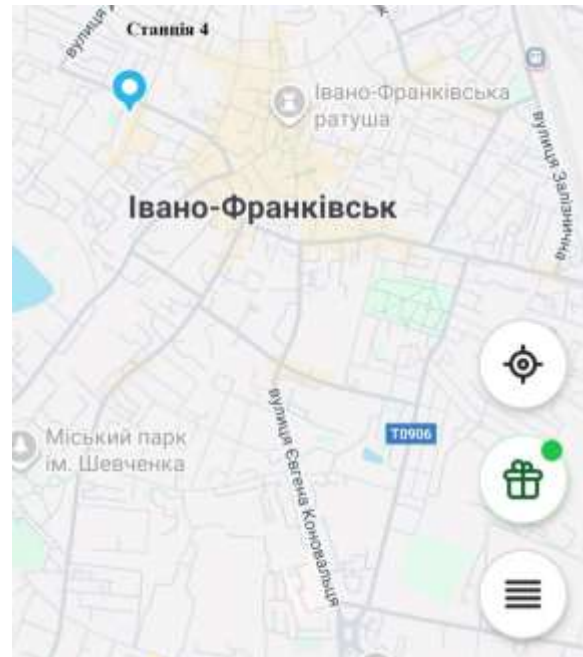


Рис. 4. Екран застосунку Chargemap

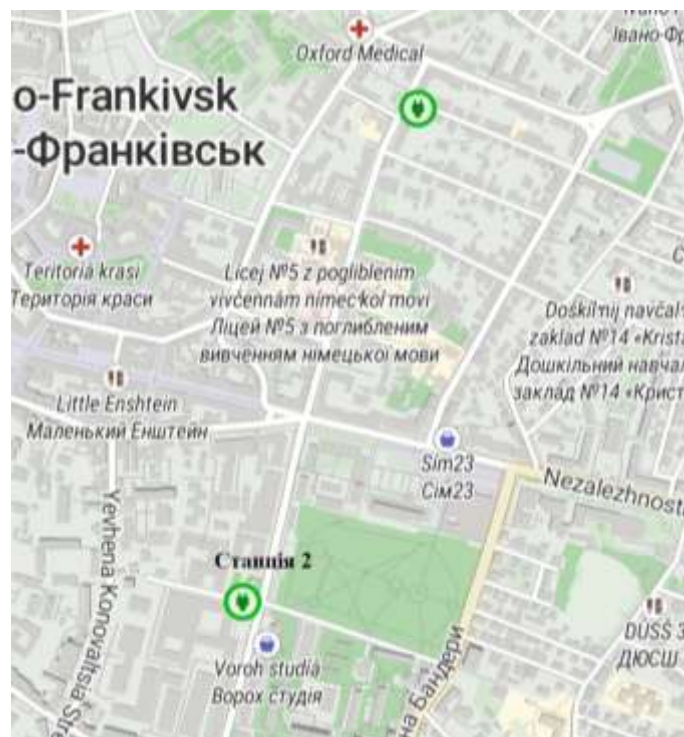


Рис. 5. Екран застосунку ABRP

Крім цього, застосунок пропонує станцію мережі EcoFactor за номером 90, розташовану за адресою: вул. Івана Франка, 27А, яка має один зарядний порт Type 2, максимальною потужністю 6,9 кВт. Цю станцію застосунки PlugShare та Chargemap не визначили, однак застосунок мережі EcoFactor теж не має інформації по цю станцію, та й взагалі, номери станцій в застосунку EcoFactor, якнайменше, тризначні.

Застосунки зарядних мереж наводять по вищевказаним станціям наступну інформацію.

Станція 2 та Станція 4. Власник EVA Chargers (AutoEnterprise, Infinity) (Рис. 6).

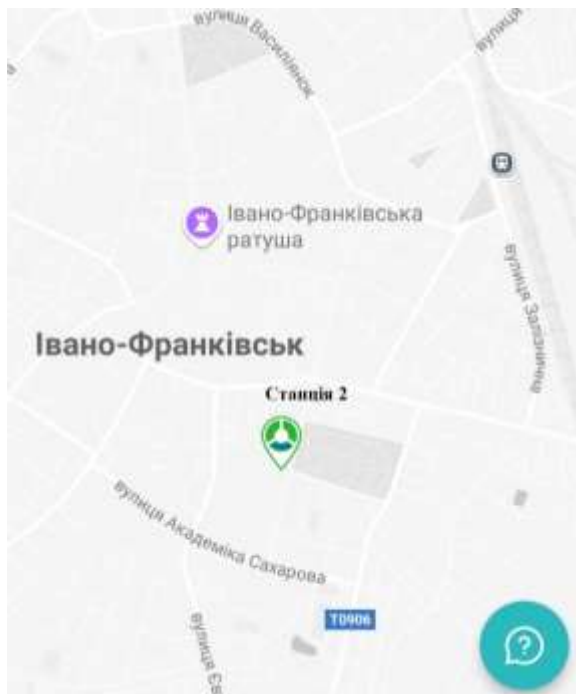


Рис. 6. Екран застосунку EVA Chargers

Станцію 2 застосунок ідентифікує за номером 1664 і вказує про наявність на станції двох портів J-1772 (40А) та одного порту Type 2 (3 фази, 32 А). Мережевий застосунок вказує тариф на заряджання та умову про мінімальну суму зарядки 10 грн. Зазначено точне місцезнаходження станції: вул. Мельника, 10, корпус 8, приміщення 37, підземний паркінг. Є фотографії місця розташування обладнання, рейтинг станції, значна кількість користувацьких відгуків, останній датовано березнем 2025 р. – відгук негативний. Реакція служби підтримки на відгуки відсутня.

Про Станцію 4 застосунок взагалі не

містить інформації.

Станція 3. Власник ТОКА. За даними мобільного застосунку ТОКА Network (Рис. 7) зарядна станція, яка має порядковий номер 296 й розташована за адресою: вул. Хриплинська, 9, має один зарядний порт J-1772 (Type1), максимальної потужності 7 кВт та один порт Type 2 максимальної потужності 22 кВт. Застосунок надає інформацію щодо доступності або зайнятості портів.

Наводяться тарифи для оплати заряджання.

Є фото місця розташування обладнання, рейтинг станції за відгуками користувачів. Реакція служби підтримки на відгуки відсутня. Вказана станція має достатню кількість відгуків, реакція служби підтримки на відгуки відсутня. Останній відгук датований лютим 2025 р., відгук – негативний.

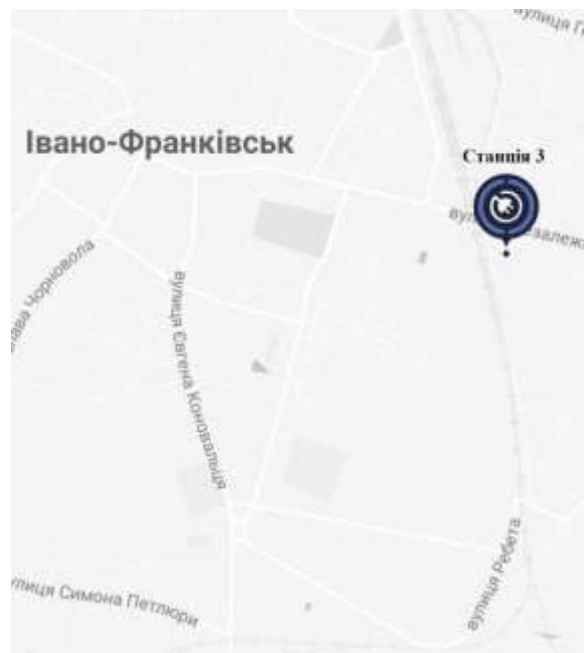


Рис. 7. Екран застосунку ТОКА Network

Приналежність Станції 1 до якоїсь зарядної мережі встановити не вдалось, можливо, це локальна зарядна станція, встановлена готелем на своїй території.

В межах території дослідження облаштовано чотири зарядних станції мережі GO TO-U (Рис. 8), які не вказано в розглянутих застосунках – агрегаторах.

Станція за адресою: вул. Незалежності, 40 (Станція 5), має зарядний порт GB/T максимальною потужністю 7 кВт, зарядний

порт Туре 1, максимальною потужністю 7 кВт, та зарядний порт Туре 2 максимальною потужністю 22 кВт.

В застосунку розміщено фотографію місця розташування обладнання. Застосунок показує доступність портів та надає можливість дистанційно зарезервувати будь-який порт. Наведено тарифи на заряджання та на резервування порту. Якщо резервувати порт на якусь кількість годин, система інформує про прогнозований об'єм зарядки за цей час.

Вказано рейтинг зарядної станції, є достатня кількість відгуків. Останній відгук датовано березнем 2025 р. Відгук негативний але не пов'язаний з технічним станом станції - йдеться про те, що крім оплати заряджання користувачеві доводиться сплачувати за паркування, бо це територія платної парковки готелю.

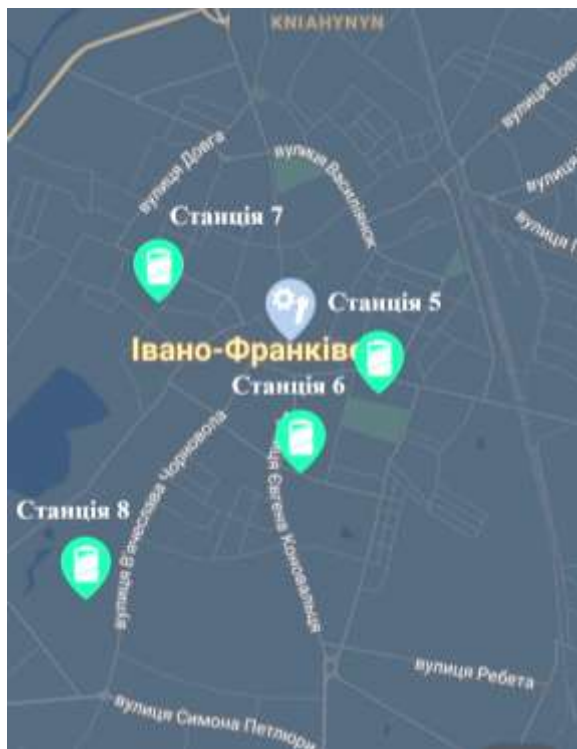


Рис. 8. Екран застосунку GO TO-U

Станція за адресою: вул. Академіка Сахарова, 23 (Станція 6), має два конектори Туре 2, максимальною потужністю 22 та 16 кВт, відповідно. Застосунок показує доступність портів та надає можливість дистанційно зарезервувати будь-який порт. Наведено тарифи на заряджання та на резервування порту. Вказано рейтинг зарядної станції, є достатня кількість

відгуків. Останній відгук датовано квітнем 2025 р. – відгук нейтральний.

Станція за адресою: Південний бульвар, 24А (Станція 7). Вказано режим роботи станції (станція працює лише в нічний час). Має один конектор Туре 1, максимальною потужністю 7 кВт, та два конектори Туре 2 максимальною потужністю 22 кВт. Відгуків по станції немає.

Станція за адресою: вул. Вячеслава Чорновола, 128 (Станція 8), має два конектори Туре 2 максимальною потужністю 22 кВт та значну кількість відгуків. Останній відгук датований січнем 2025 р. – відгук негативний, служба підтримки надала ґрунтовну відповідь.

Висновки

Оцінка функціональності як застосунків-агрегаторів, так і застосунків мереж зарядних станцій виявила, що проаналізовані застосунки мають невеликий розрив у функціональності. Основні функції вже реалізовано, інші знаходяться в процесі втілення.

Інформація, яку надають агрегатори, не співпадає з інформацією застосунків мереж. Часто агрегатори не мають інформації про станції, які вже встановлені та працюють, або повідомляють про станції в тих місцях де вони вже демонтовані. Це призводить до зменшення цінності інформації, яку надають агрегатори, та відповідно, до зменшення масштабів користування ними.

Причина низької інформативності застосунків-агрегаторів може полягати в складності обміну інформацією з мережами зарядних станцій. Щоб її усунути слід застосувати низку заходів: нормативне впорядкування процесу інформування користувачів про послугу заряджання, створення асоціації мереж зарядних станцій, наповнення агрегаторів через парсинг даних застосунків зарядних мереж за допомогою прикладних програмних інтерфейсів (API). Додаткові дослідження дозволять виявити конкретні причини і запропонувати об'єктивні дії.

Література

1. Sabyasachi, S., Singh, A. R., Godse, R., Jaiswal, S., Bajaj, M., Srivastava, I., ... & Misak, S. (2024). Reimagining E-mobility: A holistic

- business model for the electric vehicle charging ecosystem. *Alexandria Engineering Journal*, 93, 236-258.
2. Snihovyi, D. V., & Rukhlova, N. Y. (2025). Charging stations for electric vehicles: infrastructure, technologies, prospects. Publishing House "Baltija Publishing".
 3. Костенко, Г. П. (2022, June). Ефективне стимулювання розвитку електротранспорту: досвід Норвегії. In *The 3 rd International scientific and practical conference - Modern research in world science* (June 12-14, 2022) SPC - Sci-conf. com. ual, Lviv, Ukraine. 2022. 1867 p. (p. 413). Kostenko, H. P. *Efektivne stymuliuvannia rozvytku elektrotransportu: dosvid Norvehii. In The 3 rd International scientific and practical conference - Modern research in world science* (June 12-14, 2022) SPC - Sci-conf. com. ual, Lviv, Ukraine. 2022. 1867 p. (p. 413).
 4. Savari, G. F., Krishnasamy, V., Sathik, J., Ali, Z. M., & Aleem, S. H. A. (2020). Internet of Things based real-time electric vehicle load forecasting and charging station recommendation. *ISA transactions*, 97, 431-447.
 5. Костенко, Г. П. (2023). Ситуаційний аналіз перспектив розвитку електротранспорту та його інтеграції до енергосистеми України. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія», (1). Kostenko, H. P. (2023). *Sytuatsiyni analiz perspektiv rozvytku elektrotransportu ta yoho intehratsii do enerhosi-stemy Ukrainy. Naukovyi zhurnal «Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolo-hiia»*, (1)
 6. Stillwater, T., Woodjack, J., & Nicholas, M. (2013). Mobile app support for electric vehicle drivers: a review of today's marketplace and future directions. In *Human-Computer Interaction. Applications and Services: 15th International Conference, HCI International 2013, Las Vegas, NV, USA, July 21-26, 2013, Proceedings, Part II 15* (pp. 640-646). Springer Berlin Heidelberg.
 7. Aringskog, F. (2023). Effortless Charging: Enhancing Usability in Electric Car Mobile Applications.
 8. Bennich, G., & Al-Musawy, B. (2024). Exploring User Experience through Service Design: A Study of Mobile Applications for Public EV Charging.
 9. Andreasson, E., & Axelsson, A. (2020). Comparing technologies and algorithms behind mapping and routing APIs for Electric Vehicles.
 10. Hofer, P., Petrik, D., & Herzwurm, G. (2024, June). Enhancing EV Charging Stations Through IoT Platforms and Service Applications: An Analysis of the E-Mobility App Landscape. In *2024 IEEE International Conference on Engineering, Technology, and Innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1-9). IEEE.
 11. Ferreira, J. C., Monteiro, V., Afonso, J. L., & Silva, A. (2011, June). Smart electric vehicle charging system. In *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 758-763). IEEE.
 12. PlugShare. (n.d.). *PlugShare*. <https://www.plugshare.com>
 13. Chargemap. (n.d.). *Chargemap – Charging stations*. <https://chargemap.com>
 14. A Better Route Planner (ABRP). (n.d.). *ABRP*. <https://abetterrouteplanner.com>
 15. PlugShare (n.d.). *PlugShare* [App Store]. <https://apps.apple.com/ua/app/plugshare/id421788217?l=uk>
 16. GO TO-U. (n.d.). *GO TO-U: EV Charging* [App Store]. <https://apps.apple.com/ua/app/go-to-u-ev-charging-app/id1175538017?l=uk>
 17. TOKA Network. (n.d.). *TOKA Network*. <https://toka.energy>
 18. TOKA Network. (n.d.). *TOKA Network* [App Store]. <https://apps.apple.com/ua/app/toka-network-зарядні-станції/id1320781993?l=uk>
 19. YASNO. (n.d.). *E-mobility YASNO*. <https://yasno.com.ua/charge-stations>
 20. YASNO. (n.d.). *E-mobility YASNO* [App Store]. <https://apps.apple.com/ua/app/e-mobility-yasno/id1590869775?l=uk>
 21. UGV Chargers. (n.d.). *UGV Chargers*. <https://ugv.ua/uk>
 22. UGV Chargers. (n.d.). *UGV Chargers* [App Store]. <https://apps.apple.com/ua/app/ugv-chargers/id1438720281?l=uk>
 23. ECOFACTOR. (n.d.). *ECOFACOR EV Charging*. <https://ecofactortech.com/ua>
 24. ECOFACTOR. (n.d.). *ECOFACOR EV Charging* [App Store]. <https://apps.apple.com/ua/app/ecofactor-ev-charging/id1438716797?l=uk>
 25. Velchev, S. (n.d.). *Rozмова z Serhii Velchev pro ECOFACTOR* [Спількуємось з засновником компанії ECOFACTOR]. <https://ecofactortech.com/ua/rozmova-z-sergii-velchev-pro-ecofactor>
 26. IONITY. (n.d.). *IONITY*. <https://ionity.eu>
 27. IONITY. (n.d.). *IONITY* [App Store]. <https://apps.apple.com/ua/app/ionity/id1551448692?l=uk>
 28. EVA Chargers. (n.d.). *EVA Chargers*. <https://www.evachargers.com>
 29. EVA Chargers. (n.d.). *EVA Chargers* [App Store]. <https://apps.apple.com/ua/app/eva-chargers/id6473438019?l=uk>
 30. PlugShare. (n.d.). *PlugShare* [Google Play]. https://play.google.com/store/apps/details?id=com.xatori.Plugshare&pcampaignid=web_share
 31. Chargemap. (n.d.). *Chargemap – Charging stations* [Google Play]. <https://play.google.com/store/apps/details?id=c>

- om.chargemap_beta.android&pcampaignid=web_share
32. ABRP. (n.d.). *A Better Route Planner (ABRP)* [Google Play].
https://play.google.com/store/apps/details?id=com.iternio.abrpapp&pcampaignid=web_share
 33. TOKA Network. (n.d.). *TOKA Network* [Google Play].
https://play.google.com/store/apps/details?id=com.tokamobile.TokaApp&pcampaignid=web_share
 34. YASNO. (n.d.). *E-mobility YASNO* [Google Play].
https://play.google.com/store/apps/details?id=ua.com.yasno.cp.app&pcampaignid=web_share
 35. UGV Chargers. (n.d.). *UGV Chargers* [Google Play].
https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ugv.chargers.ua&pcampaignid=web_share
 36. ECOFACTOR. (n.d.). *ECOFACOR EV Charging* [Google Play].
https://play.google.com/store/apps/details?id=eu.ecofactor&pcampaignid=web_share
 37. IONITY. (n.d.). *IONITY* [Google Play].
https://play.google.com/store/apps/details?id=com.cleevio.ionity.android.app&pcampaignid=web_share
 38. EVA Chargers. (n.d.). *EVA Chargers* [Google Play].
https://play.google.com/store/apps/details?id=com.energy.eva.chargers&pcampaignid=web_share
 39. GO TO-U. (n.d.). *GO TO-U: EV Charging* [Google Play].
https://play.google.com/store/apps/details?id=com.go.tou&pcampaignid=web_share
 40. Chargemap. (n.d.). *Chargemap – Charging stations* [App Store].
<https://apps.apple.com/ua/app/chargemap-charging-stations/id438176982?l=uk>
 41. ABRP. (n.d.). *A Better Route Planner (ABRP)* [App Store]. <https://apps.apple.com/ua/app/a-better-routeplanner-abrp/id1490860521?l=uk>

Бондаренко Дмитро Ігорович¹, аспірант каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0679678857, e-mail: enformo.db@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9238-1663>

Дзюбенко Олександр Андрійович¹, к.т.н., доц. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0667684116, dzyubenko.alan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-4956>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

Assessment of the Functionality of Mobile Applications for Interaction with Electric Vehicle Charging Infrastructure in Ukraine

Annotation. Abstract. This paper presents a comprehensive evaluation of the functionality and informational value of mobile applications used for managing electric vehicle charging processes in Ukraine. Given the growing importance of electric transport infrastructure, mobile apps serve as a key interface for users to locate, assess, and utilize EV charging stations. The study investigates the functional completeness of various app types—aggregators and network-specific applications—and compares the accuracy and availability of the information they provide. **Problem.** As Ukraine continues to develop its electric transport infrastructure, the role of mobile applications becomes increasingly central. However, while numerous apps are available, the consistency and quality of their information vary significantly. Aggregator apps, in particular, often fail to provide real-time or complete data, sometimes listing decommissioned stations or omitting operational ones. This inconsistency undermines user trust and hampers broader adoption of electric vehicles. **Goal.** The main goal of this research is to assess the functionality and analyze the informational effectiveness of mobile applications used for EV charging station interaction in Ukraine. The study aims to identify both technological strengths and informational weaknesses within the current ecosystem. **Methodology.** A structured evaluation method was developed, wherein mobile apps were assessed based on the presence of key features, such as filtering options, route planning, real-time station status, user reviews, and forecasting of charging time and cost. Each feature was assigned a point, and the cumulative score determined the overall functional rating of the application. In addition, a narrative analysis was conducted to compare the information provided by aggregators and network apps for specific geographic location. **Results.** This analysis reveals minor functional gaps and significant data inconsistencies between aggregator and network-specific apps, highlighting key areas for improving Ukraine's EV charging infrastructure. **Originality.** This study introduces a novel point-based methodology for evaluating the functional completeness of EV charging mobile apps. The paper highlights critical gaps in data synchronization and the absence of unified standards for information exchange among platforms. **Practical Value.** The proposed evaluation approach offers a practical framework for developers, policymakers, and infrastructure providers to assess and improve mobile tools for electric mobility. The findings can guide regulatory adjustments, encourage data integration through APIs, and support the establishment of a charging station association.

Ultimately, the research supports the optimization of user experience and operational transparency in Ukraine's EV charging infrastructure.

Key words: *electric vehicle, charging infrastructure, mobile application, aggregator app, network charging app, functionality, informational value, route planning.*

Bondarenko Dmytro¹, PhD student, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0679678857, e-mail: enformo.db@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9238-1663>

Dziubenko Oleksandr¹, PhD, Assoc. Prof. Vehicle Electronics Department, tel. +38 0667684116, e-mail: dzyubenko.alan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-4956>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Computer design and modeling of energy systems in the educational process

Bahach Ruslan¹, Latvynskyi Vladislav¹, Plakhtii Oleksandr², Filipieva Maryna²

¹Kharkov National Automobile and Highway University, Ukraine

²Ukrainian state university of railway transport, Kharkiv, Ukraine

Annotation. Problem. The article highlights the role of computer modeling in the training of energy specialists. Software complexes (MATLAB, ANSYS, ETAP, PSCAD) for the analysis and optimization of energy systems are described. Examples of application are given, in particular, the design of solar and charging stations. The advantages of modeling are determined: resource saving, accuracy of analysis. The importance of digital technologies in the training of specialists in sustainable development is emphasized. **Goal.** Analysis of the importance of computer design and modeling in the training of energy specialists, studying modern software packages, and evaluating their impact on the effectiveness of the educational process. **Methodology.** The study is based on the analysis of scientific sources, comparison of programs (MATLAB, ANSYS, ETAP, PSCAD), review of cases and experimental modeling of power systems. The impact of digital technologies on the formation of students' professional skills is assessed. **Results.** The effectiveness of computer modeling in the training of energy professionals was confirmed. Software packages (MATLAB, ANSYS, ETAP, PSCAD, HOMER Pro, Energy Plus) for modeling and optimizing energy systems were analyzed. The advantages of digital technologies were identified: resource saving, risk-free testing, accuracy of analysis. Cases of solar power plant design, network analysis, cooling optimization and charging stations were considered. Integrating modeling promotes the development of critical thinking and analytical skills. **Originality.** The study highlights the importance of computer modeling in the education of energy professionals. The use of modern programs (MATLAB, ANSYS, ETAP, PSCAD) in the educational process is analyzed. Their role in optimizing energy systems and developing critical skills is shown. The importance of modeling for innovation and interdisciplinary collaboration is emphasized. The integration of models strengthens theoretical knowledge and practical skills. **Practical value.** The results of the study contribute to the improvement of the training of power engineers. The integration of modeling (MATLAB, ANSYS, ETAP, PSCAD) improves the quality of training without significant equipment. The optimization of courses through interactive tasks and projects is useful for education, science and consulting.

Key words: Computer modeling, energy systems, software packages, MATLAB, ANSYS, ETAP, PSCAD.

Introduction

Computer design and modeling have emerged as indispensable components of contemporary engineering education, particularly in the context of energy systems. As the global shift towards more sustainable and energy-efficient solutions accelerates, the demand for advanced tools to design, analyze, and optimize energy systems has grown exponentially. Energy production, distribution, and consumption

continue to play a pivotal role in both the global economy and environmental sustainability. With growing concerns over energy consumption, the environmental impact of traditional energy sources, and the urgent transition to renewable and alternative energy sources, the ability to model, simulate, and optimize complex energy systems has become more than just a technical skill – it is a fundamental necessity for future engineers and energy professionals [1,2].

The relevance of this research is underscored by the ongoing transformation in the energy sector, which is being propelled by technological advancements, innovative practices, and the increasing demand for higher efficiency in energy systems. As global energy infrastructure becomes more complex and sophisticated, it is crucial to utilize advanced modeling techniques to ensure the design and functionality of these systems meet modern needs. Energy systems now involve not only traditional power generation technologies, such as fossil fuel-based plants, but also renewable sources like solar, wind, and hydroelectric power, as well as emerging technologies like smart grids and energy storage solutions. These systems must be carefully designed, modeled, and optimized to ensure that they are both reliable and sustainable under various conditions, which increases the importance of having accurate modeling tools [3].

In this context, computer-aided design (CAD) software and modeling platforms, such as ANSYS, MATLAB, and others, have become invaluable tools for both academic learning and practical application. These platforms provide students with the opportunity to simulate real-world scenarios and explore a wide range of system configurations and performance parameters. By using simulation tools, students can analyze the behavior of energy systems in virtual environments, assess potential risks, and explore alternative solutions to optimize system efficiency. This hands-on approach not only deepens students' understanding of theoretical concepts but also enables them to experiment with system behaviors and fine-tune designs before applying them to real-world situations.

Moreover, the use of these software systems in education serves a broader purpose, extending beyond just the technical aspects of energy system design. They also foster the development of critical thinking, problem-solving, and decision-making skills. Through the use of simulation tools, students gain a deeper understanding of how various components of an energy system interact with one another, such as power generation units, transmission lines, storage facilities, and renewable energy sources. They learn how to balance competing priorities, such as cost, environmental impact, efficiency, and reliability, when designing and optimizing energy systems. This practical experience not only strengthens their technical expertise but also equips them with the necessary skills to

navigate the challenges and uncertainties associated with modern energy infrastructure.

Additionally, the study and simulation of energy systems using advanced computational methods empower students to experiment with innovative approaches to system optimization. For instance, students can model and evaluate different cooling strategies, including liquid cooling, hybrid systems, and phase-change materials (PCMs), assessing their impacts on system efficiency, overall cost, and environmental footprint. These experimental scenarios allow students to explore emerging technologies and assess their viability in real-world applications. By doing so, students not only gain hands-on experience with cutting-edge technologies but also develop the critical problem-solving skills required to address the increasingly complex energy challenges of tomorrow.

Analysis of publications

The article highlights the importance of computer design and modeling of energy systems in the educational process, particularly for preparing specialists in technical fields. Modeling energy systems using modern software tools, such as MATLAB/Simulink, ANSYS, and others, has become an integral part of education [4,5]. It allows students to analyze and optimize the operation of energy networks, renewable energy sources, as well as energy storage and distribution systems. Students use these tools to simulate real-world scenarios, assess potential risks, and explore alternative solutions for improving the efficiency of energy systems.

The use of software in education not only helps deepen students' understanding of theoretical concepts but also fosters the development of critical thinking, problem-solving, and decision-making skills. It enables them to analyze the interaction of various components within energy systems and find optimal solutions for reducing costs, minimizing environmental impact, and improving system reliability [6].

Modeling energy systems using computer platforms also helps students master new technologies, including cooling strategies such as liquid cooling, hybrid systems, and phase change materials (PCMs). This allows them to experiment with innovative approaches and

evaluate their effectiveness in real-world conditions [7,8].

It is also worth noting that diagnostics and troubleshooting are an integral part of computer-aided design and modeling, as they ensure the efficient operation of both automotive technology and energy systems. This is why computer-aided design and modeling play a key role in training future specialists, enabling them not only to analyze the performance of energy systems but also to effectively identify and eliminate faults.

The article also presents real examples of modern projects implemented in the educational process for diagnostics and simulation modeling [9-11]. In particular, one practical application of computer modeling is the creation of various models of microgrid charging station systems for electric vehicles in the MATLAB software environment [12,13]. This allows students to simulate the operation of charging infrastructure, assess its efficiency, and develop optimal management strategies [14].

Thus, the use of computer-aided design and modeling in the educational process not only promotes the development of students' technical competencies but also helps them acquire practical skills in working with modern technologies, which are essential for solving challenges in the fields of energy and electric transport.

Purpose and Tasks

The purpose of this work is to analyze the importance of computer design and modeling of energy systems in the educational process, as well as to consider methods, tools and real examples of the application of these technologies in the training of students of technical specialties [12-14]. The main areas of research include:

- use of modern software complexes for modeling energy processes.
- integration of computer design into the educational process.
- analysis of advantages and challenges of computer modeling in the training of specialists.
- consideration of real examples of application of modeling technologies.

Specifically, the study aims to investigate how these digital tools can improve the development, analysis, and optimization of energy systems in an educational context. Through a comprehensive examination of

various simulation platforms, their applications, and case studies of energy system modeling, the research will highlight both the key benefits and challenges of integrating these technologies into engineering curricula. Furthermore, the study will explore the ways in which these tools can be used to foster interdisciplinary learning and collaboration, encouraging students to work with others from diverse fields to develop holistic, energy-efficient solutions.

Ultimately, this research aims to contribute to a deeper understanding of how modern educational approaches, particularly the integration of computer-aided design and simulation technologies, can be leveraged to produce engineers who are well-equipped to meet the energy sustainability and efficiency challenges of the 21st century. By fostering innovation, critical thinking, and practical experience, these educational strategies will help prepare the next generation of energy professionals to design and optimize the systems that will power a sustainable, low-carbon future.

Description of the equipment, methodology, and results of the experimental studies

The value of simulation in education. Simulation allows you to build virtual models of energy systems, which gives students the opportunity to test different work scenarios, optimize energy distribution, and identify potential problems even before implementation in real conditions. This contributes to the development of analytical skills and understanding of complex technological processes in the field of energy [14,15].

Use of software packages. The most common software packages: MATLAB/Simulink, ETAP, PSCAD, ANSYS. These programs allow students to practice practical skills and prepare for real work. MATLAB/Simulink is used for modeling and analysis of dynamic processes in energy systems, ETAP is used for modeling electric power networks, PSCAD - for analysis of electromagnetic processes, and ANSYS - for thermal and mechanical analysis of system components.

Integration into the educational process. The use of computer modeling in educational programs contributes to the improvement of practical training of students. Labs and Course projects may include simulations of energy systems, allowing students to deepen their

understanding of theoretical concepts and apply them in practice. Students also get the opportunity to experiment with various system parameters, analyze the results and make informed decisions.

Examples of the use of computer modeling.

1. Designing a solar power plant. As part of the course project, students can use the MATLAB/Simulink program to simulate the operation of a solar power plant. They analyze energy generation in different weather

conditions, calculate the efficiency of using inverters and battery systems, optimize the location of panels for maximum energy production (Fig. 1) [16, 17].

2. Analysis of electrical grid stability. Using the ETAP program, students can perform voltage and load analysis in local power grids, evaluate the impact of alternative energy sources, such as wind power plants, and find optimal parameters for stable system operation (Fig. 2) [18].

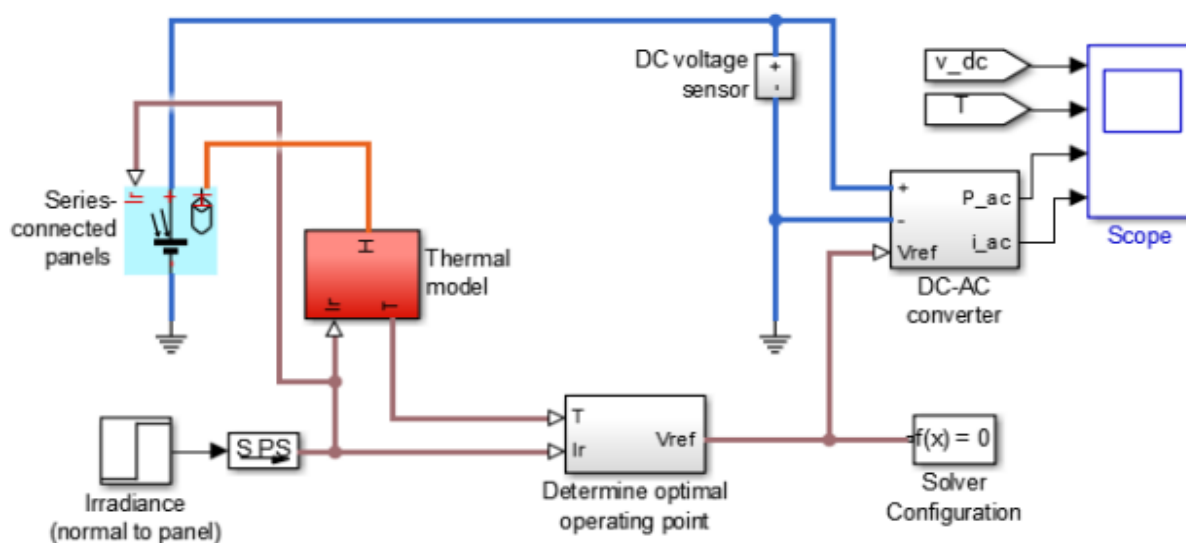


Fig. 1. General view of the photoelectric converter model

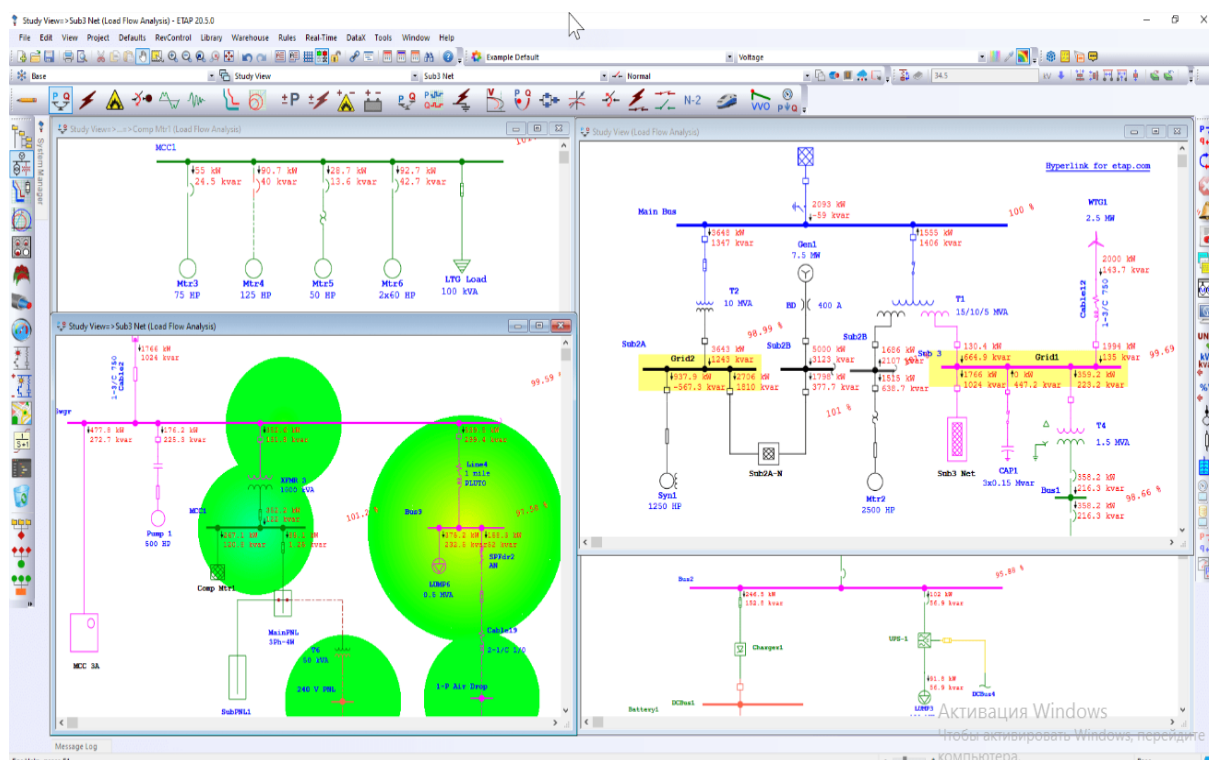


Fig. 2. ETAP software

3. Optimization of cooling systems for power plants. In ANSYS, students can simulate the effectiveness of various options for cooling generators and transformers. This makes it possible to determine the optimal design parameters for reducing heat losses and increasing the efficiency of the energy system [19].

Slice-only technology enables a cyclic repeatability simulation technique for electric motor applications. The analysis has been improved by efficiently solving just a slice of the motor, employing non-planar boundary conditions, using symmetric mesh and replicating results to the full model. To learn more about how “slice-only” technology helps

simulate complex electric motors, read the blog: How to Model and Simulate Complex Electric Motors (see Fig. 3) [19].

Low-Frequency Electromagnetic Simulation With Maxwell, you can precisely characterize the nonlinear, transient motion of electromechanical components and their effects on the drive circuit and control system design. By leveraging Maxwell’s advanced electromagnetic field solvers and seamlessly linking them to the integrated circuit and systems simulation technology, you can understand the performance of electromechanical systems long before building a prototype in hardware (see Fig. 4) [19].

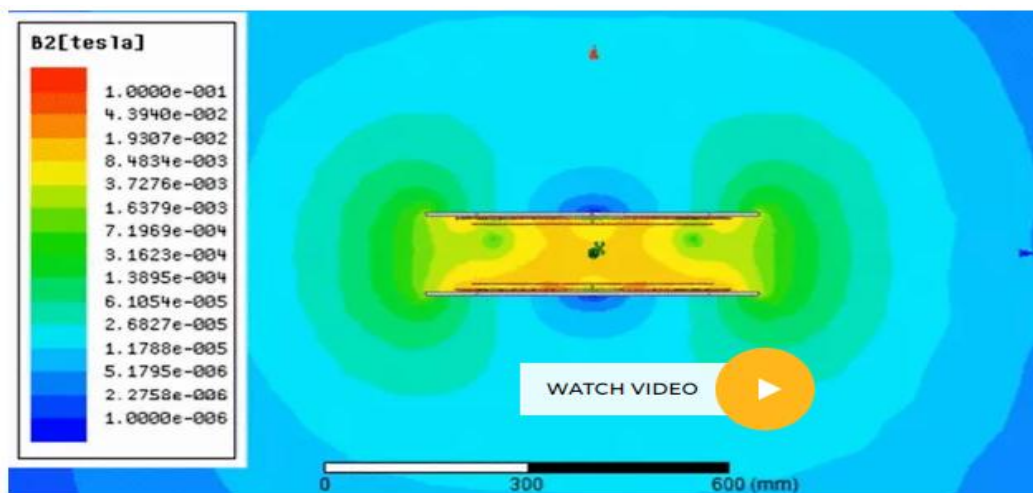


Fig. 3. Low-Frequency Electromagnetic Simulation

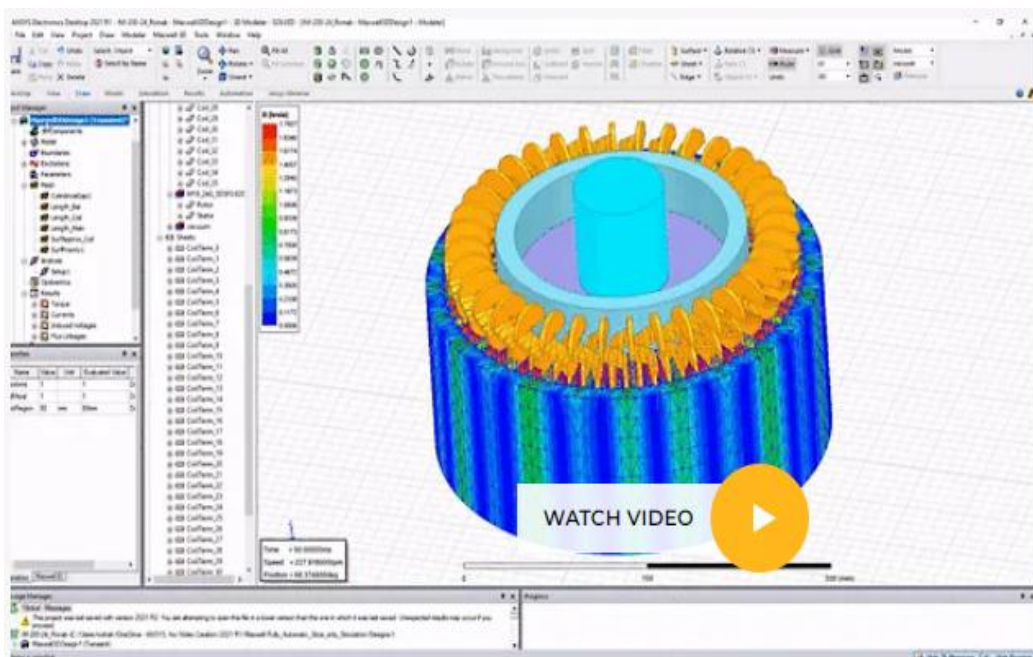


Fig. 4. Slice-only Technology

4. Modeling an Electric Vehicle Charging Station. In PSCAD, students can explore how different charging modes affect the electric vehicle grid and batteries. They can estimate the charging rate, energy efficiency of the process and optimize the control system to reduce peak loads (Fig. 5) [20].

5. Microgrid development. Using HOMER Pro, students can model the integration of solar panels, batteries, and diesel generators into local

microgrids. This helps to find optimal solutions for increasing the energy autonomy of the facility (Fig. 6) [21,22].

6. Building energy efficiency research. With the help of EnergyPlus and TRNSYS software packages, students can analyze the energy consumption of buildings and find the best methods for improving energy efficiency (Fig. 7) [23].

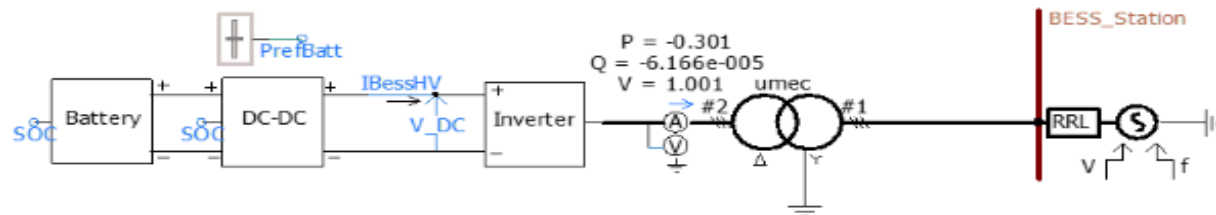


Fig. 5. A model of a charging station for electric cars in the PSCAD



Fig. 6. Microgrid development using HOMER Pro

Advantages of computer-aided design and modeling:

- economy of resources, the ability to conduct experiments in a virtual environment without spending on real equipment;
- increased accuracy of analysis, modeling allows to evaluate the effectiveness of various system configurations and identify potential shortcomings;

– flexibility in research, students can test different scenarios of system operation and check alternative approaches to their optimization.;

– preparation for real tasks, knowledge and skills acquired while working with software complexes allow future specialists to quickly adapt to the conditions of production and development of energy systems.

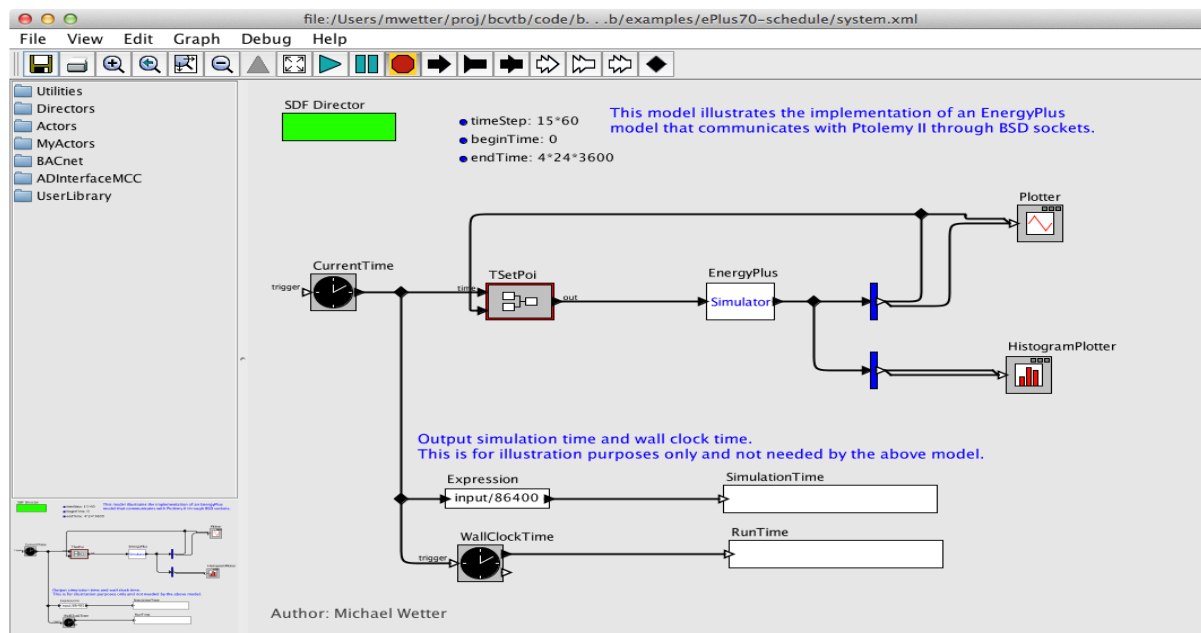


Fig. 7. Energy efficiency research with the help of Energy Plus and TRNSYS and Building software packages

Conclusion

Computer-aided design (CAD) and modeling of energy systems have become essential tools for the education and training of future specialists in the energy sector. These methods play a crucial role in equipping students with both theoretical knowledge and practical skills necessary to understand, design, and optimize modern energy systems. The integration of advanced software tools into the educational process exposes students to real-world scenarios and allows them to simulate various energy system configurations, helping them better understand the complexities of energy production, distribution, and management.

The use of such software complexes enables students to experiment with different approaches to energy system design, fostering creativity and problem-solving abilities. These technologies also support the analysis and optimization of energy systems by enabling students to visualize and simulate real-time system behaviors, which enhances their decision-making skills. As a result, students gain valuable hands-on experience that will help them successfully transition into the energy industry, where they can apply their knowledge to develop innovative solutions for sector challenges.

Moreover, the integration of CAD and modeling tools contributes to the formation of highly qualified professionals proficient in using cutting-edge technologies to address energy

efficiency, sustainability, and the transition to renewable energy sources. By incorporating these tools into the curriculum, educational institutions ensure that their graduates are well-prepared to meet the evolving demands of the energy industry [24].

As digital technologies continue to advance, the potential for modeling and simulation in energy system design will expand, offering even more powerful tools for training the next generation of energy professionals. This progress will lead to further improvements in system optimization, cost-effectiveness, and sustainability, supporting the development of innovative energy solutions for the future. Ultimately, the continued development and application of CAD and modeling technologies will play a vital role in creating a workforce capable of tackling global challenges related to energy sustainability, environmental impact, and the transition to a low-carbon economy.

Furthermore, with the advancement of digital technologies, the application of artificial intelligence (AI) and cloud computing in computer-aided modeling of energy systems is becoming increasingly significant. (AI) enables in-depth analysis of large datasets, prediction of energy system behavior, real-time optimization of operations, and early detection of potential failures or inefficiencies before they lead to critical issues. This enhances the accuracy of simulations, which is particularly important for

the integration of renewable energy sources with their variable and unpredictable nature.

At the same time, cloud technologies provide access to powerful computing resources without the need for significant capital investment in local infrastructure. They offer extensive opportunities for remote access to software, collaborative project development, scalable computations, and real-time updates of energy system models. Cloud platforms also facilitate the deployment of machine learning-based models and support flexible simulation environments.

Thus, the implementation of (AI) and cloud-based solutions in computer modeling opens new horizons for training future specialists, allowing them to master the most advanced tools for analysis, design, and management in the context of the digital transformation of the energy sector.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

References

- Багач, Р. В. (2024). Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму (Докторська дисертація, Харківський національний автомобільно-дорожній університет). Bahach, R. V. (2024). Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii avtomobilnoho elektrotransportu z vykorystanniam zaryadnykh stantsii postijnoho strumu. [Improving the efficiency of electric vehicle operation using DC charging stations.] (Doctoral dissertation, Kharkivskyi natsionalnyi avtomobilno-dorozhnyi universytet). <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/20343> [Ukrainian].
- Гнатов, А., Аргун, Ш., Багач, Р., Гнатов, Г., Тарасова, В. ., & Ручка, О. (2021). Аналіз найбільш поширених методів визначення стійкості енергетичних систем. *Vehicle and electronics. Innovative technologies*, (20), 17-26. Hnatov, A., Arhun, S., Bagach, R., Hnatova, H., Tarasova, V., & Ruchka, O. (2021). Analiz naybil'sh poshyrenykh metodiv vyznachennya stiykosti enerhetychnykh system. *Vehicle and electronics. Innovative technologies* [Analysis of the most common methods for determining the stability of energy systems] (*Vehicle and electronics. Innovative technologies*) <https://doi.org/10.30977/VEIT.2021.20.0.02> [Ukrainian].
- Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Гордієнко, Д. А., Філіп'єва, М. В., & Багач, Р. В. (2023). Підвищення точності моделювання перехідних процесів і розрахунку втрат потужності напівпровідникових перетворювачів у програмному середовищі NI Multisim. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 28(2), 22-35. Nerubats'kyu, V. P., Plakhtiy, O. A., Hordiyenko, D. A., Filip'yeva, M. V., & Bahach, R. V. (2023). Pidvyshchennya tochnosti modelyuvannya perekhidnykh protsesiv i rozrakhunku vtrat potuzhnosti napivprovodnykovykh peretvoryuvachiv u prohrannomu seredovyshchi NI Multisim. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti*. [Increasing the accuracy of simulation of transient processes and calculation of power losses of semiconductor converters in the NI Multisim software environment] (*Information and control systems in railway transport*) <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283312> [Ukrainian]
- Kassa Mersha, T., & Du, C. (2022). Active damping control of HEVs using Ansys and Matlab/Simulink software. *Journal of Vibroengineering*, 24(7), 1340-1353. <https://www.extrica.com/article/22511>
- Bhuiyan, M. S. R., El-Shahat, A., & Soloiu, V. (2019, April). Thermoelectric generator analysis through Ansys and matlab/simulink. In *2019 SoutheastCon* (pp.1-5). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9020528>
- Silas, A., Agyeman, K. I., Adetsi, P., & Agyei, F. O. (2025, February 19). The use of open-source software by library users in some private universities in Ghana. *Seminars in Medical Writing and Education*, 4, 666. Retrieved March 11, 2025, from <https://mw.ageditor.ar/index.php/mw/article/view/666>
- Müller, B., Gardumi, F., & Hülk, L. (2018). Comprehensive representation of models for energy system analyses: Insights from the Energy Modelling Platform for Europe (EMP-E) 2017. *Energy strategy reviews*, 21, 82-87. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X18300154>
- Zhang, L., Liu, Y., Laili, Y., & Zhang, W. (2020). Model maturity towards modeling and simulation: Concepts, index system framework and evaluation method. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 11(03), 2040001. <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S1793962320400012>
- Hnatov, A., Arhun, S., Hnatova, H., Bagach, R., Patlins, A., & Zabasta, A. (2021). Implementation of the double degree master's program on the

- example of the Erasmus project CybPhys. *Proceedings of the 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University* (pp. 277-282). Riga, Latvia: Riga Technical University; Piscataway: IEEE. ISBN 978-1-6654-3805-6,e-ISBN978-1-6654-3804-9.
https://www.researchgate.net/publication/358714378_Implementation_of_the_double_degree_master's_program_on_the_example_of_the_Erasmus_project_CybPhys
10. Mygal, V., Arhun, S., Hnatov, A., Bagach, R., & Kunicina, N. (2022, October). Methods for Diagnosing Vehicles by an Operator-Diagnostician. *2022 IEEE 63th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)* (pp. 1-6).
https://www.researchgate.net/publication/366432772_Methods_for_Diagnosing_Vehicles_by_an_Operator-Diagnostician
11. Bahach R. Study of the efficiency of a charging station for electric vehicles using an active rectifier in a micro-grid system / Ruslan Bahach // Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities : collection of scientific articles. – Dresden, 2024. –pp.126-133.
<http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/167810>
12. Багач, Р. (2023). Дослідження акумуляторних блоків електромобілів та зарядних станцій на основі активного трифазного випрямляча струму. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (24), 62–71. Bahach, R. (2023). Doslidzhennia akumuliatornykh bloktiv elektromobiliv ta zariadnykh stantsii na osnovi aktyvnogo tryfaznogo vypriamliacha strumu. [Research of battery units of electric vehicles and charging stations based on an active three-phase rectifier] *Car and electronics. Modern technologies*, (24), 62–71.
<https://dspace.khadi.kharkov.ua/items/6482ea9d-df14-40c7-9393-37aee29da84a> [in Ukrainian].
13. Багач, Р. (2024). Підвищення електромагнітної сумісності і енергоефективності зарядної станції електромобілів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (25), 53–62. Bahach, R. (2024). Pidvyshchennia elektromahnitnoi sumisnosti i enerhoefektyvnosti zaryadnoi stantsii elektromobiliv. [Improving electromagnetic compatibility and energy efficiency of electric vehicle charging stations.] *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, (25), 53–62.
<https://doi.org/10.30977/VEIT.2024.25.0.6> [Ukrainian].
14. Багач, Р. В., Гнатів, А. В., & Аргун, Ш. В. (2024). Імітаційне моделювання зарядного контролера LTC4020 для літій-іонних акумуляторів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (26), 25–35. Bahach, R. V., Hnatov, A. V., & Arhun, SHCH. V. (2024). Imitatsiynne modelyuvannya zaryadnoho kontrolera LTC4020 dlya lityi-ionnykh akumuliyatoriv. [Simulation modeling of the LTC4020 charge controller for lithium-ion batteries] *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, (26), 25–35.
<https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/23229> [Ukrainian]
15. Osmancik, T. (2023). *Design and Simulation of Vehicle-to-Load System with Nissan Leaf* (Doctoral dissertation, Concordia University).
<https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/993203/>
16. Оробчук, Б. Я., & Кіт, Н. Я. (2022). Дослідження режимів роботи моделі сонячної електростанції в пакеті MATLAB. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 84–85. Orobchuk, B., & Kit, N. (2022). Doslidzhennia rezhymiv roboty modeli sonyachnoyi elektrostantsiyi v paketi MATLAB. *Aktual'ni zadachi suchasnykh tekhnolohiy*, 84. [Study of operation modes of the solar power plant model in the MATLAB package] (*Actual Problems of Modern Technologies*).
https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/39372/1/Zb_rynok_%D0%A1IIMT_2022.pdf#page=86 [Ukrainian].
17. ETAP. Software Comprehensive Software Suite (ETAP, SEE, Caneco) to Design, Build, Operate and Maintain Electrical Systems. (n.d.).
<https://etap.com/ru/product/load-flow-software>
18. Ansys. Powering Innovation. That Drives Human Advancement. (n.d.).
<https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
19. PSCAD. The world's most advanced tool for power systems EMT simulations. (n.d.).
<https://www.pscad.com/knowledge-base/article/462>
20. Plakhtii, O., Prokhorova, V., Bagach, R., Zhuchenko, O., Yermilova, N., & Perets, K. (2023, October). Research of Accumulator Blocks of Electric Vehicles and Charging Station Based on Current Source Rectifier. In *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (pp. 1-6). IEEE.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10312968>
21. Tremblay, O., Dessaint, L. A., & Dekkiche, A. I. (2007, September). A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. In *2007 IEEE vehicle power and propulsion conference* (pp. 284-289). Ieee.

- https://www.researchgate.net/publication/4342930_A_Generic_Battery_Model_for_the_Dynamic_Simulation_of_Hybrid_Electric_Vehicles
- 22.DS New Energy - Zhejiang DongShuo New Energy Co., Ltd. (n.d.). <https://ua.ds solar.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-34952960.html>
- 23.Energy Plus .Chapter 5. Configuring programs for use with the BCVTB. (n.d.).<https://simulationresearch.lbl.gov/bcvtb/releases/latest/doc/manual/tit-EnePluCon.xhtml>
- 24.Bahach, R., & Bushara, M. (2024). Use of simulation technologies in the training of students for the diagnostics of electric vehicles and charging stations. *Automobile and Electronics. Modern Technologies*, Proceedings of the IX International Scientific and Technical Internet Conference (Kharkiv, November 21-22, 2024) (pp. 158-160). Kharkiv: KhNADU.

Bahach Ruslan¹, Doctor of philosophy (PhD), Associate Professor of the automotive electronics Department, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, tel. +38 0507255660, +38 0935761042, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>

Latvynskiy Vladislav¹, Assistant of the automotive electronics Department, e-mail: latvin2000@gmail.com, tel. +38 0988956781, +38 0992599142, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4891-2925>

Plakhtii Oleksandr², Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Department of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics, e-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com tel. +38 0939176020 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>

Filipieva Maryna², Ph. D. student, Department of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics, e-mail: marifil2603@gmail.com tel. +38 0665784196 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6499-7493>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Ukrainian state university of railway transport, 7 Obronny Val Square, Kharkiv, 61001, Ukraine

Комп'ютерне проектування та моделювання енергетичних систем у навчальному процесі Анотація. Проблема. Стаття висвітлює роль комп'ютерного моделювання в навчанні енергетиків. Описано програмні комплекси (MATLAB, ANSYS, ETAP, PSCAD) для аналізу та оптимізації енергосистем. Наведено приклади застосування, зокрема проектування сонячних і зарядних станцій. Визначено переваги

моделювання: економія ресурсів, точність аналізу. Наголошено на важливості цифрових технологій у підготовці фахівців зі сталого розвитку. **Мета.** Аналіз значення комп'ютерного проектування та моделювання в підготовці фахівців з енергетики, вивчення сучасних програмних комплексів та оцінка їх впливу на ефективність освітнього процесу. **Методологія.** Дослідження базується на аналізі наукових джерел, порівнянні програм (MATLAB, ANSYS, ETAP, PSCAD), огляді кейсів та експериментальному моделюванні енергосистем. Оцінено вплив цифрових технологій на формування професійних навичок студентів. **Результати.** Підтверджено ефективність комп'ютерного моделювання у підготовці енергетиків. Проаналізовано програмні пакети (MATLAB, ANSYS, ETAP, PSCAD, HOMER Pro, Energy Plus) для моделювання та оптимізації енергосистем. Визначено переваги цифрових технологій: економія ресурсів, безризикове тестування, точність аналізу. Розглянуто кейси проектування сонячних електростанцій, аналізу мережі, оптимізації охолодження та зарядних станцій. Інтеграція моделювання сприяє розвитку критичного мислення та аналітичних навичок. **Оригінальність.** Дослідження підкреслює важливість комп'ютерного моделювання в освіті енергетиків. Проаналізовано використання сучасних програм (MATLAB, ANSYS, ETAP, PSCAD) у навчальному процесі. Показано їхню роль в оптимізації енергосистем та розвитку критичних навичок. Наголошено на значенні моделювання для інновацій і міждисциплінарної співпраці. Інтеграція моделей зміцнює теоретичні знання й практичні навички. **Практичне значення.** Результати дослідження сприяють удосконаленню підготовки енергетиків. Інтеграція моделювання (MATLAB, ANSYS, ETAP, PSCAD) підвищує якість навчання без значного обладнання. Оптимізація курсів через інтерактивні завдання й проекти корисна для освіти, науки та консультування.

Ключові слова: Комп'ютерне моделювання, енергетичні системи, програмні комплекси, MATLAB, ANSYS, ETAP, PSCAD.

Багач Руслан Володимирович¹, доктор філософії (PhD), доцент кафедри автомобільної електроніки, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, тел. +38 0507255660, +38 0935761042, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>

Латвинський Владислав Дмитрович¹, асистент кафедри автомобільної електроніки, e-mail: latvin2000@gmail.com, тел. +38 0988956781, +38 0992599142, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4891-2925>

Плахтій Олександр Андрійович², кандидат наук, доцент, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, e-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com, тел. +38 0939176020
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>

Філіп'єва Марина Віталіївна², аспірант, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, тел. +38 0665784196

e-mail: marifil2603@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6499-7493>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25. ²Український державний університет залізничного транспорту, 61001, Україна. м. Харків, майдан Оборонний Вал, 7.

Використання застосунку Car Scanner ELM OBD-II для діагностики Hyundai Kona Electric

Гнатів А.В.¹, Аргун Щ.В.¹, Сохін П.А.¹, Григоренко Н.В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

***Анотація.** У статті досліджується використання застосунку Car Scanner ELM OBD-II для діагностики електромобілів, зокрема Hyundai Kona Electric. Аналізуються можливості застосунку для моніторингу стану високовольтної батареї, ефективності енергоспоживання та виявлення кодів помилок. Результати показують, що Car Scanner ELM OBD-II є ефективним інструментом для діагностики електромобілів, дозволяючи користувачам у реальному часі контролювати ключові параметри та оцінювати стан батареї.*

***Ключові слова:** діагностика електромобілів, OBD-II сканер, стан працездатності батареї, моніторинг у реальному часі, Hyundai Kona Electric, рекуперація енергії, аналіз кодів помилок.*

Вступ

Розвиток електричного транспорту та його активна інтеграція у транспортні системи вимагають нових підходів до технічного обслуговування та діагностики. Електромобілі мають значно складнішу електронну систему, ніж транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), що створює додаткові виклики для їхньої діагностики та ремонту [1]. Однією з ключових проблем є моніторинг та оцінка стану силового електроприводу, інверторних систем та високовольтних акумуляторних батарей [2].

Для підвищення надійності та безпеки експлуатації електротранспорту необхідні методи оперативної діагностики, які б забезпечували точний контроль параметрів у реальному часі [3].

Розвиток технологій діагностики електромобілів безпосередньо пов'язаний із підготовкою кваліфікованих фахівців, здатних працювати з сучасними діагностичними інструментами. Важливим аспектом є оновлення освітніх програм, що враховують специфіку електротранспорту. Як зазначено у роботі [1], підготовка спеціалістів у сфері електромобільності стикається з низкою викликів, включаючи необхідність освоєння сучасних засобів діагностики, таких як OBD-II. Подібні навчальні ініціативи є частиною

міждисциплінарних програм, що інтегрують знання у сферах кібер-фізичних систем та енергозбереження [4].

OBD-II (On-Board Diagnostics) є однією з найбільш розповсюджених систем діагностики, яка спочатку була розроблена для автомобілів з ДВЗ, але наразі адаптується для електромобілів [5]. Завдяки можливості зчитування кодів помилок та контролю параметрів у реальному часі, OBD-II може бути ефективним інструментом для оцінки стану електромобіля [6,7]. Зокрема, використання мобільного застосунку Car Scanner ELM OBD-II у поєднанні з адаптером ELM327 дозволяє зчитувати та аналізувати такі параметри, як температура та напруга осередків батареї, рівень зарядженості акумулятора, навантаження на електродвигун та ефективність рекуперації енергії [8–10].

Незважаючи на значні переваги, метод OBD-II має певні обмеження [11]. Одне з головних питань – точність отриманих даних та обмежений доступ до деяких специфічних параметрів, які є критично важливими для електромобілів [12]. Крім того, не всі OBD-II адаптери підтримують усі можливі протоколи зв'язку, що може впливати на коректність діагностики та обмежувати перелік доступних даних [5].

В зв'язку з вищезазначеним, ця стаття спрямована на аналіз ефективності викорис-

тання застосування Car Scanner ELM OBD-II для діагностики Hyundai Kona Electric, оцінку його функціональних можливостей, а також виявлення можливих обмежень цього методу.

Аналіз публікацій

Зростання кількості електромобілів створює нові виклики для їх діагностики та обслуговування [13,14]. Традиційні методи діагностики, розроблені для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), не завжди є ефективними для електромобілів, оскільки в них відсутні такі критичні елементи, як паливна система та коробка передач [15]. В електромобілях перш за все потрібно моніторити стан високовольтної батареї, інвертора, електроприводу та системи рекуперації енергії [16].

Відомо, що стан акумуляторної батареї суттєво впливає на ефективність роботи електромобіля. У роботі [17] розглянуто методи визначення залишкової ємності батареї (State of Health, SOH) за допомогою алгоритмів машинного навчання. Автори підкреслюють, що точність оцінки SOH значною мірою залежить від методів збору та обробки даних, що є критичним фактором для розробки ефективних діагностичних підходів. Дослідження [18] підтверджує, що використання даних з OBD-II дозволяє отримати інформацію про рівень заряду батареї, її деградацію та історію зарядних циклів.

Розвиток технологій діагностики сприяє застосуванню OBD-II для електромобілів. OBD-II дозволяє зчитувати параметри роботи транспортного засобу в реальному часі, включаючи стан акумуляторної батареї, температурні показники, рівень споживаної енергії та коди помилок [19]. Дослідження [20] показує, що ефективність використання OBD-II значно залежить від специфікації автомобіля та можливостей адаптера, що підключається до діагностичного порту.

Значний інтерес у дослідників викликають мобільні додатки для діагностики, такі як Car Scanner ELM OBD-II, які дозволяють власникам транспортних засобів отримувати доступ до критичних параметрів автомобіля без необхідності відвідування сервісного центру [21]. Цей підхід забезпечує економію коштів на технічному обслуговуванні та спрощує моніторинг стану електромобіля. Робота [22] демонструє перспективи інтегра-

ції OBD-II з технологіями Інтернету речей (IoT), що дозволяє створювати більш точні та автоматизовані системи діагностики.

Дослідження, проведене у [23], вказує на можливості інтеграції OBD-II з хмарними технологіями для зберігання та аналізу діагностичних даних. Це дає змогу проводити прогнозування несправностей та оптимізувати експлуатаційні характеристики електромобілів. Водночас дослідження [24] підкреслює, що дані, отримані через OBD-II, можуть бути обмеженими та потребують додаткової верифікації іншими методами контролю.

Майже всі сучасні електромобілі можуть бути продіагностовані через порт OBD-II. Винятки складають деякі китайські бренди, які закривають таку можливість, які, зазвичай, реалізуються на внутрішньому ринку Китаю. Тому, з точки зору зручності і доступності в обслуговуванні і ремонту, електромобілі, що випускаються для внутрішнього ринку Китаю, не є збалансованим рішенням щодо його покупки. Серед електромобілів доступного (середнього, якщо можна так сказати) цінового діапазону особливу увагу привертає Hyundai Kona Electric, який є одним із популярних електромобілів і підтримує діагностику через OBD-II. Як зазначено у [25], діагностичні можливості цього автомобіля дозволяють отримати широкий спектр параметрів у режимі реального часу, включаючи напругу та струм акумуляторної батареї, рівень її деградації, ефективність рекуперативного гальмування та загальний рівень енергоспоживання. Важливість оцінки енергоспоживання та аналізу даних батареї підтверджено у [26], де наголошується на необхідності оптимізації використання ресурсів електромобілів для підвищення їхньої продуктивності та продовження терміну служби акумуляторів.

Таким чином, проведений аналіз літератури демонструє, що використання OBD-II у поєднанні з мобільними додатками, такими як Car Scanner ELM OBD-II, має значний потенціал для діагностики електромобілів. Однак існують певні обмеження щодо точності зчитування окремих параметрів, що вимагає подальших досліджень у цьому напрямку.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є оцінка ефективності застосування Car Scanner ELM OBD-II для діагностики електромобілів шляхом аналізу його

можливостей на прикладі Hyundai Kona Electric та визначення його здатності моніторингу ключових параметрів функціонування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз публікації щодо основних методів діагностики електричних та електронних систем електромобіля та відповідного діагностичного обладнання;
- проаналізувати функціонал, можливості та основні етапи роботи з OBD-II – сканерами;
- дослідити особливості роботи з застосунком Car Scanner ELM OBD-II;
- провести діагностику автомобіля Hyundai Kona Electric першого покоління випуску;

– дослідити можливості Car Scanner ELM OBD2 при діагностиці Hyundai Kona Electric.

Діагностика електромобіля Hyundai Kona Electric за допомогою Car Scanner ELM OBD-II

Car Scanner ELM OBD-II є ефективним інструментом для проведення діагностики електромобіля Hyundai Kona Electric.

Застосунок дозволяє відстежувати основні параметри роботи транспортного засобу, аналізувати стан високовольтної акумуляторної батареї (АКБ) та оцінювати ефективність електросистем (рис. 1).

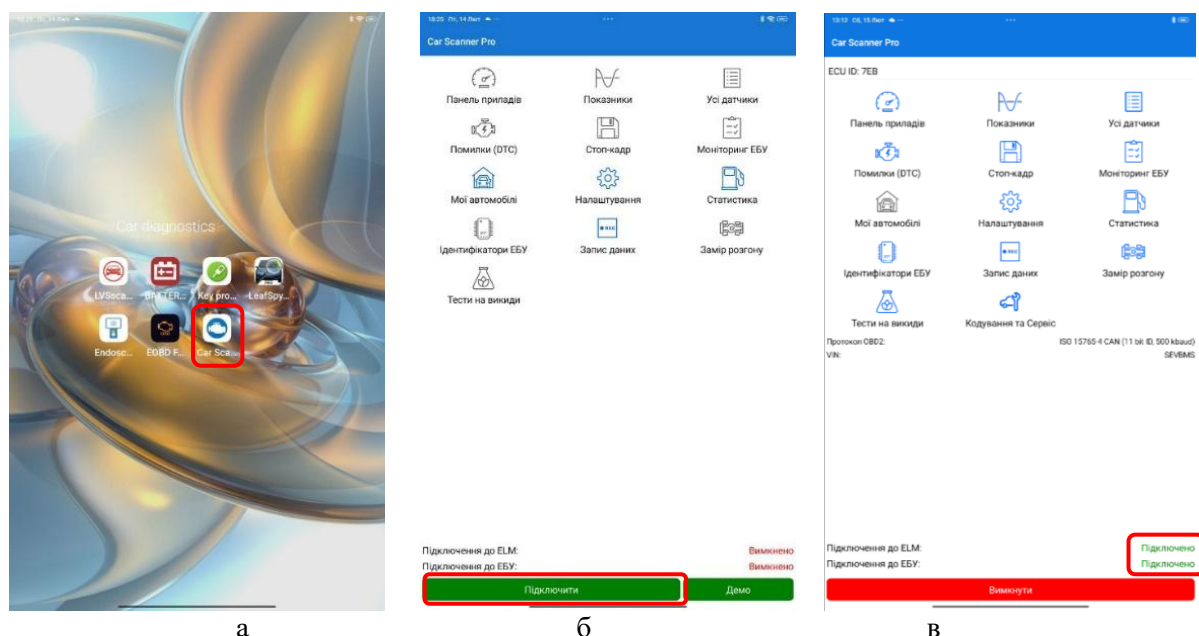


Рис. 1 – Запуск застосунку Car Scanner ELM OBD-II: а – вибір додатку; б – запуск головного екрану додатку; в – головний екран додатку

1. Підключення та налаштування застосунку

Для початку роботи потрібно запустити застосунок Car Scanner ELM OBD-II на мобільному пристрої (рис. 1,а). Далі необхідно натиснути кнопку «Підключити» (рис. 1,б) і зачекати, поки програма встановить зв'язок з OBD-II адаптером. Якщо застосунок запитує дозвіл на створення пари, потрібно підтвердити підключення. Після цього програма автоматично приєднується до адаптера OBD-II та буде готова до роботи (рис. 1,в) [27].

Перед початком діагностики слід налаштувати програму. Це можна зробити ще під

час підключення, вказавши тип зв'язку (Bluetooth або Wi-Fi), марку автомобіля тощо. Додатково налаштування можна змінити через меню «Налаштування» (рис. 2,а).

У меню «Панель приладів» (рис. 2,б) можна налаштувати тему, режим відображення показників та вибрати повноекранний режим для кращої візуалізації даних. Крім того, у вкладці «Одиниці виміру» (рис. 2,в) користувач може встановити зручну для себе систему вимірювання параметрів.

2. Основне меню та перегляд параметрів

Головним інструментом для діагностики є

меню «Панель приладів» (рис. 2,б), яке дозволяє відстежувати всі критичні параметри автомобіля. Це меню можна налаштувати відповідно до власних потреб:

- додати додаткові екрани для різних груп параметрів;
- змінити вигляд показників (цифрові значення, графіки);

– згрупувати дані за функціональними категоріями.

На рис. 3 та рис. 4 зображено різні конфігурації меню «Панель приладів», що використовуються для діагностики Hyundai Kona Electric.

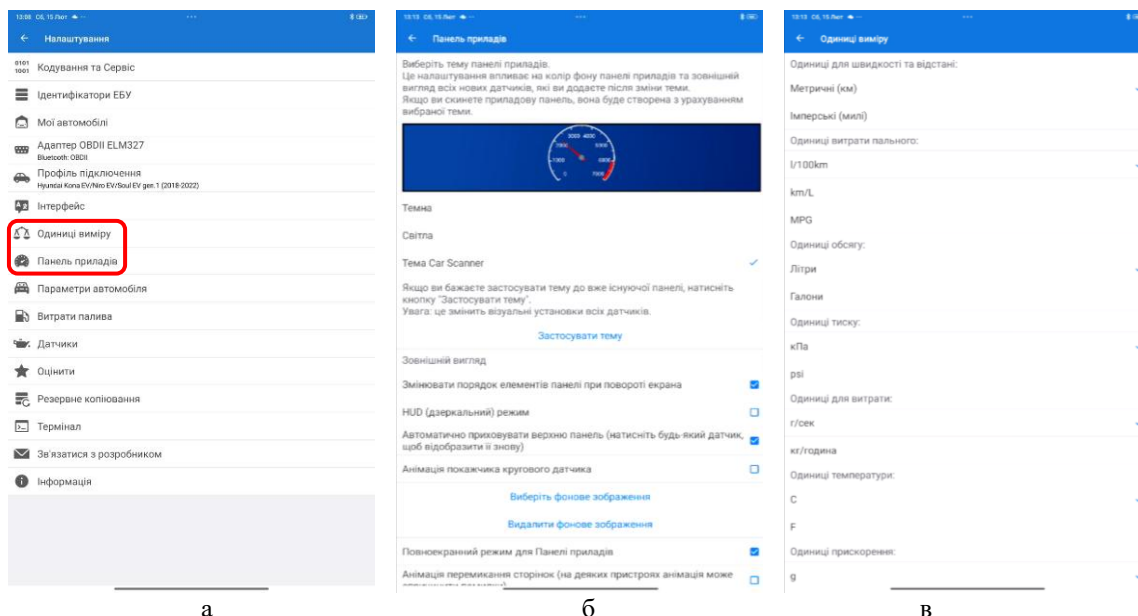


Рис. 2 – Екрани застосунку Car Scanner ELM OBD-II: а – екран меню «Налаштування»; б – екран вкладки «Панель приладів»; в – екран вкладки «Одиниці виміру»

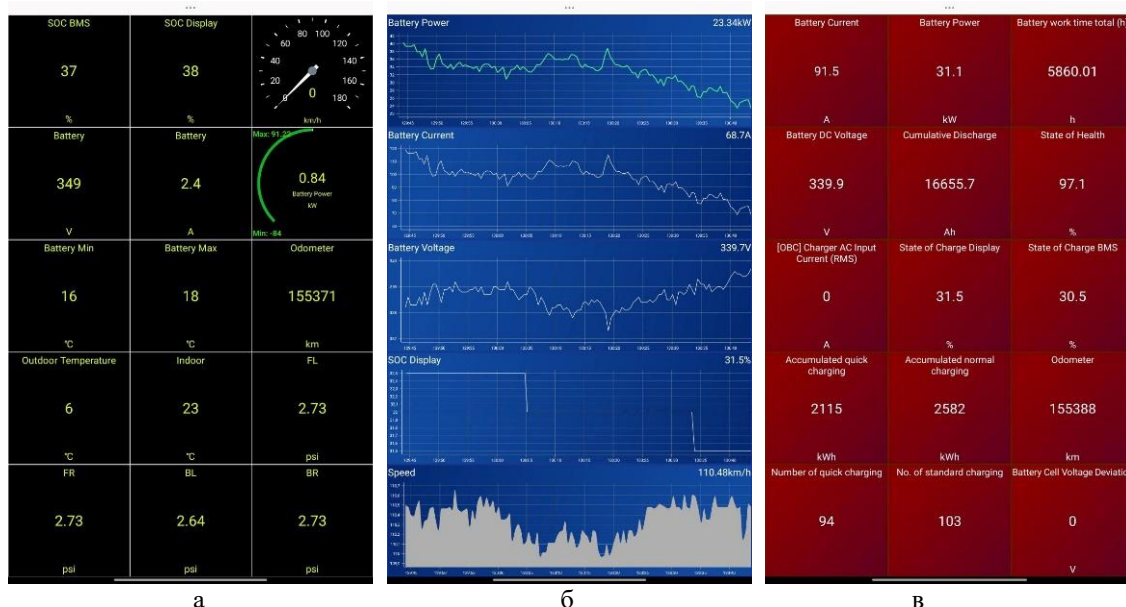


Рис. 3 – Екрани меню «Панель приладів» застосунку Car Scanner ELM OBD-II: а – перший екран (показники); б – другий екран (графіки); в – третій екран (показники)

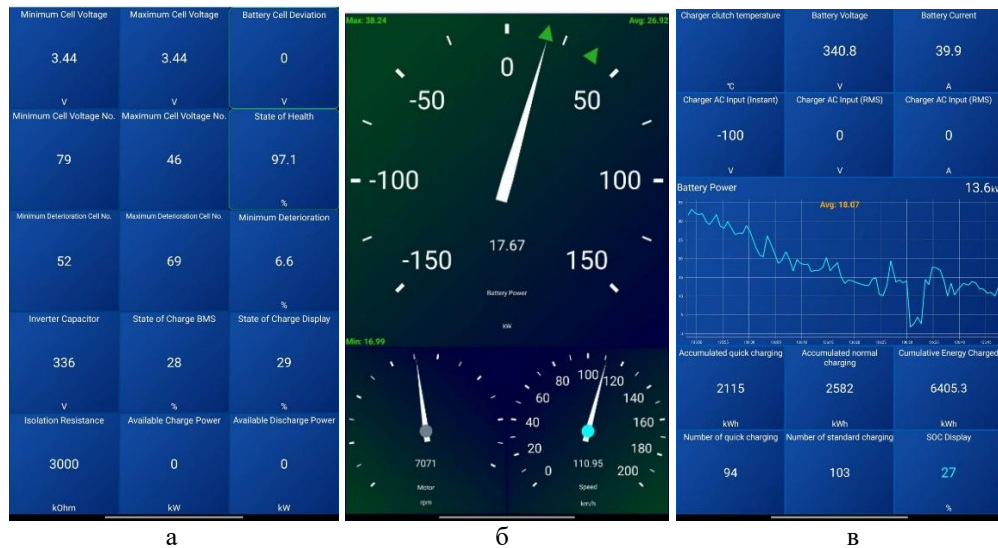


Рис. 4 – Екрани меню «Панель приладів» застосунку Car Scanner ELM OBD-II: а – четвертий екран (показники); б – п'ятий екран (аналогові показники); в – шостий екран (комбінований)

3. Аналіз стану високовольтної батареї

Одним із найважливіших аспектів діагностики електромобіля є аналіз параметрів високовольтної АКБ, які дозволяють оцінити її поточний стан та ефективність роботи (рис. 3,а):

- SOC BMS (State of Charge) – рівень заряду батареї за даними BMS – 37%;
- SOC Display – рівень заряду, що відображається на приладовій панелі – 38%;
- напруга батареї – 349 В;
- струм (заряд/розряд) – 2,4 А;
- потужність споживання – 0,84 кВт;
- температурний діапазон батареї – від 16°C до 18°C;
- одометр – 155371 км.

4. Аналіз енергоспоживання та ефективності роботи електросистем

На основі даних екрану рис. 3,б можна простежити динаміку витрат енергії в залежності від часу:

- графік Battery Power – відображає зміни енергоспоживання в русі;
- графік струму батареї – показує зміну сили струму у різних режимах роботи;
- графік напруги батареї – дозволяє визначити стабільність напруги під час навантажень;
- графік заряду батареї – візуалізує рівень заряду в динаміці;
- графік швидкості – показує зміни швидкості автомобіля.

Ці параметри допомагають визначити ефективність роботи електросистем та розподіл навантаження на батарею.

5. Оцінка стану АКБ та її деградації

Оцінка стану високовольтної акумуляторної батареї (АКБ) є одним із ключових етапів діагностики електромобіля. Деградація батареї визначається за параметром стан працездатності батареї SOH (State of Health), який відображає залишкову ємність батареї у порівнянні з її початковою характеристикою.

Аналізуючи дані рис. 3,в, можна визначити такі параметри:

- загальний час роботи батареї, $T_{total}=5860,01$ год;
- накопичена ємність розряду, $Q_{dis}=16655,7$ А·год;
- стан працездатності батареї, $SOH=97,1$ %;
- кількість швидких заряджання, $N_{fast}=94$;
- кількість повільних заряджання, $N_{slow}=103$.

Для визначення залишкової ємності батареї використовують формулу:

$$Q_{rem}=Q_{nom}-(Q_{nom}\cdot D)/100,$$

де Q_{rem} – залишкова ємність батареї; Q_{nom} – номінальна ємність батареї (64 кВт·год); D – рівень деградації батареї у відсотках.

Підставляючи значення:

$$Q_{rem}=64-(64\times 2,9)/100=62,14 \text{ кВт}\cdot\text{год}.$$

Отже, після 5860 год роботи батарея зберегла приблизно 62 кВт·год ємності.

6. Аналіз режимів заряджання

Режими заряджання дозволяють оцінити, як саме батарея отримувала енергію протягом експлуатації.

- загальна кількість енергії, отримана при швидкому заряджанні, $E_{fast}=2115$ кВт·год;
- кількість швидких заряджань, $N_{fast}=94$;
- загальна кількість енергії, отримана при повільному заряджанні, $E_{slow}=2582$ кВт·год,
- кількість повільних заряджань, $N_{slow}=103$.

Середню кількість енергії, отриманої за одну зарядку, можна обчислити за формулою:

$$E_{avg}=E_{total}/N,$$

де E_{avg} – середня кількість отриманої енергії за один цикл зарядки; E_{total} – загальна кількість отриманої енергії; N – кількість зарядних циклів.

Для швидкого заряджання:

$$E_{avg,fast}=2115/94=22,5 \text{ кВт·год.}$$

Для повільного заряджання:

$$E_{avg,slow}=2582/103=20,07 \text{ кВт·год.}$$

Додатково можна оцінити частку енергії, отриманої завдяки рекуперативному гальмуванню:

$$E_{rec}=E_{total}-(E_{fast}+E_{slow}),$$

де E_{rec} – енергія, отримана за рахунок рекуперативної енергії; $E_{total} = 6405,3$ кВт·год – загальна кількість отриманої енергії.

Підставляючи значення:

$$E_{rec}=6405,3-(2115+2582)=1708,3 \text{ кВт·год.}$$

Частка рекуперативної енергії у загальному балансі енергії:

$$(E_{rec} \cdot 100) / E_{total} = (1708,3 \cdot 100) / 6405,3 = 26,67 \text{ \%}.$$

Таким чином, електромобіль отримав 26,67 % енергії завдяки рекуперативному гальмуванню.

Якщо припустити, що середнє споживання електромобіля ($E_{avg,calc}$) складає від 18 кВт

до 21 кВт на 100 км, то за наявними показниками можна оцінити параметр споживання електроенергії електромобілем та визначити, чи робилось щось з високовольтною АКБ:

$$E_{avg,calc}=E_{total}/\text{одометр} \cdot 100;$$

$$E_{avg,calc}=6405,3/155371 \cdot 100 = 4,1 \text{ кВт.}$$

Отриманий результат показує, що, скоріше за все, була проведена заміна високовольтної батареї на цій Hyundai Kona Electric. Саме так, в електромобілі, який діагностується було замінено високовольтну АКБ.

Якщо взяти середній показник споживання електромобіля біля 20 кВт на 100 км, отримаємо, що вже з заміненою високовольтною батареєю цей електромобіль проїхав близько 20-25 тис. км. Це не точний підрахунок, але доволі індикативний, який дає уяву про пробіг і стан електромобіля та його високовольтної АКБ.

7. Додатковий аналіз електричних параметрів

Балансування комірок АКБ і перевірка електричних параметрів дозволяють виявити потенційні проблеми із батареєю або іншими компонентами електросистеми.

За даними рисунка 4,а:

- мінімальна і максимальна напруга комірок, $U_{min}=U_{max}=3,44$ В;
- різниця між мінімальною та максимальною напругою, $\Delta U=0$ В;
- напруга конденсаторів інвертора, $U_{cap}=336$ В;
- опір ізоляції, $R_{iso}=3000$ кОм.

Щоб перевірити коректність показників накопиченої енергії, розраховують загальну отриману енергію батареї:

$$E_{calc}=Q_{dis} \times U_{avg},$$

де Q_{dis} – накопичена ємність розряду, $Q_{dis}=16655,7$ А·год; U_{avg} – середня напруга батареї, $U_{avg}=390$ В.

$$E_{calc}=16655,7 \cdot 390=6495,7 \text{ кВт·год.}$$

Зіставляючи цей результат із даними Car Scanner на рис. 4,в, де загальна кількість отриманої при зарядці енергії складає 6405,3 кВт·год, бачимо, що результати практично збігаються, що свідчить про корект-

ність даних.

Ще одним важливим показником є загальний час роботи батареї, який не коригується у блоці управління. У нашому випадку:

- загальний час роботи батареї, $T_{\text{total}}=5860,01$ год;
- загальний час заряджання, $T_{\text{charge}}=1838$ год;
- час фактичного використання батареї (мотогодини):

$$T_{\text{op}}=T_{\text{total}}-T_{\text{charge}};$$

$$T_{\text{op}}=5860,01-1838=4044,01 \text{ год.}$$

Цей параметр дозволяє оцінити реальний пробіг електромобіля та перевірити можливість коригування показників одометра.

Аналіз можливостей Car Scanner ELM OBD-II при діагностиці Hyundai Kona Electric

Застосунок Car Scanner ELM OBD-II надає широкий функціонал для оцінки параметрів автомобіля та роботи його електронних блоків управління. Для зручності користувач може налаштовувати спосіб відображення даних, вибираючи між суміщеним (усі показники на одному графіку) або роздільним режимом (кожен параметр окремо). Це можна зробити у меню «Показники» (рис. 5,б).

У меню «Усі датчики» (рис. 5,в) доступний повний перелік сенсорів, значення яких може відображати програма.

Діагностика та виявлення несправностей

Пункт меню «Помилки (DTC)» (рис. 6,а) дає змогу переглянути активні коди несправностей та провести діагностику модулів на наявність помилок. Якщо певний компонент працює некоректно, застосунок зчитує коди помилок і надає інформацію про можливі причини.

Меню «Стоп-кадр» (рис. 6,б) зберігає дані про роботу автомобіля у момент виникнення помилки. Це дозволяє зрозуміти, за яких умов відбулася несправність, аналізуючи параметри датчиків у цей момент.

Меню «Моніторинг ЕБУ» (рис. 6,в) дає змогу порівняти фактичні параметри роботи автомобіля із заводськими значеннями. Якщо показники виходять за допустимі межі, це може бути причиною появи індикатора «Check Engine» на приладовій панелі.

Динамічні тести та аналіз електронних модулів

Меню «Замір розгону» (рис. 7,а) використовується для вимірювання часу прискорення та гальмування транспортного засобу.

Меню «Ідентифікатори ЕБУ» (рис. 7,б) містить перелік усіх електронних модулів автомобіля. Користувач може вибрати конкретні блоки або запустити автоматичний пошук, щоб застосунок самостійно виявив наявні системи.

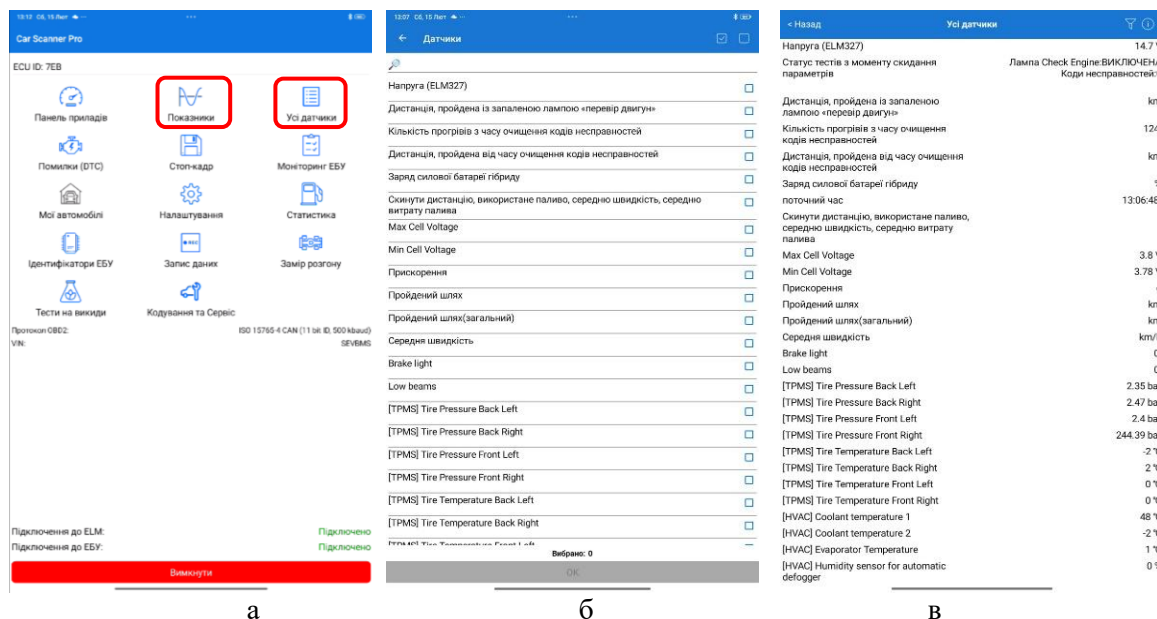


Рис. 5 – Екрани застосунку Car Scanner ELM OBD-II для вибору показників діагностування: а – головний екран додатку; б – екран меню «Показники»; в – екран меню «Усі датчики»

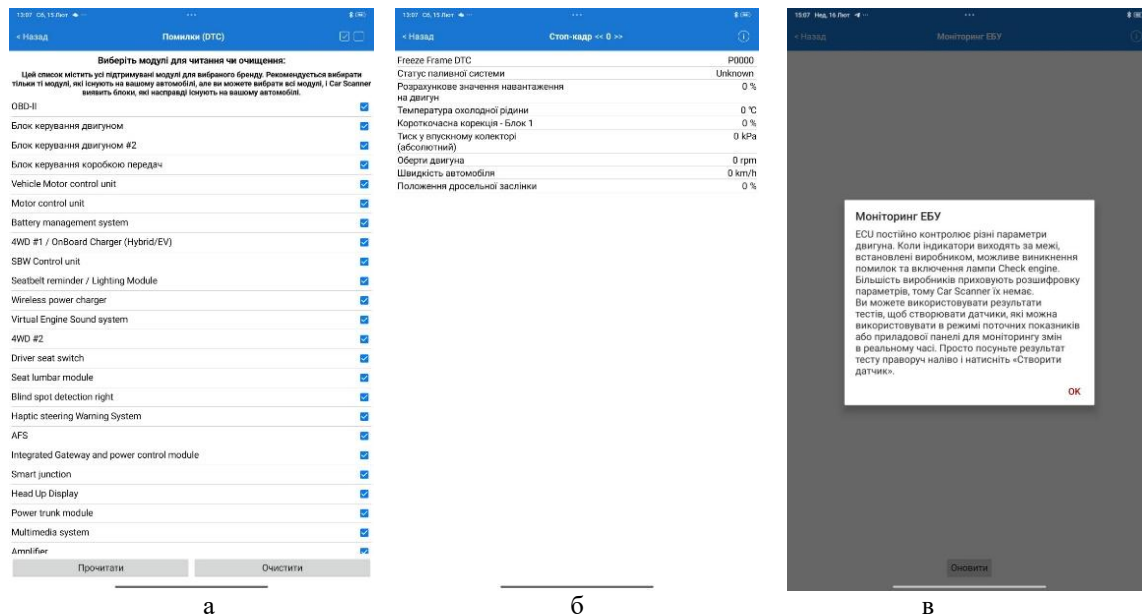


Рис. 6 – Екрани застосунку Car Scanner ELM OBD-II для зчитування помилок: а – екран меню «Помилки (DTC)»; б – екран меню «Стоп-кадр»; в – екран меню «Моніторинг ЕБУ»

Запис, аналіз і тестування параметрів

Меню «Запис даних» (рис. 7,в) дозволяє зберігати результати діагностики для подальшого аналізу. Користувач може переглядати історію тестувань, обираючи потрібні датчики та показники.

Меню «Статистика» (рис. 8,а) надає можливість задавати власні параметри, такі як вартість пального або електроенергії, ємність батареї та середнє споживання. Це дозволяє розраховувати витрати на експлуатацію ав-

томобіля за певний період часу.

Меню «Тести на викиди» (рис. 8,б) використовується для оцінки роботи екологічних систем транспортного засобу. При досягненні певних умов електронний блок управління проводить тестування компонентів, відповідальних за контроль викидів. Результат «Тест пройдено» свідчить про їх коректну роботу, а невідповідність вказує на потенційну проблему.

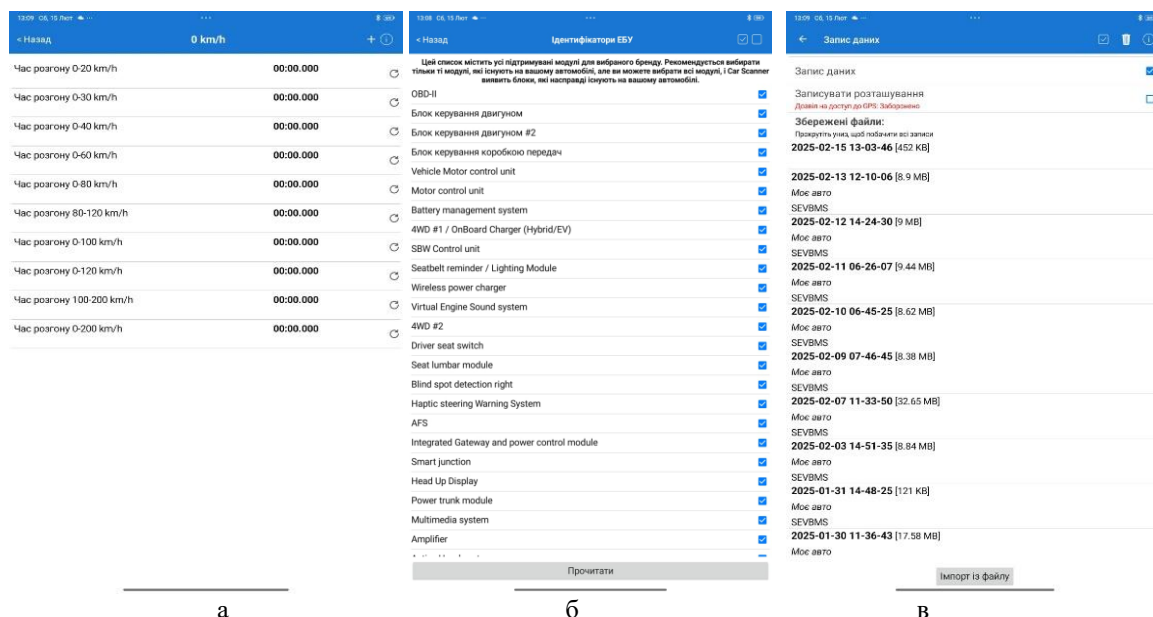


Рис. 7 – Екрани застосунку Car Scanner ELM OBD-II для запису та зберігання даних діагностування: а – екран меню «Замір розгону»; б – екран меню «Ідентифікатори ЕБУ»; в – екран меню «Запис даних»

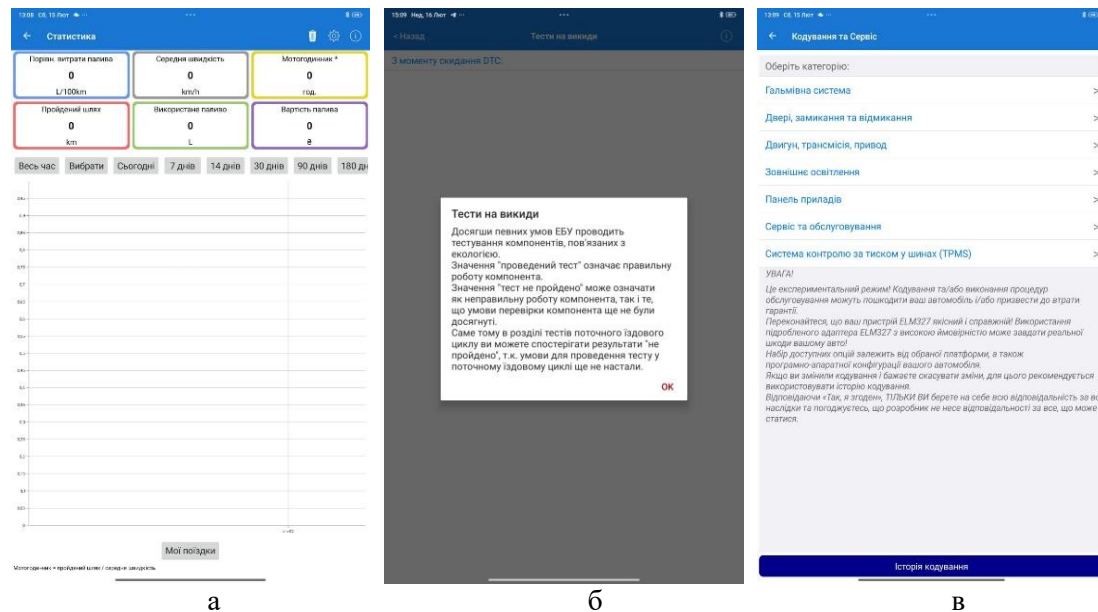


Рис. 8 – Екрани застосунку Car Scanner ELM OBD-II для визначення та зміни параметрів ЕБУ: а – екран меню «Статистика»; б – екран меню «Тести на викиди»; в – екран меню «Кодування та Сервіс»

Кодування та зміна параметрів ЕБУ

Меню «Кодування та Сервіс» (рис. 8,в) дозволяє змінювати налаштування окремих систем автомобіля. Для Hyundai Kona Electric доступні наступні параметри:

- гальмівна система;
- управління дверима (замикання, затримка відкривання);
- робота двигуна та трансмісії (режими потужності, налаштування приводу);
- зовнішнє освітлення (режими роботи фар, затримка вимкнення);
- панель приладів (відображення параметрів);
- сервісне обслуговування (скидання інтервалів техобслуговування);
- контроль тиску в шинах.

Ці можливості дозволяють налаштовувати автомобіль відповідно до потреб користувача, а також контролювати роботу електронних компонентів для забезпечення їх стабільної роботи.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило ефективність використання Car Scanner ELM OBD-II для діагностики електромобілів, зокрема Hyundai Kona Electric. Застосунок виявився зручним для використання, оскільки не потребує спеціальних технічних знань, що робить його доступним для широкого кола користувачів. Його функціонал дозволяє зчиту-

вати та аналізувати коди помилок, здійснювати моніторинг роботи високовольтної акумуляторної батареї, електродвигуна, інвертора та інших електросистем у режимі реального часу.

Результати дослідження показали, що Car Scanner ELM OBD-II надає цінну інформацію про стан електромобіля, включаючи стан працездатності батареї (SOH), енергоспоживання та ефективність рекуперації. Зокрема, було виявлено, що діагностований автомобіль мав замінену батарею, яка має SOH 97,1%. Вже на заміненій високовольтній АКБ електромобіль проїхав біля 20-25 тис.км. Це свідчить про можливість використання застосунку для оцінки залишкового ресурсу батареї та планування її заміни.

Використання Car Scanner ELM OBD-II дозволяє користувачам самостійно контролювати технічний стан транспортного засобу та виявляти потенційні несправності. Це дозволяє зменшити потребу в дорогій професійній діагностиці, водночас підвищуючи ефективність і довговічність експлуатації електромобілів.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на порівняння Car Scanner ELM OBD-II з іншими діагностичними інструментами, а також на розробку додаткових функцій для моніторингу та аналізу даних електромобілів.

Література

1. Arhun, S., Hnatov, A., Hnatova, H., Patlins, A., & Kunicina, N. (2020). *Problems that have arisen in universities in connection with COVID-19 on the example of the Double Degree Master's Program "Electric Vehicles and Energy-Saving Technologies."* 2020 IEEE 61st Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2020 - Proceedings. Scopus. <https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316601>
2. Borodenko, Y., Arhun, S., Hnatov, A., Kunicina, N., Bisenieks, M., Migal, V., & Hnatova, H. (2023). Diagnostics of electric drive Electric vehicle with Valve Motor. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2023(6), 32–38. Scopus. <https://doi.org/10.15199/48.2023.06.07>
3. Migal, V., Arhun, S., Hnatov, A., Ulianets, O., & Shevchenko, I. (2024). Requirements for vibroacoustic methods of the quality assessment of vehicles traction electric motors. *Noise and Vibration Worldwide*, 55(4–5), 189–276. Scopus. <https://doi.org/10.1177/09574565241243390>
4. Zabasta, A., Peuteman, J., Kunicina, N., Kazymyr, V., Hvesenya, S., Hnatov, A., Paliyeva, T., & Ribickis, L. (2020). Research on cross-domain study curricula in cyber-physical systems: A case study of Belarusian and Ukrainian Universities. *Education Sciences*, 10(10), 282.
5. Arhun, S., Borodenko, Y., Hnatov, A., Popova, A., Hnatova, H., Kunicina, N., Ziravecka, A., Zabasta, A., & Ribickis, L. (2020). Choice of Parameters for the Electrodrive Diagnostic System of Hybrid Vehicle Traction. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 57(4), 3–11. <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0017>
6. *Car Scanner ELM OBD2 – The best car OBD2 diagnostic solution for iOS and Android in your pocket!* (n.d.). Retrieved March 6, 2025, from <https://www.carscanner.info/>
7. *OBD2 query.* (2022, June 11). Speak EV - Electric Car Forums. <https://www.speakev.com/threads/obd2-query.170050/>
8. Arhun, S., Migal, V., Hnatov, A., Hnatova, H., & Ulyanets, O. (2020). System approach to the evaluation of the traction electric motor quality. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 7(26). Scopus. <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.162693>
9. Arhun, S., Migal, V., Hnatov, A., Ponikarovska, S., Hnatova, A., & Novichonok, S. (2020). Determining the quality of electric motors by vibro-diagnostic characteristics. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 7(29). Scopus. <https://doi.org/10.4108/EAI.13-7-2018.164101>
10. Mygal, V., Arhun, S., Hnatov, A., Ulianets, O., Kunicina, N., & Ribickis, L. (2022). *Diagnostics of Tractor Transmissions by Vibration Levels.* ENERGYCON 2022 - 2022 IEEE 7th International Energy Conference, Proceedings. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON53164.2022.9830506>
11. *A Good OBD2 Compatible with Electric Cars.* (n.d.). Foxwell Diag. Retrieved March 6, 2025, from <https://www.foxwelldiag.com/blogs/car-diagnostic/obd2-compatible-electric-cars>
12. Borodenko, Y., Ribickis, L., Zabasta, A., Arhun, S., Kunicina, N., Zhiravetska, A., Hnatova, H., Hnatov, A., Patlins, A., & Kunicins, K. (2020). Using the method of the spectral analysis in diagnostics of electrical process of propulsion systems power supply in electric car. *Przegląd Elektrotechniczny*, 96(10), 47–50. <https://doi.org/10.15199/48.2020.10.08>
13. Гнатів, А. В., Аргун, І. В., Гнатова, Г. А., & Підгора, О. В. (2016). *Електробус на суперконденсаторах для міських перевезень з надшвидкою зарядкою.* Вісник ХНАДУ, 72, 29–72. Hnatov, A. V., Arhun, Sh. V., Hnatova, H. A., & Pidhora, O. V. (2016). Elektrobus na superkondensatorakh dlia miskykh perevezen z nadshvydkoiu zariadkoiu [Supercapacitor electric bus for urban transportation with ultra-fast charging]. *Visnyk KhNADU*, 72, 29–72. [in Ukrainian].
14. Аргун, І. В., Гнатів, А. В., & Ульянець, О. А. (2016). Екологічний та енергоефективний автомобільний транспорт та його інфраструктура. *ВІСНИК ЖІТТУ*, 2(77), 18–26. Arhun, Sh. V., Hnatov, A. V., & Ulyanets, O. A. (2016). *Ekolohichniy ta enerhoefektyvnyi avtomobilnyi transport ta yoho infrastruktura* [Ecological and energy-efficient automobile transport and its infrastructure]. *Visnyk ZhDTU*, 2(77), 18–26. [in Ukrainian].
15. Zoryna, T. G., Aliksandrovich, S. A., Valeeva, Y. S., Kalinina, M. V., Ilikova, L. E., & Suvonovich, E. Y. (2022). Measures to stimulate the development of electric transport as a tool for the development of the territory. *2022 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/EEAE53789.2022.9831360>
16. Malek, A., & Taccani, R. (2021). Innovative approach to electric vehicle diagnostics. *Archiwum Motoryzacji*, 92(2), 49–67. <https://doi.org/10.14669/AM.VOL92.ART4>
17. You, G.-W., Park, S., & Oh, D. (2017). Diagnosis of Electric Vehicle Batteries Using Recurrent Neural Networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(6), 4885–4893. IEEE Transactions on Industrial Electronics. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2674593>
18. Zhao, J., & Burke, A. F. (2022). Electric vehicle batteries: Status and perspectives of data-driven diagnosis and prognosis. *Batteries*, 8(10), 142. <https://doi.org/10.3390/batteries8100142>

19. Rybitskyi, O., Golian, V., Golian, N., Dudar, Z., Kalynychenko, O., & Nikitin, D. (2023). Using OBD-2 technology for vehicle diagnostic and using it in the information system. *Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*, 1 (9), 97–103.
<https://doi.org/10.20998/2079-0023.2023.01.15>
20. Rimpas, D., Papadakis, A., & Samarakou, M. (2020). OBD-II sensor diagnostics for monitoring vehicle operation and consumption. *Energy Reports*, 6, 55–63.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.018>
21. Iskandar, K., Tambayong, A., Mulya, M. R. F., Elfanlie, S. C., & Herlina, M. G. (2023). Mobile-Based Car Diagnostic Application Using Onboard Diagnostic-II Scanner. *ComTech: Computer, Mathematics and Engineering Applications*, 14(2), 129–141.
<https://doi.org/10.21512/comtech.v14i2.9138>
22. More, A., Khane, S., Jadhav, D., Sahoo, H., & Mali, Y. K. (2024). Auto-shield: Iot based OBD Application for Car Health Monitoring. *2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 1–10.
<https://doi.org/10.1109/ICCCNT61001.2024.10726186>
23. Kezia, M., & Anusuya, K. V. (2023). IoT-based Web-Integrated OBD-II Telematics for Real-Time Vehicle Health Monitoring System. *2023 International Conference on Intelligent Technologies for Sustainable Electric and Communications Systems (iTech SECOM)*, 91–96.
<https://doi.org/10.1109/iTechSECOM59882.2023.10435307>
24. Hong, J., Liang, F., Yang, J., & Du, S. (2024). An exhaustive review of battery faults and diagnostic techniques for real-world electric vehicle safety. *Journal of Energy Storage*, 99, 113234.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113234>
25. Wu, C., Sehab, R., Akrad, A., & Morel, C. (2022). Fault diagnosis methods and Fault tolerant control strategies for the electric vehicle powertrains. *Energies*, 15(13), 4840.
<https://doi.org/10.3390/en15134840>
26. Kaplan, H., Tehrani, K., & Jamshidi, M. (2021). A fault diagnosis design based on deep learning approach for electric vehicle applications. *Energies*, 14(20), 6599.
<https://doi.org/10.3390/en14206599>
27. Car Scanner ELM OBD2. (n.d.).
<https://pdalife.com.ua/car-scanner-elm-obd2-android-a31553.html>

Гнатов Андрій Вікторович¹, д.т.н., проф., завідувач каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Аргун Щасяна Валіковна¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Сохін Павло Андрійович¹, аспірант кафедри автомобільної електроніки, тел. +38 0633473433, info@elektrocar.com.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2823-2239>

Григоренко Наталя Володимирівна¹, асистент, кафедра автомобільної електроніки, тел. +380950094520, hryhorenkonatalia11@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5849-1992>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

Using the Car Scanner ELM OBD-II program for diagnosing Hyundai Kona Electric

Annotation. Problem. The increasing popularity of electric vehicles (EVs) necessitates effective diagnostic methods tailored to their specific components, such as high-voltage batteries, inverters, and traction motors. Traditional diagnostic approaches designed for internal combustion engine (ICE) vehicles are not always suitable for EVs. **Goal.** To investigate the effectiveness of the Car Scanner ELM OBD-II application for diagnosing electric vehicles, particularly the Hyundai Kona Electric, and to assess its capabilities in monitoring key operational parameters. **Methodology.** The study involved real-time data collection and analysis using the Car Scanner ELM OBD-II application. Diagnostic tests were conducted on a Hyundai Kona Electric, focusing on evaluating the high-voltage battery's state of health (SOH), energy consumption analysis, and error code detection. The obtained results were compared with manufacturer specifications and alternative diagnostic methods. **Results.** The research confirmed that the Car Scanner ELM OBD-II provides valuable insights into EV operation, enabling real-time monitoring of the high-voltage battery, electric motor, and inverter. The analysis revealed that the tested vehicle had undergone a battery replacement, with a remaining SOH of 97.1% and an estimated capacity of approximately 62 kWh. Furthermore, the study demonstrated the application's ability to assess energy recuperation efficiency, charging cycles, and error code detection. **Originality.** Unlike conventional ICE diagnostics, this study focuses on the applicability of OBD-II tools for electric vehicles. The proposed methodology can be used to evaluate battery condition and overall EV performance, contributing to reduced maintenance costs and improved vehicle reliability. **Practical value.** The findings highlight the feasibility of using affordable OBD-II scanners for EV diagnostics, allowing users to independently monitor their vehicle's technical condition and detect potential

faults. This approach minimizes the need for costly professional diagnostics while enhancing EV efficiency and longevity.

Key words: *electric vehicle diagnostics, OBD-II scanner, battery state of health, real-time monitoring, Hyundai Kona Electric, energy recuperation, error code analysis.*

Arhun Shchasiana¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0993780451, shasyana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Hnatov Andrii¹, professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department, tel. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Sokhin Pavlo¹, postgraduate, Vehicle Electronics Department, e-mail: info@elektrocar.com.ua, tel. +38 0633473433,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2823-2239>

Hryhorenko Natalia¹, assistant, Vehicle Electronics Department, tel. +380950094520, hryhorenkonatalia11@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5849-1992>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Розробка методики перевірки каналу вимірювання швидкості роликового стенду пересувної станції діагностування (ПДС-Л)

Мармут І.А.¹, Горбик Ю.В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті розглянуто питання метрологічної перевірки вимірювальної системи інерційного роликового стенда. Одним із основних параметрів є значення поточної швидкості у контакті колеса автомобіля з роликами стенда. Розроблена методика перевірки каналу вимірювання швидкості з використанням фотоелектричного датчика вихідних імпульсів. Ця методика стосується перевірки всіх складових каналу трансляції вихідного сигналу. Розроблена методика перевірки базується на принципах інженерних знань в галузі метрології та засобів вимірювальної техніки. Застосування запропонованої методики перевірки вимірювальної системи дозволяє забезпечити об'єктивність оцінки вимірюваних параметрів та необхідну точність вимірів. Запропонована методика може використовуватися при проведенні метрологічної атестації роликового стенда.

Ключові слова: роликовий стенд, вимірювальна система, діагностичний параметр, швидкість, метрологічний контроль, похибки вимірювання.

Вступ

Повноцінне діагностування технічного стану гальмівних систем, силових агрегатів та трансмісій автомобілів може бути здійснено за допомогою роликових стендів. Найбільшу якість процесу забезпечують роликові стенди інерційного типу [1]. Це стосується, насамперед, у здатності такого обладнання відтворювати реальні швидкісні та температурні режими роботи всіх систем автомобілів [2]. Для фіксації діагностичних параметрів на роликових стендах обов'язкова наявність вимірювальної системи (ВС).

ВС роликового стенду повинна забезпечувати вимірювання діагностичних параметрів гальмівної системи чи силового агрегату. На відміну від вимірів під час досліджень, діагност повинен перевірити необхідну кількість об'єктів за певний час, тобто забезпечити високу продуктивність. Параметрами є різні фізичні величини: електричні, механічні, теплові, гідравлічні, оптичні. Однак зараз переважну частину параметрів вимірюють електричними методами.

У стендовій діагностиці автомобілів найчастіше об'єктом інтересу є такі параметри (механічні величини): переміщення, швидкість, кутова швидкість, прискорення, сила, момент сили, тиск та ін. При діагностуванні автомобілів на інерційних роликових стендах основним параметром є лінійна (кутова) швидкість.

Аналіз публікацій

Основним елементом ВС роликового стенда ПДС-Л є первинний датчик, від якого залежать метрологічні характеристики та точність діагностичного обладнання [1].

У роботі [3] приведений широкий спектр датчиків, які використовуються для вимірювання кутової швидкості (швидкості обертання), включаючи електричні, оптичні та механічні пристрої. Більш поширеними є електричні пристрої вимірювання швидкості: тахогенератори (ТГ) постійного та змінного струму. Особливості вимірювання кутової швидкості за допомогою таких пристроїв описано в роботах [3, 4].

ТГ постійного струму загалом точніше –

сигнал, що отримується з них не вимагає випрямлення і перетворення для подальшого виведення на прилад, що показує. ТГ змінного струму простіше, дешевше та надійніше. ТГ – це невеликий генератор, як правило, з постійними магнітами – вони дають кращу лінійність вихідної характеристики $U = f(\omega)$. Взагалі у вимірювальній техніці завжди прагнуть лінійного зв'язку між вихідним сигналом і вхідним, хоча це не завжди виходить. З розвитком цифрових вимірювальних приладів (ЦВП) для вимірювання шляху і швидкості все частіше використовують імпульсні датчики. У найпростішому вигляді – пара контактів, елемент, що їх замикає (або розмикає) та електричні схеми для рахунку та індикації числа імпульсів. Але контакти ненадійні (залипають, підгорають, ламаються). Зараз використовують безконтактні системи з фотоелектричними або індукційними датчиками. У роботі [5] розглянута система вимірювання швидкості обертання вала за допомогою інфрачервоного датчика із системою збору даних. У роботі [6] розглянутий принцип дії датчика крутного моменту та швидкості обертання для валів у механічних системах на основі резистивної та ємнісної ґраток. У роботі [7] контроль швидкості обертання щіткового двигуна постійного струму здійснюється за допомогою сигналу струму. Робота [8] присвячена питанню вимірювання миттєвої кутової швидкості з використанням в якості датчика двофазного n -полюсного генератора змінного струму. У роботі [9] розглянуто впровадження безконтактного вимірювання кутової швидкості на основі фотодатчика. Розглянемо принципи дії деяких систем.

Елемент, що задає сигнали – встановлений на обертовому валу обтюратор з пазами для фотодатчика або феромагнітний диск з виступами (наприклад, шестерня) для індуктивного датчика (Z – кількість пазів або виступів). Обтюратор [лат. *obturare* закупорювати, закривати вихід] – заслінка, що періодично перекриває світловий потік. Проріз обтюратора чи зуб шестерні збуджують на датчику імпульс. Кількість імпульсів відповідає шляху: $S = Z \cdot \delta S$.

Швидкість визначають дискретно шляхом розподілу кроку прорізів на проміжок часу між двома сусідніми імпульсами: $V_i = \delta S / t_i$. Імпульсні датчики не мають частин, що труться, зручні для цифрової обробки та подання. Однак вони дають східчастий сигнал.

ТГ створюють безперервний сигнал, зате складні, схильні до механічних пошкоджень і, через ковзання щіток по колектору та перескоків з ламелі на ламель, дають високочастотні сплески (завади), які доводиться фільтрувати та згладжувати.

Розглянемо можливість та придатність застосування розглянутих типів датчиків для роликів діагностичних стендів. На діагностичних стендах частіше вимірюють кутове прискорення. Використовують два основні методи: інерційне вимірювання безпосередньо прискорення та диференціювання сигналу швидкості.

Якщо кутову швидкість вимірюють тахогенератором або імпульсним датчиком, сигнал швидкості можна продиференціювати і отримати сигнал, пропорційний кутовому прискоренню (сповільненню). У першому випадку диференціювання виконують електрично за допомогою ланцюжка R - C (рис. 1).

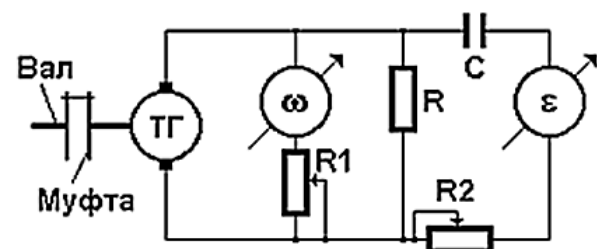


Рис. 1. Аналогова система вимірювання кутової швидкості та прискорення з тахогенератором постійного струму [1]

У аналоговій ВС отримують безперервний сигнал, імпульсної – ступінчастий. В обох випадках доводиться боротися із завадами, які викликані цикловими прискореннями, тобто паразитними прискореннями, що виникають через неточності монтажу.

Або заважає лінійна та кутова неспіввідповідність валів об'єкта та ТГ, або неконцентричність диска та вала. Через це вісь обертання вала та обтюратора не збігається з центром розбиття прорізів, у результаті виникає кругова нерівномірність кроку прорізів δS . Крім того, при нарізанні прорізів неминуче виникають похибки кроку: систематичні та випадкові. При вимірі швидкості це все несуттєво, зате при вимірі прискорення різко проявляється загальна похибка. Загалом, чим менше крок зубів, то менше сходинки на діаграмі. Зате більші кидки вихідної величини, які викликані похибками кроку. Тому доводиться задаватися мінімально можливою кількістю

прорізів. Тобто таким, при якому не втрачається діагностична інформація, наприклад, якісь високочастотні складові процесу.

У другому випадку (рис. 2) прискорення визначають для двох сусідніх інтервалів шляху (прорізів, зубів) шляхом обчислень.

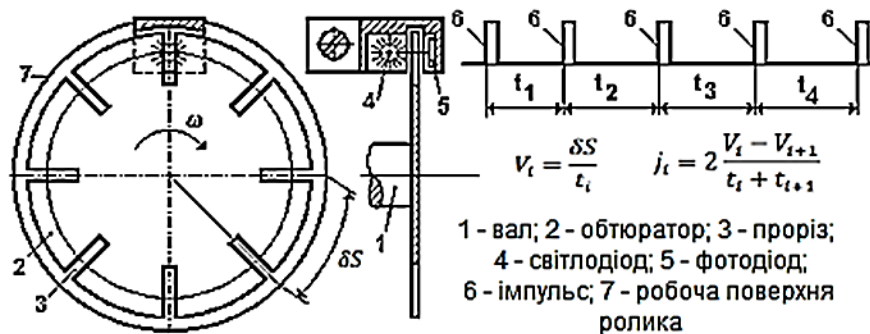


Рис. 2. Імпульсно-цифрова система вимірювання кутової швидкості та прискорення з фотодатчиком роликів ПДС-Л [1]

У розглянутих джерелах немає жодних рекомендацій щодо метрологічної оцінки систем вимірювання кутової (лінійної) швидкості. А питання точності реєстрації діагностичних параметрів є важливим при застосуванні ВС у складі відповідного обладнання. Не вирішені питання та особливості роботи таких датчиків у складі ВС роликів.

Деякі загальні питання метрологічного забезпечення величин та одиниць у цифрових системах розглянуті у роботах [10, 11]. У роботі [12] розглянуто одне із питань стосовно методики перевірки системи вимірювання потужності на роликів. Але для повної метрологічної оцінки ВС роликів цього недостатньо.

Таким чином, при розробці конструкцій роликів діагностичних стендів для автомобілів, виникає потреба приділяти достатню увагу вимірювальним системам, які забезпечують якість і точність перевірки, а також розробці методик метрологічної перевірки каналів такої вимірювальної системи. Це є обов'язковим при метрологічній атестації засобів вимірювальної техніки діагностичного обладнання.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є дослідження метрологічних характеристик ВС інерційного роликів та удосконалення методики перевірки каналу вимірювання швидкості, як основного діагностичного параметру.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі, які полягають у розробці наступних методик:

- метрологічного контролю системи «ролик – прорізи»;
- метрологічного контролю системи фотодатчиків і каналу трансляції електричних сигналів фотодатчиків;
- метрологічному контролю внутрішніх шкал часу ВС;
- метрологічному контролю каналу вимірювання швидкості.

Методика перевірки каналу вимірювання лінійної швидкості. Загальні положення

Канал вимірювання лінійної швидкості роликів (V_n) представляє собою послідовні ланки перетворювачів вимірювальної інформації. Кожний перетворювач в процесі свого функціонування може бути джерелом виникнення складової інструментальної похибки. Для отримання значень параметрів результуючої похибки каналу вимірювання швидкості необхідно одержати оцінку похибок частин каналу, кожна з яких включає декілька вимірювальних перетворювачів з подальшим підсумовуванням одержаних оцінок за відповідними правилами [13, 14].

У цьому випадку контроль основних складових частин каналу необхідно проводити в наступній послідовності:

- метрологічний контроль геометричних параметрів роликів і прорізів (перетворювачі «швидкість лінійна» → «швидкість кутова» → «частота проходження оптичних прорізів»);
- метрологічний контроль фотодатчиків і каналу трансляції електричних сигналів (перетворювач «частота проходження оптичних

прорізів» → «частота проходження електричних імпульсів струму»;

- метрологічний контроль внутрішніх шкал часу системи вимірювання частоти проходження електричних імпульсів на виході фотодатчиків і системи відображення інформації;

- імітація руху роликів електричними сигналами, що мають необхідні метрологічні характеристики з метою отримання характеристик вимірювального каналу «частота проходження електричних імпульсів» → «значення швидкості на приладі, що показує».

Розглянемо перераховані дії більш детально.

Метрологічний контроль системи «ролик – прорізи»

За допомогою кутового мікроскопа Delta Optical Smart 5MP PRO (точність 0,005 хв) провести контроль точності кроку прорізів обтюратора ($Z = 54$). Вимірювання проводити не менше 5 разів по тому діаметру обтюратора, що відповідає місцю установки фотодатчиків. Скласти протокол вимірювань, куди внести значення абсолютної похибки кроку $\Delta_{\text{щ}}$, відносної похибки кроку $\delta_{\text{щ}}$ і середнього квадратичного відхилення (СКВ) кроку – $\sigma(\Delta_{\text{щ}})$.

Провести вимірювання діаметру роликів за допомогою оптичного довжиноміра ІЗВ-2 в різних точках не менше 15 разів. Результати занести в протокол. Оцінити відносну похибку δ_p перетворення «швидкість лінійна – швидкість кутова», прийнявши як базовий діаметр – $D_p = 0,2387$ м.

Похибка перетворення «лінійна швидкість» → «частота проходження оптичних прорізів» обчислюється за формулою складання похибок від некорельованих джерел [15]:

$$\sigma(\Delta\Sigma) = \sqrt{\sigma^2(\Delta_1) + \sigma^2(\Delta_2) + \dots + \sigma_{\text{вим}}^2}, \quad (1)$$

де $\sigma_{\text{вим}}$ – СКВ процесу вимірювання параметрів прорізу.

Необхідно розрахувати відносну систематичну складову інструментальної похибки функції перетворення «лінійна швидкість» → «частота проходження оптичних прорізів» за формулою:

$$\delta_F = (D_p - \bar{D}) / D_p = 1 - \bar{D} / D_p, \quad (2)$$

де D_p – розрахунковий діаметр ролика, м;
 $\bar{D}$ – усереднений результат обмірів діаметру ролика, м.

Величина δ_F характеризує відхилення функції перетворення «лінійна швидкість» → «частота проходження прорізів» від розрахункової лінійної залежності $F_{\text{щ,розр.}} = \frac{\pi \cdot D_p \cdot Z}{V_{\text{л}}}$.

Це відхилення, в основному, визначається різницею фактичного усередненого діаметру ролика $\bar{D}$ від розрахункового значення D_p і забезпечує появу систематичної динамічної похибки вимірювання лінійної швидкості $V_{\text{л}}$:

$$\delta V_{\text{л}} = V_{\text{л}} \cdot \delta_F. \quad (3)$$

Величина випадкової складової інструментальної похибки перетворення «лінійна швидкість» → «частота проходження прорізів» залежить від інтервалу усереднювання за числом імпульсів від прорізів і може бути визначена, як результат багатократних вимірювань незалежних величин (момент появи прорізів) з подальшим усередненням:

$$\bar{\sigma}V_{\text{л}} = \frac{\delta V_{\text{л}}}{Z_{\text{вим}}}, \quad (4)$$

де $Z_{\text{вим}}$ – число прорізів, що використовуються для вимірювання швидкості.

Слід врахувати, що похибка $\bar{\sigma}V_{\text{л}}$ залежить як від абсолютного значення $V_{\text{л}}$, так і від $Z_{\text{вим}}$. При фіксованому часі усереднення (0,5с) вона збільшується із зменшенням $V_{\text{л}}$.

На підставі результатів аналізу величин, одержаних при виконанні вищевикладеного, робиться висновок про визнання придатності до експлуатації вимірювального перетворювача «лінійна швидкість» → «частота проходження прорізів».

Метрологічний контроль системи фотодатчиків і каналу трансляції електричних сигналів фотодатчиків

Із збільшенням швидкості до максимальних значень тривалість світового імпульсу, що

створюється прорізом, може виявитися сумірною з межею швидкодії як фотодатчика, так і каналу трансляції. Для перевірки швидкодії фотодатчиків необхідно використовувати осцилограф з шириною смуги пропускання каналу вертикального відхилення не менше 10^6 Гц. Схема перевірки швидкодії фотодатчиків стенду представлена на рис. 3.

При перевірці необхідно розігнати ролики до максимально можливої швидкості і почерговим підключенням щупа осцилографа до точок 1 і 2 (рис. 3) провести вимір параметрів електричних сигналів. Оформити у вигляді Таблиці 1.

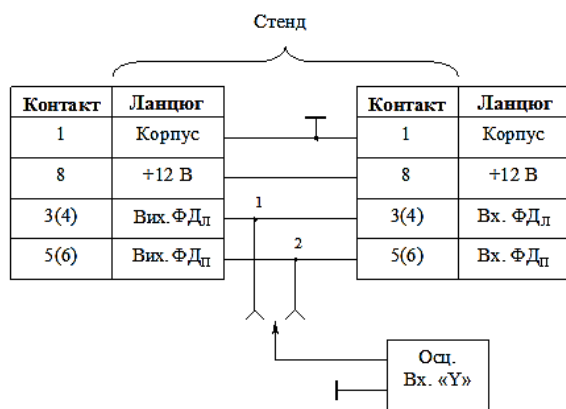


Рис. 3. Схема перевірки швидкодії фотодатчиків

Таблиця 1. Параметри електричних сигналів

Параметр	Одиниця вимірювання	Розрахункова формула
1. Амплітуда	В	-
2. Тривалість, τ	мкс	-
3. Період, T	мкс	-
4. Крутизна переднього фронту	мкс	-
5. Крутизна заднього фронту	мкс	-
6. Скважність розрахункова, Q_p	-	-
7. Скважність фактична, Q_ϕ	-	T / τ
8. Зниження скважності $\Delta Q / Q$	%	$\frac{ Q_\phi - Q_p }{Q_\phi} \cdot 100$

Система фотодатчиків признається годною до експлуатації, якщо $\Delta Q / Q \leq 10\%$ на максимальній вимірюваній швидкості. При цьому величини результатів вимірювань амплітуди,

тривалості, періоду, крутизна заднього і переднього фронтів імпульсів на виході каналу фотодатчиків лежать в межах (0,75...1,25) від розрахункових значень.

Метрологічний контроль внутрішніх шкал часу ВС

Для перевірки швидкодії каналу трансляції електричних імпульсів необхідно зібрати схему (рис. 4).

Дії і параметри, що заміряються, такі ж, як і при попередній перевірці.

Внутрішні шкали часу ВС використовуються для формування сигналів частоти і часу, необхідного при проведенні вимірювань. Основними сигналами часу і частоти є сигнал часу 0,5с (використовується для реєстрації часу спрацьовування гальмівної системи) і частотний сигнал 1 МГц (використовується для заповнення проміжків між імпульсами фотодатчиків – опорна частота).

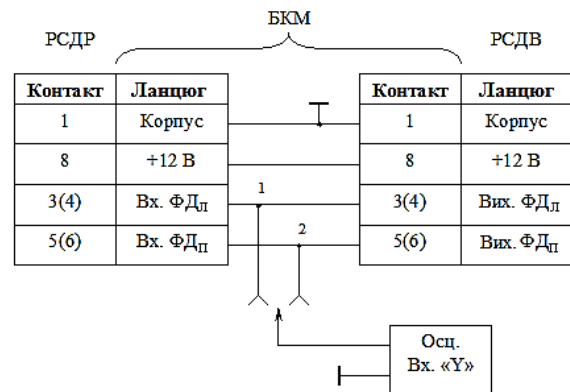


Рис. 4. Схема перевірки каналу трансляції електричних сигналів: БКМ – блок керування муфтами; РСДР – роз'єм сигналу датчиків (розетка), РСДВ – роз'єм сигналу датчиків (вилка)

Перевірку внутрішніх шкал часу і частоти необхідно проводити за допомогою частото-міра-хронометра ЧЗ-34. Підключення цього приладу здійснюється до метрологічних роз'ємів ВС – «1 МГц» і «0,5с – контроль» при включеній ВС. Провести серію вимірювань не менше $N_{\max} \gg 50$ циклів. Записати результати вимірювань значень опорної частоти $f_{\text{вим}}$ і сигналу 0,5с – $T_{0,5}$ у вигляді таблиць. Розрахувати відхилення значень, що замірялися, від номіналів – $\Delta f_{\text{вим}}$ і $\Delta T_{0,5}$.

Розрахунок абсолютних значень система-

тичної складової відхилень вимірюваних величин від номіналу провести за формулами:

$$\Delta_c(f_{\text{вим}}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{max}}} \Delta f_{\text{вим},i}}{N_{\text{max}}}; \quad (5)$$

$$\Delta_c(T_{0,5}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{max}}} \Delta T_{0,5i}}{N_{\text{max}}}. \quad (6)$$

Розрахувати відносну систематичну похибку за формулами:

$$\delta(f_{\text{вим}}) = \frac{\Delta_c(f_{\text{вим}})}{10^6}; \quad (7)$$

$$\delta(T_{0,5}) = \frac{\Delta_c(T_{0,5})}{0,5}. \quad (8)$$

Розрахувати СКВ величин від номінала за формулами:

$$\sigma(\Delta f_{\text{вим}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{max}}} (\Delta f_{\text{вим}})^2}{N_{\text{max}} - 1}}; \quad (9)$$

$$\sigma(T_{0,5}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{max}}} (\Delta T_{0,5i} - 0,5)^2}{N_{\text{max}} - 1}}. \quad (10)$$

За наслідками вимірів і розрахунків зробити висновок про придатність внутрішніх шкал частоти і часу ВС. Критерії придатності:

$$\begin{aligned} &\text{- за частотою} - \delta(f_{\text{вим}}) \leq 10^{-4}; \\ &\sigma(\Delta f_{\text{вим}}) \leq 250 \text{ Гц}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{- за часом } 0,5\text{с} - \delta(T_{0,5}) \leq 10^{-4}; \\ &\sigma(\Delta T_{0,5}) \leq 10^{-3} \text{ с}. \end{aligned}$$

Метрологічний контроль каналу вимірювання швидкості

Для проведення цього контролю необхідні генератор імпульсів Г5-54 і частотомір ЧЗ-32. Схема перевірки представлена на рис. 5.

РСДР

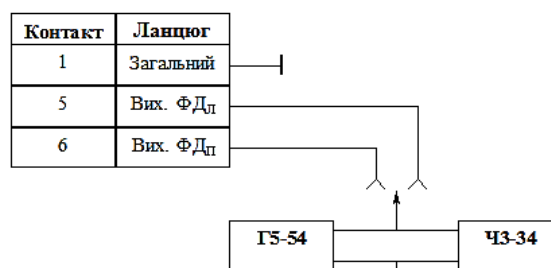


Рис. 5. Схема перевірки каналу вимірювання швидкості: РСДР – роз'єм сигналу датчиків (розетка)

Органами управління генератором Г5-54 встановити параметри вихідного сигналу відповідно до Таблиці 2.

За даними Таблиці 2 розрахувати:

а) абсолютну систематичну динамічну складову основної похибки каналу вимірювання швидкості:

$$\Delta_{c(i)} = V_{\Pi_i} - V_{K_i}; \quad (11)$$

Таблиця 2. Параметри вихідного сигналу

Швидкість, що контролюється, км/год	10	20	50	80
Показання ЧЗ-32: частота проходження V_{K_i} , імпл/с	200	400	1000	1600
Полярність	П	П	П	П
Тривалість імпульсу, мкс	50	25	10	6
Показання вимірювальної системи V_{Π_i} , км/год	10	20	50	80

б) середню відносну складову систематичної похибки каналу:

$$\delta_c = \sum_{i=1}^K \frac{\Delta_{c(i)}}{V_{K_i}}; \quad (12)$$

в) середньоквадратичне відхилення похибки каналу:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (V_{\Pi_i} - V_{K_i})^2}{K - 1}}. \quad (13)$$

Критерії придатності каналу вимірювання швидкості: $\delta_c \leq 0,05$; $\sigma_v \leq 2$ км/год.

Всі вимірювання і розрахунки провести незалежно для лівого і правого каналів.

Висновки

Виконані дослідження дозволяють оцінити спроможність вимірювальної системи інерційного роликового стенду забезпечувати:

- об'єктивність оцінки вимірюваних параметрів;
- мінімальний час, необхідний для проведення діагностичних операцій;
- стабільність вимірів;
- простоту і доступність для обслуговуючого персоналу;
- необхідну точність вимірів.

Запропонована методика перевірки каналу вимірювання швидкості на роликовому стенді забезпечує здійснення контролю за обладнанням, яке передбачає виконання технологічного процесу діагностування параметрів стану систем автомобілів за усіма вимогами заданих режимів, передбаченими регламентом. За необхідності можуть виконуватися ремонт і налагоджування засобів вимірювання. Це дозволяє забезпечити єдність вимірювань діагностичних параметрів та забезпечити необхідну точність.

3. В якості перспективи подальших досліджень передбачається розробка методик перевірки каналів вимірювання усталеного сповільнення, гальмівного шляху та часу спрацювання гальмівної системи автомобілів.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Говорущенко М.Я., Волков В.П., Рабінович Е.Х., Мармут І.А., Зуєв В.О. (2009). Роликові стенди для перевірки гальмівних та тягових властивостей автомобілів (теорія, розрахунок та конструювання): монографія. Харків: ХНАДУ, 344 с. Govorushchenko N., Volkov V., Rabinovich E., Marmut I., & Zuev V. (2009). Rolykovi stendy dlya perevirky hal'mivnykh ta tyahovykh vlastyvostey avtomobiliv. [Roller stands for testing brake and traction properties of cars (theory, calculation and design)]. Monograph. Kharkov: KhNAHU [in Ukrainian].
2. Мармут І.А., Кашканов В.А., Зуєв В.О. (2024). Дослідження режимів розгону автомобіля Skoda Octavia на роликовому стенді. Вісник машинобудування та транспорту. Науковий журнал. Вінниця, 1(19), 75-84. Marmut I., Kashkanov V., Zuev V. (2024). Doslidzhennia
- rezhymiv rozghonu avtomobilia Skoda Octavia na rolykovomu stendi. [Research of acceleration modes of Skoda Octavia on a roller stand]. Visnyk mashynobuduvannia ta transportu. Naukovyy zhurnal. Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. Scientific journal, 1(19), 75-84. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-75-84>.
3. Measure of Angular Velocity. URL: <https://www.scribd.com/document/255395227/Measure-of-Angular-Velocity>.
4. Ramazan Akkaya, Fatih Alpaslan Kazan. (2020). A New Method for Angular Speed Measurement with Absolute Encoder. Elektronika ir elektrotechnika, ISSN 1392-1215, VOL. 26, № 1. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eie.26.1.25307>.
5. P. Sapkota, N. Pokharel, R. Silwal, S. Chitrakar, H.P. Neopane, B. Thapa. (2023). Rotational Speed Measurement of a Shaft Using Infrared Sensor with NI Data Acquisition system and LabVIEW. Journal of Physics: Conference Series. 2629. 012020. doi:10.1088/1742-6596/2629/1/012020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2629/1/012020/pdf>.
6. Changxin Chen, Tiehua Ma, Hong Jin, Yaoyan Wu, Zhiwei Hou, Fan Li. (2020). Torque and rotational speed sensor based on resistance and capacitive grating for rotational shaft of mechanical systems, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 142, p. 106737. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327020301230>.
7. Qi Zhang, Bin Wen, Yongling He. (2021). Rotational speed monitoring of brushed DC motor via current signal, Measurement, Volume 184, p. 109890. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224121008307>.
8. Mihaia Horodincu, Ionut Ciurdea, Dragos-Florin Chitariu, Adriana Munteanu, Mihai Boca. (2020). Some approaches on instantaneous angular speed measurement using a two-phase n poles AC generator as sensor, Measurement, Volume 157, p. 107636. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224120301731>.
9. Amir Abu_Al_Aish, Wael Salah, Mohammad Ahmed, Mohd. Alrashdan, Wael AL-Sawalmeh. (2021). Implementation of Contactless angular Speed Measurement Based on Photo Sensor. Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 97 NR 3/2021, p. 80-83. <http://pe.org.pl/articles/2021/3/15.pdf>.
10. B.D. Hall, M. Kuster. (2021). Metrological support for quantities and units in digital systems. Measurement: Sensors, Volume 18, p. 100102. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100102>.
11. Мирошніченко Ю. (2022). Методика розробки метрологічного забезпечення технічного обслуговування за станом засобів зв'язку.

- Збірник «Інформаційні технології та безпека», 10(1), 108-121. Myroshnychenko Y. (2022). Metodyka rozrobky metrolohichnoho zabezpechennia tekhnichnoho obsluhovuvannia za stanom zasobiv zviazku. [Development methodology of metrological support of maintenance by the technical state of communication means]. Zbirnyk «Informatsiini tekhnologii ta bezpeka». Collection "Information Technology and Security", 10(1), 108-121. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2022.10.1.261191>.
12. Мармут І.А. (2020). Розробка методики перевірки системи вимірювання потужності на роликовому стенді пересувної діагностичної станції легкових автомобілів. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. Науковий журнал ХНТУСГ, 22, 19-26. Marmut I. (2020). Rozrobka metodyky povirky systemy vymiriuvannia potuzhnosti na rolykovomu stendi peresuvnoi diahnostychnoi stantsii lehkovykh avtomobiliv. [Development of a methodology for verifying the power measurement system on a roller stand of a mobile diagnostic station for passenger cars]. Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv. Naukovyi zhurnal KhNTUSH. Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes. Scientific journal, 22, 19-26. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37700/ts.2020.22.19-26>.
13. Т. Bubela, V. Yatsuk, M. Mykyjchuk, O. Kochan, Yu. Yatsuk. (2024). Ensuring uniformity of measurements in the European Metrology Cloud. Ukrainian Metrological Journal, 2024, № 1, 11-16. [in Ukrainian]. <http://umj.metrology.kharkov.ua/article/view/300869/293020>.
14. Жихарев В.М., Павлишин Р.Є. (2020). Основи метрології та стандартизації. Цикл лекційних і практичних занять. Навчально-методичний посібник. Ужгород: ТОВ "ПІК-У", 280 с. Zhykhariev V.M., Pavlyshyn R.Ie. (2020). Osnovy metrolohii ta standartyzatsii. Tsykl lektsiinykh i praktychnykh zaniat. [Fundamentals of metrology and standardization. Cycle of lectures and practical classes]. Educational and methodological manual. Uzhhorod. [in Ukrainian]. ISBN 978-617-7868-31-5.
15. Володарський Є.Т., Кошева Л.О., Потоцький І.О. (2021). Методи калібрування засобів вимірювальної техніки в умовах експлуатації: монографія. Вінниця. 162 с. Volodarskyi Ye.T., Kosheva L.O., Pototskyi I.O. (2021). Metody kalibruvannia zasobiv vymiriuvanoi tekhniki v umovakh ekspluatatsii. [Methods for calibrating measuring instruments in operating conditions]. Monograph. Vinnytsia. [in Ukrainian].
- Мармут Ігор Арнольдович¹, к.т.н., доц. каф. технічної експлуатації і сервісу автомобілів ім. Говорущенко М.Я., тел. +38 063-476-42-30, e-mail: mia2005.62@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4661-1336>.
- Горбик Юрій Васильович¹, к.т.н., доц. каф. технічної експлуатації і сервісу автомобілів ім. Говорущенко М.Я., тел. +38 099-617-01-06, e-mail: yuragorbik@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6876-8428>.
- ¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Development of a method for checking the speed measurement channel of the roller stand of a mobile diagnostic station (MDS-C)

Abstract. Problem. Today, the problem of monitoring and diagnosing the technical condition of rolling stock from the point of view of traffic safety is one of the most urgent. This control is especially important for systems whose technical condition affects traffic safety, primarily the braking system. It is possible to carry out a qualitative check of the specified car systems with the help of appropriate equipment. Such equipment includes roller stands. You can get reliable information about the condition of the car's braking system when diagnosing it on inertial type roller stands. One of the main parameters is the value of the current speed. **Goal.** The purpose of the work is to study the metrological characteristics of the measuring system of the roller stand and to improve the method of checking the speed measurement channel. **Methodology.** Analytical research methods were used to develop a method of checking the linear speed measurement channel of an inertial roller stand, based on the principles of engineering knowledge in the field of metrology and measuring equipment. The results of analytical studies allow comparison with the results of experiments obtained during the operation of the roller stand of the mobile diagnostic station. **Results.** Developed methods of metrological control of the channel for measuring the linear speed of an inertial roller stand: control of the "roller – slots" system; control of the photosensor system and photosensor electrical signal transmission channel; control of internal time scales of the measuring system. **Originality.** In the practice of instrumental diagnostics of the technical condition of cars, low-speed brake stands of the power type are used. These stands have differences in the structure of measuring systems compared to high-speed inertial stands. In the article, the methods of metrological verification of the measuring system of such an inertial stand are improved, taking into account the minimization of errors in the diagnosis of brake systems and the design features of the stand (diameter of rollers and primary

speed sensor). **Practical value.** The application of the proposed method of checking the measuring equipment allows to ensure: objectivity of the assessment of the measured parameters; the minimum time required for diagnostic operations; stability of measurements; simplicity and accessibility for service personnel; required accuracy of measurements. In addition, the proposed method can be used when conducting metrological certification of a roller stand.

Key words: roller stand, measuring system, diagnostic parameter, speed, metrological control, measurement errors.

Marmut Ihor¹, Ph.D. in Engineering, Assoc. Prof. of Technical Operation and Service of Cars Department named after Govorushchenko M.Ya.,
tel. +38 063-476-42-30,
e-mail: mia2005.62@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4661-1336>.

Gorbik Yuriy¹, Ph.D. in Engineering, Assoc. Prof. of Technical Operation and Service of Cars Department named after Govorushchenko M.Ya.,
tel. +38 099-617-01-06,
e-mail: yuragorbik@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6876-8428>.

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Порівняльний аналіз шарнірно-зчленованих автобусів за маневреністю

Сахно¹ В.П., Мурований² І.С., Шарай¹ С.М., Котенко² А.С.

¹Національний транспортний університет

²Луцький національний технічний університет

Анотація. Безпека руху автомобілів та автопоїздів значною мірою залежить від їх динамічних властивостей, зокрема маневреності, стійкості та керованості. Для транспортних засобів з великою довжиною, зокрема шарнірно-зчленованих автобусів, виникає потреба у додатковому керуванні колесами причіпної секції, яке може здійснюватися кінематичним або динамічним способом. За допомогою програмного забезпечення Maple 15 було проведено розрахунки габаритних радіусів та смуг руху транспортного засобу при різних маневрах. Результати моделювання показали, що керування колесами причіпної секції зменшує ширину смуги руху, що сприяє підвищенню маневреності. Також досліджувалося динамічне керування шляхом регулювання різниці крутних моментів на колесах, яке забезпечує ефективність гальмування та покращує керованість, проте має обмеження за швидкісними режимами через можливий ризик втрати стійкості.

Ключові слова: шарнірно-зчленований автобус, спосіб повороту, кут складання, різниця гальмівних моментів, маневреність.

Вступ

Безпечний рух автомобіля і автопоїзда багато в чому визначається його динамічними властивостями і, у значній мірі, маневреністю, стійкістю і керованістю. Для будь-якого транспортного засобу, у тому числі і для автобуса, основними параметрами призначення (показниками його здатності виконувати свої функції), є габаритні розміри, масові параметри, швидкісні та динамічні характеристики виконуваної транспортної роботи та ін. У залежності від умов експлуатації (транспортних і дорожніх) на перший план виходять різні параметри. Для всіх міських автобусів це пасажиромісткість, темп пасажирообміну, динаміка розганяння, стійкість, керованість, а для міських особливо великих, крім того, маневреність. У більшості країн світу габаритна довжина одиночних автобусів обмежується на рівні 12 м, хоч і зустрічаються конструкції довжиною до 15 м, а зчленованих – 18 м. Для автобусів особливо великого класу однією з найбільш значних властивостей є маневреність. Відповідно до ДСТУ UN/ECE R 36-03

пасажирські транспортні засоби великої місткості повинні вписатися у поворот із зовнішнім радіусом 12,50 м та внутрішнім 5,30 м.

У міському автобусному парку великих міст чільне місце займають шарнірно-зчленовані автобуси особливо великого класу загальною довжиною від 16,5 м до 18,5 м, місткістю від 150 до 200 чоловік і загальною масою 28-30 т.

Концепція створення автобусів особливо великого класу базується на гібридних технологіях. Поряд з автобусами з гібридними силовими установками у міських перевезеннях пасажирів широко використовують і автобуси з дизелями і рідше – електробуси. У роботі [1] виконано порівняння автобусів великого класу з гібридною силовою установкою, дизелем та електроприводом при їх роботі на одному і тому ж маршруті. На основі аналізу тягово-швидкісних властивостей шарнірно-зчленованих автобусів з різними силовими установками, зокрема MA3-215. M69, Otocar DRIVE 18 і NS_18diesel_ANG_ok.cdr з дизелями, URBAN WAY Iveco BUS і Urbino 18 Metro Style з гібридною силовою установкою і електробусів Otocar Citea KENT C і Citea

SLFA- 187 встановлено, що кращим автобусом є електробус Otocar Citea KENT C, якому дещо поступається автобус з гібридною силовою установкою Urbino 18 Metro Style. Про те, при остаточному виборі того чи іншого автобуса для конкретних умов експлуатації необхідно виходити не тільки з тягово-швидкісних властивостей, а із забезпечення необхідних показників маневреності і стійкості руху.

Автобуси особливо великого класу з метою забезпечення необхідної маневреності можуть бути виконані шарнірно-зчленованими, що складаються саме з автобуса і причіпної секції (причепи). Досягнення нормованих показників маневреності автобусів особливо великого класу загальною довжиною до 18 м можливе при тільки керованих передніх колесах тягової секції. При збільшенні загальної довжини ШЗА понад 18 м необхідне керування колесами причіпної секції.

Відомо, що в керованих автопоїздах, зокрема в ШЗА, поворот коліс причепа залежить від кута складання автопоїзда і швидкості руху: при маневруванні з малою швидкістю, коли відведенням коліс автобуса і причепа можна знехтувати, колеса причепа повертаються в бік, протилежний повороту коліс автобуса, причому кут їхнього повороту тим більший, чим менша швидкість руху і менший радіус повороту. З підвищенням швидкості руху - кут повороту керованих коліс причепа зменшується, радіус траєкторії збільшується і при досягненні певної швидкості взагалі стає рівним нулю, тобто привод управління колесами причепа повинен бути регульованим. Цього можна досягти при застосуванні як кінематичного, так і динамічного способу повороту, вибір якого і є актуальною задачею.

Аналіз публікацій

У практиці експлуатації ШЗА необхідно знати траєкторію і ширину проїзду, яка гарантувала б їх рух і вписуваність у задану смугу руху, а також геометричні параметри цих автопоїздів, що визначають можливість їх проїзду, якщо відомі характеристики ділянки дороги на в'їзді і виїзді.

Визначення показників маневреності ШЗА виконують за таких припущень [2]:

- опорна поверхня, по якій відбувається криволінійний рух автопоїзда, строго горизонтальна і має покращене покриття, яке не створює значного опору рухові;

- елементарні кінематичні ланки, що входять до складу ШЗА, розглядаються в подальшому як абсолютно жорсткі тіла, без врахування можливих внутрішніх деформацій пружних елементів, які входять до його складу, тому вертикальні переміщення центра мас ланок і нахил їх підресорених мас виключається;

- рух елементарної кінематичної ланки, якщо про це не буде сказано особливо, вважається обмеженим неголономним зв'язком, тобто напрям швидкостей всіх точок ходової осі ланки їй перпендикулярні [2].

Довжина автобусів, що розглядалися в роботі [2] знаходиться межах від 18 до 18,75 м. Автобуси загальною довжиною 18 м вписуються у нормативну ширину смуги руху за DIRECTIVE 2002/7/EC. Для автобусів загальною довжиною 18,75 м необхідна перевірка ширини габаритної смуги руху. Оскільки криволінійний рух АТЗ зумовлює конструкцію систем управління причіпних ланок, то на першому етапі необхідно визначитися з параметрами транспортного засобу при круговому русі [3] і виконання ним різних маневрів [4]. На другому етапі проводиться перевірка раніше отриманих параметрів на предмет задоволення показників стійкості як в прямолінійному русі, так і при виконанні ним різних маневрів. Вибір і оптимізація параметрів АТЗ для всього спектру експлуатаційних швидкостей і навантажень вимагає наявності диференціальних рівнянь руху. Такі рівняння різного ступеня складності наведені в роботах [5–6 і ін.]. Для дволанкових зчленованих автобусних поїздів рівняння для визначення показників маневреності та стійкості руху наведені в роботах [7-8], а для триланкових - в роботах [9-11].

У роботі [12] запропонована уніфікована модель, що включає динаміку повороту шарнірно-з'єднаної машини та повороту для будь-якої осі як тягового автомобіля (автобуса) так і причіпної секції. В моделі представлені всі можливі існуючі конфігурації автобусів, включаючи шарнірне з'єднання, розташування силового агрегату та компоновання активного шасі. Таке дослідження мотивоване ключовим питанням: як розробити уніфіковану модель, яка буде інклюзивною та налаштованою для всіх вищезазначених конфігурацій машини? Для розробки моделі крок за кроком представлено три шари процесу моделювання. Взаємодія шини з опорною поверхнею описана магичною формулою з урахуванням зміни вертика-

льного навантаження. Шарнірно-з'єднаний автобус представлений у вигляді системи диференціальних рівнянь. Валідація моделі показала на доцільність, ефективність та зручність запропонованого підходу, який можна налаштувати для будь-якого зчленованого транспортного засобу при визначенні параметрів стійкості у прямолінійному русі.

Розробці компактних і простих у використанні математичних моделей зчленованих транспортних засобів для планування, управління та локалізації руху присвячена робота [13], в якій пропонується модульний алгоритмічний підхід до кінематичного моделювання неголономних (багатоелементних) зчленованих автобусів. Кінематичні моделі дійсні за умови чистого кочення всіх коліс транспортного засобу (без ковзання), що практично виправдано для умов маневрування на низькій швидкості. Пропонований підхід призводить до компактних нелінійних моделей, які завдяки своїй модульній конструкції зберігають чітку геометричну інтерпретацію швидкісних зв'язків між сегментами транспортного засобу. Представлені розробки кінематичних моделей популярних конструкцій міських ШЗА для різних положень ведучої осі та можливостей управління. Перевірка експериментальної моделі, що проведена на повномасштабному зчленованому автобусі з приводом на ведучу вісь автобуса, підтвердила корисність цього підходу. У роботі [14] представлена одноколійна динамічна модель зчленованого автобуса, в основі якої лежать припущення, що поперечні прискорення передньої частини кузова і кути повороту зчленованого автобуса невеликі. Крім того, тертя та зазори в шарнірному зчепленні не враховуються. Система призначена для точного опису поступального та обертального руху транспортного засобу на базі диференціальних рівнянь кінематичних параметрів, що представляють шарнірно-зчленовані автобуси. Для рішення рівнянь використано Matlab-Simulink. Результати моделювання є функціями кінематичних та динамічних параметрів, що дозволяють визначати траєкторію та ширину траєкторії зчленованого автобуса. Отримані результати є основою для точної оцінки динамічної моделі та дослідження динаміки зчленованого автобуса на більш високому та більш складному рівні. Запропоновані математичні моделі різного ступеня складності потребують для свого аналізу великої кількості достовір-

них даних щодо конструкції ШЗА і параметрів шин їх коліс. Крім того, успішне розв'язання питання про маневреність ШЗА залежить і від правильного вибору розрахункової схеми, яка б найбільш повно відображала найважливіші фактори, що впливають на цю експлуатаційну властивість, і від точності оцінки сил взаємодії пневматичної шини з дорогою [3]. Тому показники маневреності ШЗА попередньо можна визначати за жорстких у бічному напрямку колесях. При цьому похибка у визначенні габаритних радіусів повороту, габаритної смуги руху і зміщень траєкторії ведених ланок щодо ведучої не перевищує 13%.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є поліпшення маневреності ШЗА за рахунок вибору раціональних компонентів параметрів ланок автопоїзда і приводу управління причіпною ланкою.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- аналіз існуючих рішень з компоновки ланок та систем управління причіпною ланкою для підвищення маневреності;
- вибір і обґрунтування раціональних компоновочних параметрів для забезпечення ефективного керування та маневреності;
- моделювання динамічних характеристик системи управління та оцінка її впливу на маневреність автопоїзда.

Результати дослідження

На рис. 1,а наведена схема повороту ШЗА з керованою (самоустановлювальною) віссю причепа, а на рис. 1,б – з некерованою віссю, які у подальшому приймаємо як основні для порівняння.

Позначимо через L_A відстань від площини, в якій знаходиться зовнішня габаритна точка до характерної точки шасі (точки, що знаходиться посередині задньої осі автобуса). Ця відстань для усього ряду ШЗА, що розглядаються, складає 8200 мм. Якщо прийняти внутрішній габаритний радіус $R_{вз} = 5,3$ м, то послідовно визначаючи із ΔOKC відстань OC , а із ΔOBC відстань OB , то за загальної довжини ШЗА на рівні 18,75 м отримаємо зовнішній габаритний радіус $R_{вн} = 12,92$ м, що не задовольняє вимогам DIRECTIVE 2002/7/EC.

Для ШЗА з керованим причепом габаритні радіуси повороту і габаритна смуга руху (ГСР) можна визначити за умови, що визначено кут складання автопоїзда.

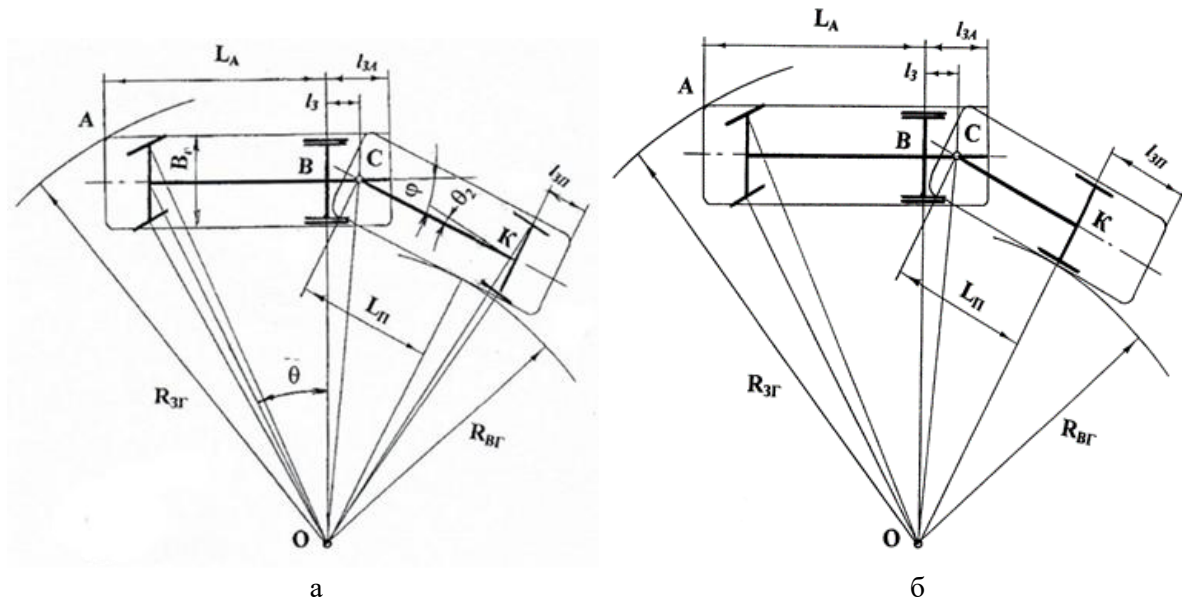


Рис. 1. Схема повороту ШЗА: а – з керованою віссю причепа; б – з некерованою віссю причепа

Диференціальне рівняння кута складання

ШЗА з керованим причепом, рис.1,а, записується у вигляді [2]:

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \omega_0 \left[1 - \frac{L_0 \sin\left(\frac{\phi_1}{i_1} - \alpha_0\right)}{L_1 \tan\theta \cos\alpha_0 \cos\left(\frac{\phi_1}{i_1} - \phi_1\right)} \right], \quad (1)$$

де $\omega = \frac{v \times \tan\theta}{L}$ – кутова швидкість повороту автобуса; L – база автобуса; θ – середній кут повороту керованих коліс автобуса; L_1 – база причепа; c_0 – відстань від характерної точки автобуса до точки зчипки з причепом;

$R = \frac{L}{\tan\theta}$ – миттєвий радіус повороту автобуса;

$\alpha_0 = \arctg \frac{c_0}{R}$ – кут, що визначає положення

точки зчипки автобуса і причепа; i_1 – передаточне відношення приводу управління віссю (колесами) причепа, яке лежить в межах 0,3...0,5 [1]; для ШЗА прийнято рівним 0,367 [15].

Розв'язок рівняння (1) можливий лише за умови його лінеаризації, яку можливо виконати, якщо прийняти що швидкість і кутова швидкість повороту автопоїзда величини сталі і визначена фаза його повороту.

ШЗА на повороті може знаходитися в одній із чотирьох фаз руху [15]:

1. Вхідна перехідна траєкторія – рівномірний поворот керованих коліс автомобіля-тягача $\theta = \theta \times t$. При цьому поворот керованих коліс продовжується до того часу, поки зовнішня габаритна точка автобуса не почне рухатися по дузі кола радіусом 12,5 м. Для першої фази повороту кут складання ϕ_1 визначається як [15]:

$$\phi_1 = \frac{(L_2 + c)i_1}{L} \times \left\{ \theta - L_2 i_1 k_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta}{L_2 i_1 k_1}\right) \right] \right\}, \quad (2)$$

де k_1 – режимний коефіцієнт при вході ШЗА в поворот, θ – кут повороту коліс; c – відстань від центру мас автобуса до точки зчипки.

Для визначення координат характерних точок автобуса і причепа, а відповідно і ГСР ШЗА скористаємося методикою розрахунку цих параметрів, наведених у роботі [2].

За цією методикою траєкторія характерної точки автобуса X_1, Y_1 і причепа X_2, Y_2 при вході в поворот задається у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= X_1(t) \\ Y_1 &= Y_1(t) \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} X_2 &= X_1 - L \times u(t) \\ Y_2 &= Y_1 - L \times v(t) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де $u(t)$ і $v(t)$ – допоміжні функції, які визначаються як:

$$u(t) = \frac{1 - \frac{1}{z_n^2} e^{2at}}{1 + \frac{1}{z_n^2} e^{2at}};$$

$$v(t) = \frac{\frac{2}{z_n} e^{at}}{1 + \frac{1}{z_n^2} e^{2at}};$$

$$z = (a - k) - \frac{2k}{\frac{a+k}{a-k} e^{kt} - 1}; \quad (4)$$

$$k = \sqrt{1 - a^2},$$

де z_n – нормальна реакція опорної поверхні колеса метробуса, a – кут нахилу поверхні дорogi.

Розв'язок рівняння (2) для ШЗА загальною довжиною 18,75 показав, що етап входу в поворот закінчується за кута повороту керованих коліс автобуса на рівні 0,5 рад.

2. Рух автобуса по колу за умови, що $\theta = \text{const}$ і $R = \text{const}$. Цей рух продовжується до тих пір, поки сумарний кут повороту автобуса ψ , що визначається від початку повороту, не стане рівним $\psi_2 = \alpha - \psi_1$ (α – заданий кут повороту автопоїзда; ψ_1 – кут повороту автобуса в кінці першого фази). Кут складання ШЗА визначиться як [15]:

$$\varphi_1 = \varphi_1(\tau_1) \exp\left(-\frac{R \times \varphi_1}{L_2 i_1}\right) + \frac{(L_2 + c) i_1}{L} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{R \varphi_1}{L_2 i_1}\right) - \varphi_0 \right\}, \quad (5)$$

де τ_1 – час руху ШЗА на круговій траєкторії.

Рівняння руху характерних точок автобуса і причепа при русі ШЗА по круговій траєкторії [2] записуються у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= R \cos t \\ Y_1 &= R \sin t \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= L[a \cos t - \sin(2 \arctg z - t)] \\ Y_2 &= L[a \sin t - \cos(2 \arctg z - t)] \end{aligned} \right\},$$

$$z = (a - k) - \frac{2k}{\frac{a+k}{a-k} e^{kt} - 1}.$$

Розв'язок рівняння (5) щодо кута складання ШЗА починаються за кута повороту керованих коліс автобуса досягнутого в кінці першої фази повороту, $\theta = 0,5$ рад. За цього кута повороту кут складання φ_1 при коловому русі ШЗА склав $\varphi_1 = 0,53$ рад.

3. На початку виходу автопоїзда з кругової траєкторії поворот керованих коліс продовжується до моменту, поки $\theta = \theta' - \dot{\theta} \times t = 0$ (θ' – кут повороту керованих коліс на круговій траєкторії, $\dot{\theta}$ – кутова швидкість повороту керованих коліс), тобто кут повороту керованих коліс автобуса не стане рівним нулю. Кут складання у цій фазі визначиться як [15]:

$$\varphi_1 = \varphi_1(\tau_2) \exp\left(-\frac{\theta' - \theta}{L_1 i_1 k_2}\right) + \frac{(L_1 + c) i_1}{L_0} \times \left\{ \theta + L_1 i_1 k_2 \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta' - \theta}{L_1 i_1 k_2}\right) \right] - (\theta' - \theta) \right\} \quad (7)$$

де k_2 – режимний коефіцієнт при виході ШЗА з повороту.

На початку виходу автопоїзда з кругової траєкторії координати характерної точки автобуса X_1, Y_1 і причепа X_2, Y_2 визначаються аналогічно входу в поворот (3).

При закінченні фази виходу з повороту автобуса кут $\theta = 0$, а кут складання $\varphi_1 = 0,38$ рад.

4. За прямолінійного руху ШЗА $\theta = 0$ кут складання визначиться як [2]:

$$\varphi_1 = \varphi_1(\tau_3) \exp\left(-\frac{S}{L_1 i_1}\right), \quad (8)$$

де S – шлях руху автобуса на прямолінійній траєкторії.

На етапі, коли автобус рухається по прямій виходу із повороту для координат характерних точок отримаємо:

$$\begin{aligned} X_1 &= v \times t; \quad Y_1 = R; \\ X_2 &= -L[a - (t - \frac{\pi}{2}) + \\ &+ \cos(2 \arctg \frac{1}{z_n} e^{a(t - \frac{\pi}{2})})]; \\ Y_2 &= L[a - \sin(2 \arctg \frac{1}{z_n} e^{a(t - \frac{\pi}{2})})] \end{aligned} \quad (9)$$

Прямолінійний рух ШЗА, тобто вихід і причепа на прямолінійну траєкторію (кут складання дорівнює 0) досягається на шляху 29,5 м.

За отриманими рівняннями для координат характерних точок автобуса і причепа, кута складання автопоїзда при заданому передаточному відношенні приводу управління віссю причепа з використанням програмного забезпечення Maple 15 визначені габаритні радіуси ШЗА і його габаритна смуга руху для різних видів повороту. Помітимо, що різні види повороту автопоїзда визначаються довжиною перехідної траєкторії, яка визначається часом і швидкістю руху ШЗА, кутом повороту кругової траєкторії і довжиною вихідної траєкторії.

У табл. 1 наведені результати розрахунку ГСР ШЗА як некерованого, так і з керованим причепом за умови, що зовнішня габаритна точка автобуса рухається по дузі кола радіусом 12,5 м.

Таблиця 1. Результати розрахунку ГСР ШЗА як некерованого, так і з керованим причепом

Тип ШЗА	Габаритна смуга руху, м		
	Рух по колу	Поворот на 90°	Поворот на 180°
З некерованим причепом	7,359	6,876	7,216
З керованим причепом	6,977	6,489	6,783

Аналіз розрахунків показує, що найбільше значення ГСР автобуса має місце при русі по

колу. При цьому габаритна смуга руху шарнірно-зчленованих автобусів на жорстких у бічному напрямку колесах з некерованим причепом лежить в межах $B_c=7,359$ м, що виходить за межі допустимої ($[B_c=7,2$ м]), у той час як для ШЗА з керованим причепом і причепом з самоустановлювальною віссю вона не перевищує допустимого значення $B_c=7,2$ м.

Окрім кінематичного способу управління колесами причепа може застосовуватися і спосіб управління, заснований на різниці крутних моментів на внутрішньому і зовнішньому колесі причепа.

Ефект управління причепом шляхом часткового гальмування коліс одного борту еквівалентний, у першому наближенні, ефекту від виникаючого при цьому моменту сил тертя. При цьому величина радіуса повороту ШЗА залежить не тільки від кута повороту керованих коліс автобуса, а і від величини гальмівного моменту і колеса, до якого він прикладений. Це дуже важливо для конструкції гібридних автобусів з електроприводом на вісь причіпної ланки, бо цим можна коректувати не тільки траєкторію ланок ШЗА, а і стійкість шарнірно-зчленованого автобуса [15].

Розглянемо систему управління ШЗА, що складається із системи управління безпосередньо автобусом (рульовий механізм, рульовий привод) і управління колесами причепа за рахунок різниці крутних моментів на його зовнішньому і внутрішньому колесах, тобто комбінованого способу управління. При цьому можливі два способи управління причепом – поворот коліс автобуса і причепа в різні сторони для зменшення радіуса повороту і поворот їх коліс в одну сторону – для здійснення руху ШЗА «крабом». При повороті усіх коліс в один бік на однаковий кут автомобіль отримує можливість рухатись по прямій під кутом до своєї поздовжньої осі. Такий рух може здійснюватися під час паркування ШЗА на зупинках або під час обгону [17]. «Рух крабом» при виконанні маневру «перестановка» дозволяє скоротити час на обгон без збільшення габаритів автомобіля у поперечному перерізі дороги, що позитивно впливає не тільки на безпеку руху, а й зменшує імовірність ураження інших машин. Однак реалізація «руху крабом» з поворотом усіх коліс на вантажних та багатовісних автомобілях пов'язана з багатьма конструктивними складностями. Допомогти у вирішенні вказаного завдання може застосування комбінованого способу повороту [2], при якому гальмуються

зовнішні колеса замість внутрішніх, що може сприятливо позначитися на маневреності та стійкості транспортного засобу [15]. Дослідженню комбінованого способу повороту колісних машин присвячено роботи [16].

У цих роботах отримані рівняння динаміки кругового руху машини колісної формули 4×4 при комбінованому способі управління поворотом, яке для ШЗА з керованим причепом шляхом гальмування одного з коліс осі причепа, записано у вигляді:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{tg\alpha}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} tg^2\alpha} \times \left[\frac{M_k}{r_{d1}} - \frac{fg}{L} - \frac{fh}{L^3} \times \left(V_{x1}^2 + b \frac{dV_{x1}}{dt} \right) \right] \times \left[tg^2\alpha + \frac{B}{2L^2m} tg\alpha \times \left(\frac{M_{k1}'' - M_{k1}'}{r_{d2}} \right) \right], \quad (10)$$

де ω – кутова швидкість автобуса в площині дороги, t – час, α – середній кут повороту керованих коліс автобуса, b – відстань від задньої осі до проекції центру мас автобуса на горизонтальну площину, m – маса автобуса; L – поздовжня колісна база автобуса, M_k – крутний момент на колесах задньої осі автобуса, r_{d1} і r_{d2} – динамічні радіуси задніх коліс автобуса і причепа, f – коефіцієнт опору кочення коліс автомобіля, h – висота центра мас автобуса, i_z – радіус інерції автобуса відносно вертикальної осі, V_{x1} – лінійна швидкість автобуса у напрямку поздовжньої осі, B – колія автобуса, M_{k1}'' і M_{k1}' – гальмівні моменти на внутрішньому і зовнішньому колесі причепа.

Крім того, у якості задаючого параметра на поворот причепа слід прийняти кут складання ШЗА і визначити кут поворот керованих коліс причепа саме у функції цього кута.

Визначимо необхідний кут повороту керованих коліс причепа, для того щоб ШЗА вписався у нормовану смугу руху ($R_{3z}=12,5$ м, $R_{6z}=5,3$ м).

З рис. 1,а отримаємо:

$$\theta_2 = \arcsin \frac{OK^2 + CK^2 - OC^2}{2OK \times CK} = 0,277 \text{ рад} = 15,88^\circ, \quad (11)$$

Зважаючи на те, що рух ШЗА здійснюється коловою траєкторією за зовнішнього габарит-

ного радіусу повороту $R_3=12,5$ м, кут повороту керованих коліс автобуса складе $\theta=30,8^\circ$. При цьому передаточне відношення умовного приводу управління колесами причепа склало б:

$$U_{np} = \frac{\theta_2}{\theta} = 0,516. \quad (12)$$

За визначеним кутом повороту керованих коліс причепа визначимо різницю крутних моментів на внутрішньому і зовнішньому колесі причепа за умови, що ШЗА рухається по колу зі сталою швидкістю, тобто $\frac{dv}{dt}=0$.

Отримаємо:

$$\left[\frac{M_k}{r_{d1}} - \frac{fg}{L} - \frac{fh}{L^3} \times V^2 tg^2\theta_2 + \frac{B}{2L^2m_n} tg\theta_2 \times \left(\frac{M_{k1}'' - M_{k1}'}{r_{d2}} \right) \right] = 0. \quad (13)$$

У виразі (12) невідомим залишається крутний момент M_k на ведучих колесах автобуса. Прийнемо, що ШЗА загальною масою $m=28000$ кг рухається коловою траєкторією зі швидкістю 10 м/с по дорозі з коефіцієнтом опору кочення $f=0,02$. Тоді:

$$M_k = m \times g \times f \times r_{d1} = 2774 \text{ Нм} \quad (14)$$

Шляхом розв'язку рівняння (13) визначимо різницю гальмівних моментів на колесах причепа, що забезпечила б їх куту повороту $\theta_2=0,277$ рад ($15,88^\circ$). Ця різниця склала $M_{k1}'' - M_{k1}' = 472$ Нм.

На рис. 2 наведені результати розрахунку різниці моментів на колесах причепа за швидкості 10,0 м/с, коефіцієнта опору кочення $f=0,02$ еквівалентної куту повороту керованих коліс причепа. Як слідує з наведеної залежності, при збільшенні умовного кута повороту керованих коліс причепа різниця моментів на його колесах прогресивно збільшується. Це необхідно передбачити в системі управління причепом.

На рис. 3 наведені габаритні смуги (ГСР) керованого і некерованого причепа, причому кут повороту керованих коліс якого визначався за кутом повороту керованих коліс автобуса і передаточного відношення приводу управління, а на рис. 4 –

габаритна смуга руху некерованого і керованого причепа шляхом гальмування коліс одного борту.



Рис. 2. Залежність різниці моментів на колесах причепа від кута повороту керованих коліс автобуса і причепа

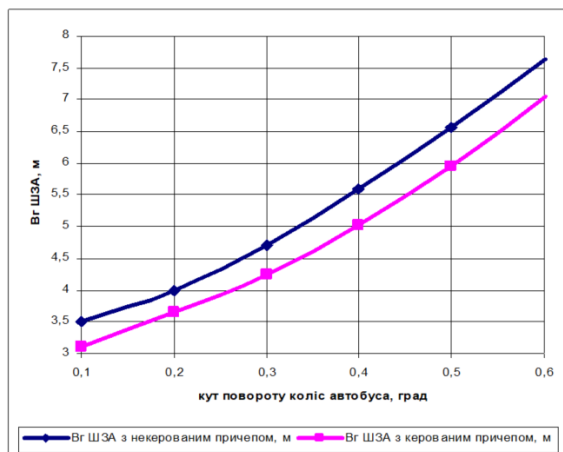


Рис. 3. ГСР ШЗА з керованим і некерованим причепом

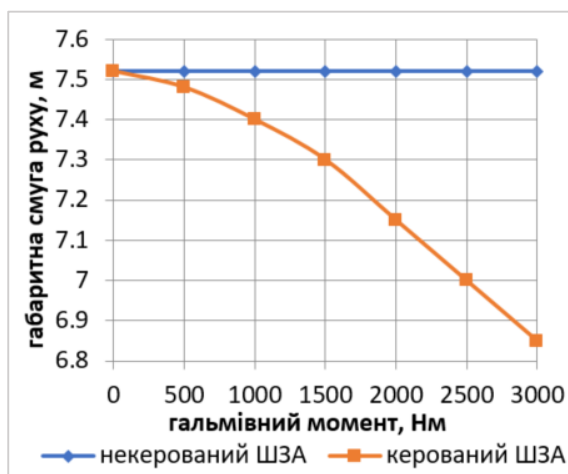


Рис. 4. ГСР ШЗА з некерованим і керованим причепом при гальмуванні коліс одного борту причепа

Як слідє з наведених рисунків, управління колесами причепа шляхом гальмування коліс одного борту майже ідентичне його керуванню шляхом повороту керованих коліс. Проте таке управління ефективне тільки при маневруванні з невеликими швидкостями (до 10 м/с), бо при збільшенні швидкості автобус може втратити стійкість.

Обговорення результатів

Безпечний рух автомобіля і автопоїзда багато в чому визначається його динамічними властивостями і, у значній мірі, маневреністю, стійкістю і керованістю. Для ШЗА довжиною до 18 м маневреність забезпечується. При збільшенні загальної довжини ШЗА понад 18 м необхідне керування колесами причіпної секції, яке може бути як кінематичним, так і динамічним. За кінематичного способу поворот коліс причіпної секції відбувається у функції кута складання автопоїзда і при обраному передаточному відношенні приводу управління причепом габаритна смуга руху ШЗА не перевищує допустимого значення.

Окрім кінематичного способу управління колесами причепа може застосовуватися і спосіб управління, заснований на різниці крутних моментів на внутрішньому і зовнішньому колесі причепа. Ефект управління причепом шляхом часткового гальмування коліс одного борту еквівалентний, у першому наближенні, ефекту від виникаючого при цьому моменту сил тертя. При цьому величина радіуса повороту ШЗА залежить не тільки від кута повороту керованих коліс автобуса, а і від величини гальмівного моменту і колеса, до якого він прикладений. За визначеної різниці гальмівних моментів на осі причепа габаритна смуга руху ШЗА майже не відрізняється від її значення при управлінні причепом шляхом повороту керованих коліс. Проте таке управління ефективне тільки при маневруванні з невеликими швидкостями (до 10 м/с), бо при збільшенні швидкості автобус може втратити стійкість.

При дослідженні такої складної динамічної системи, як ШЗА із керованою віссю причепа, гостро стоїть питання про дослідження стійкості його руху, причому до традиційної для одиночних автомобілів стійкості проти бічного заносу і перекидання додається стійкість проти складання. Крім традиційних аспектів стійкості, характерних для одиночних транспортних засобів, таких як стійкість

проти бічного заносу та перекидання, для ШЗА виникає додаткове завдання – забезпечення стійкості проти складання. Керованим автопоїздам притаманні властивості, які відсутні у випадку одиночних транспортних засобів. Питанням забезпечення стійкості руху ШЗА з керованим причепом будуть присвячені подальші дослідження.

Висновки

Показано, що для забезпечення нормованих показників маневреності ШЗА довжиною понад 18 м необхідне керування колесами причіпної секції, яке може бути як кінематичним, так і динамічним. За кінематичного способу поворот коліс причіпної секції відбувається у функції кута складання автопоїзда і при обраному передаточному відношенні приводу управління причепом габаритна смуга руху ШЗА не перевищує допустимого значення.

Встановлено, що за динамічного способу повороту величина радіуса повороту ШЗА залежить не тільки від кута повороту керованих коліс автобуса, а і від величини гальмівного моменту і колеса причепа, до якого він прикладений. За визначеної різниці гальмівних моментів на осі причепа габаритна смуга руху ШЗА майже не відрізняється від її значення при управлінні причепом шляхом повороту керованих коліс. Проте таке управління ефективне тільки при маневруванні з невеликими швидкостями (до 10 м/с), бо при збільшенні швидкості автобус може втратити стійкість.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Сахно, В.П., Маяк, М.М., & Котенко, А.С. (2024). До порівняльної оцінки шарнірно-зчленованих автобусів з різними силовими установками. *Сучасні технології в машинобудуванні і на транспорті*, 2, 197 – 207. Sakhno, V.P., Maiak, M.M., & Kotenko, A.S. (2024). Do porivnialnoi otsinky sharnirno-zchlenovanykh avtobusiv z riznymy sylovymy ustanovkamy. [Towards a comparative assessment of articulated buses with different power plants] *Advances in mechanical engineering and transport*, 2, 197 – 207. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1542> [in Ukrainian].
2. Поляков, В.М., Сахно, В.П. (2013). Триланкові автопоїзди. Маневреність. К.: НТУ. Polyakov, V.M., Sakhno, V.P. (2013) Trylankovi avtopoyizdy. Manevrenist. [Three-lane road trains. Maneuverability]. K.: NTU [in Ukrainian].
3. Sakhno, V., Murovany, I., Sharai, S. & Seleznev, V. (2017). Comparative evaluation of maneuverability of large and extra large class buses. *Mobile machines. International scientific conference*, Kaunas, Lithuania. Aleksandras Stulginskis University, pp.38-47.
4. Сахно, В.П., Біліченко, В.В., Поляков, В.М., & Омельницький, О.С. (2018). Маневреність метробусів. *Вісник машинобудування та транспорту: науковий журнал*, 2(6), 131–140. Sakhno, V.P., Bilichenko, V.V., Polyakov, V.M., & Omelnytskyi, O.Ye. (2018). Manevrenist metrobusiv. [Maneuverability of metrobuses] *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 2(6), 131–140. ISSN 2415-3486 [in Ukrainian].
5. Huang Y, Ma X, Ren L. Train Trajectory-Following Control Method Using Virtual Sensors. *Sensors*. 2024; 24(16):5385. <https://doi.org/10.3390/s24165385>
6. Tianlong Lei, Jixin Wang, Zongwei Yao Modelling and Stability Analysis of Articulated Vehicles. *Appl. Sci.* 2021,11,3663. <https://doi.org/10.3390/app11083663>
7. Sakhno, V., Poljakov, V., Myrovany, I., & Seleznev, V. (2016) Determination of movement stability of especiality large class hybrid bus with active trailer. *INMATEN – Agricultural engineering*. 2, pp. 107-118.
8. Сахно, В.П., Поляков, В.М., Мурованый, І.С., & Селезньов, В.Е. (2016). До попереднього оцінювання стійкості руху гібридного автобуса особливо великого класу з активним причепом. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 75, 75–82. Sakhno, V.P., Polyakov, V.M., Murovanyi, I.S., & Seleznev, V.E. (2016). Do poperednioho otsiniuvannia stiikosti rukhu hibrydnogo avtobusa osoblyvo velykoho klasu z aktyvnym prychemom. [Towards the preliminary assessment of the stability of motion of a hybrid articulated bus of the extra-large class with an active trailer] *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 75, 75–82. [in Ukrainian].
9. Sakhno, V., Gerlici, J., Poliakov, V., Kravchenko, A., Omelnitsky, O., & Lask, T. (2018). Road train motion stability in BRT system. *XXIII Polish-Slovak Scientific Conference Machine Modelling and Simulation. MMS 2018. Book of abstracts*, September 4-7, 2018, Rydzyna Poland, pp.49-57.
10. Y. Zhang, A. Khajepour, and Y. Huang. Multi-axle/articulated bus dynamics modeling: a reconfigurable approach. *Vehicle System Dynamics*, 56(9):1315–1343, 2018. <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1420205>
11. Michałek, M.M., Patkowski, B. and Gawron T. (2020), «Modular Kinematic Modelling of Articulated Buses», *IEEE TRANSACTIONS ON*

- VEHICULAR TECHNOLOGY, Vol. 69, No. 8, AUGUST, 8381 p.
<http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2020.2999639>
12. Zhang, Y., Khajepour, A., & Huang, Y. (2018). Multi-axle/articulated bus dynamics modeling: a reconfigurable approach. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 56(9), 1315–1343. <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1420205>
 13. Michałek, M., Patkowski, B., & Gawron, T. (2020). Modular kinematic modelling of articulated buses. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2999639>
 14. Dang, H. A., & Kovanda, J. (2014). Determination of trajectory of articulated bus turning along curved line. *Transactions on Transport Sciences*, 7(1). <https://doi.org/10.2478/trans-2014-0002>
 15. Сахно, В.П., Поляков, В.М., Шарай, С.М., Мурований, І.С., & Омельницький, О.Є. (2021). Шарнірно-членовані автобуси. Маневреність та стійкість: монографія. Луцьк: IBV Луцького НТУ. Sakhno, V.P., Polyakov, V.M., Sharai, S.M., Murovaniy, I.S., & Omelnytskyi, O.Ye. (2021). Sharnirno-zchlenovani avtobusy. Manevrenist ta stiikist: monograph. [Articulated buses. Maneuverability and stability: monograph] Lutsk: IVV of Lutsk NTU. [in Ukrainian].
 16. Подригало, М.А., Бобошко, О.О., Кайдалов, Р.О., & Нікорчук, А.І. (2016). Застосування комбінованого способу керування для здійснення руху автомобіля «крабом». Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, 75, 134–138. Podryhalo, M.A., Boboshko, O.O., Kaidalov, R.O., & Nikorchuk, A.I. (2016). Zastosuvannia kombinovanoho sposobu keruvannia dlia zdiisnennia rukhu avtomobilia "krabom". [Application of a combined control method for implementing crab motion in a vehicle] *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 75, 134–138. [in Ukrainian].
 17. Сахно, В.П., Стельмашук, В.В., Онищук, В.П., Попелиш, Д.М., & Томчук, С.М. (2019). До питання щодо динамічного способу управління автомобілем. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: науковий журнал, 2(13), 156–164. Sakhno, V.P., Stelmakhchuk, V.V., Onyshchuk, V.P., Popelysh, D.M., & Tomchuk, S.M. (2019). Do pytannia shchodo dynamichnoho sposobu upravlinnia avtomobilem. [On the issue of the dynamic method of vehicle control] *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport: Scientific Journal*, 2(13), 156–164. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13> [in Ukrainian].

Сахно Володимир Прохорович¹, д.т.н., проф., завідувач кафедри автомобілів, тел.+38 0676655344, e-mail:sakhno@ntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5144-7131

Мурований Ігор Сергійович², к.т.н., доцент, декан факультету транспорту та механічної інженерії, тел. +38 0506788281, e-mail: igor_lntu@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9749-980X

Шарай Світлана Михайлівна¹, к.т.н., проф. каф. міжнародних перевезень та митного контролю, тел. +38 0677833180, e-mail: svetasharai@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6568-4990

Котенко Андрій Степанович², аспірант 2 року навчання кафедри автомобілів і транспортних технологій, тел. +38 0632677498, e-mail: kotenko.a0015@lntu.edu.ua, ORCID: 0009-0004-5506-9985.

¹Національний транспортний університет, 02000, Україна, м. Київ, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1.

²Луцький національний технічний університет, 43000, м. Луцьк, вул. Львівська, 75.

Comparative Analysis of Articulated Buses in Terms of Maneuverability

Abstract. Problem. The safe operation of vehicles and road trains is largely determined by their dynamic properties, particularly maneuverability, stability, and controllability. In most countries, the overall length of single buses is limited, although designs exceeding this limit are occasionally encountered. For articulated buses (AB), the maximum permissible length is defined to ensure safety and performance. When the total length of an AB exceeds this limit, it becomes necessary to control the wheels of the trailer section, which can be achieved through either kinematic or dynamic steering. In the kinematic approach, the rotation of the trailer's wheels depends on the articulation angle of the road train, which changes during different phases of the turn—entry into the turn, circular motion (if applicable), and the exit of the leading section (bus) from the turn into straight-line motion. **Goal.** The goal of this study is to improve the maneuverability of articulated buses by selecting optimal layout parameters for the road train sections and the drive system for steering the trailer section. **Methodology.** The study employed computer software to determine the overall movement path of articulated buses with both steered and non-steered trailers. **Results.** Based on the derived equations for the coordinates of characteristic points of the bus and trailer, as well as the articulation angle of the road train for a given transmission ratio of the trailer axle steering mechanism, the software was used to determine the overall turning radii of ABs and their overall movement paths for various types of turns. The study established that the overall movement path of an

AB with non-steered trailer wheels and rigid lateral tires exceeds the permissible limits. Conversely, for ABs with steered trailers, the movement path remains within acceptable boundaries. **Practical Value.** In addition to the kinematic method of trailer wheel control, a method based on the difference in torque between the inner and outer trailer wheels can also be applied. It was found that during circular movement of the road train, the torque difference between the inner and outer trailer wheels reaches a level sufficient for steering control. Steering the trailer wheels by braking one side's wheels is nearly identical in effect to controlling them via steered wheels. However, this method is effective only at low maneuvering speeds since increasing speed can result in a loss of stability.

Key words: articulated bus; steering method; articulation angle; brake torque difference; maneuverability.

Sakhno Volodymyr¹, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Automobiles Department, e-mail: sakhno@ntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5144-7131

Murovanyi Igor², PhD. in Engineering, Assoc. Professor, Dean of the Faculty of Transport and Mechanical Engineering, e-mail: igor_lntu@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9749-980X

Sharai Svitlana¹, professor, PhD in Engineering, Professor International Transportation and Customs Control, e-mail: Svetasharai@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6568-4990

Kotenko Andrii², Second-year graduate student of the Department of Automobiles and Transport Technologies, e-mail: kotenko.a0015@lntu.edu.ua, ORCID: 0009-0004-5506-9985

¹National University of Transport, 02000, str. Mykhailo Omelyanovich-Pavlenko, 1, Kyiv, Ukraine.

²Lutsk National Technical University, 43000, str. Lvivska, 75, Lutsk, Ukraine.

Підвищення енергоефективності транспортних енергоустановок використанням комбінацій традиційного та альтернативних палив

Цюман М. П.¹

¹Національний транспортний університет

Анотація. У статті наведено результати досліджень використання різноманітних комбінацій традиційного та альтернативного палива, зокрема сумішей бензину та етанолу, а також додавання водню до суміші рідких палив та водневмісного газу до повітряного заряду. За результатами досліджень підтверджено можливість підвищення енергоефективності досліджуваної енергоустановки у окремому режимі роботи за окремими та груповим критеріями, зокрема, ефективним коефіцієнтом корисної дії, викидами забруднюючих речовин, вуглекислого газу та ступенем використання водню у створенні енергії.

Ключові слова: транспортна енергоустановка; енергоефективність; забруднюючі викиди; воднево-вуглецеве відношення; альтернативне паливо.

Вступ

Показники енергоефективності транспортної енергоустановки є її найголовнішими показниками. До цих показників доцільно відносити не лише паливноекономічні та енергетичні показники, а і екологічні показники, які залежать від виду витраченого палива та ефективності процесів перетворення енергії палива у ефективну роботу енергоустановки. Для сучасних транспортних енергоустановок важливим є також забезпечення мінімальних викидів парникових газів, зокрема, вуглекислого газу. З метою поліпшення вказаних показників енергоефективності транспортних енергоустановок останнім часом досліджуються різні способи використання альтернативних палив, як у вигляді самостійних, так і у вигляді добавок до традиційних палив.

Аналіз публікацій

Найбільша кількість досліджень останнім часом присвячена застосуванню альтернативних палив з відновлюваних джерел та використанню водню.

Для транспортних енергоустановок з двигунами з іскровим запалюванням великий

інтерес викликає етанол біологічного походження (біоетанол) [1]. Біоетанол отримують з рослинної сировини, яка споживає діоксид вуглецю з атмосфери протягом свого життєвого циклу. Отже, використання біоетанолу як моторного палива, за умови його виробництва з використанням електроенергії від нетеплових електростанцій, не порушує природного балансу діоксиду вуглецю.

На сьогодні проведено численні дослідження використання біоетанолу у суміші з бензином у різних співвідношеннях, зокрема: впливу використання суміші 25% біоетанолу та бензину на витрату палива та забруднюючі викиди автомобілем в експлуатаційних умовах [2]; стендові дослідження добавки до 5 % етанолу до бензину на потужність, крутний момент та питому ефективну витрату палива одноциліндрового двигуна [3]; впливу різних умов утворення паливовітряної суміші в циліндрі, що виникають внаслідок різних фізико-хімічних властивостей бензину і етанолу, на викиди твердих частинок двигуном з безпосереднім впорскуванням палива [4]; впливу вмісту етанолу в суміші з бензином на ефективність згорання, визначену за допомогою індексів викидів оксиду вугле-

цю та вуглеводнів і витрати палива, у двигуні з системою впорскування та датчиком етанолу у паливі [5]; використання сумішей бензину з різним вмістом зневодненого та вологого етанолу від 5 до 85 % на легковому транспортному засобі з двигуном з іскровим запалюванням, обладнаним системою контролю вмісту етанолу в паливі та впорскуванням в циліндр і трикомпонентним каталітичним нейтралізатором, проведені з використанням їздових циклів за процедурами NEDC та WLTC [6]; впливу добавки етанолу до бензину на паливну економічність та екологічні показники транспортного засобу, оснащеного карбюраторним двигуном [7]; впливу кута випередження запалювання на показники карбюраторного двигуна під час його роботи з використанням суміші етанолу та бензину [8]; впливу використання додаткового підігріву повітряного заряду на екологічні показники карбюраторного двигуна за роботи на суміші етанолу та бензину [9]; впливу ефективності управління подачею палива в двигуні з іскровим запалюванням, обладнаним системою нейтралізації, під час використання спиртовмісних палив з різним вмістом етилового спирту на витрату палива та забруднюючі викиди автомобілем під час руху в їздовому циклі [10].

Загальними висновками на основі цих досліджень є наступні: використання етанолу у суміші з бензином призводить до практично пропорційного його вмісту зростання годинної витрати палива; має місце ефект зниження температури свіжого заряду внаслідок підвищеної теплоти випаровування етанолу, що спричиняє додаткові ефекти, зокрема, підвищення наповнення циліндрів та порушення сумішоутворення в окремих випадках; ефективність використання сумішей етанолу з бензином різного складу залежить також від типу системи живлення (карбюраторна, впорскування у впускний трубопровід, безпосереднє впорскування), алгоритму управління паливоподачею (наявність або відсутність датчика вмісту етанолу), умов експлуатації, адаптації регульованих параметрів. Залежно від зазначених факторів можливе отримання як поліпшення, так і погіршення окремих показників паливної економічності та викидів окремих забруднюючих речовин за роботи двигунів з іскровим запалюванням на паливних сумішах з різним вмістом етанолу.

Також, актуальним з точки зору зниження викидів вуглекислого газу є використання водню та водневмісних газів для живлення транспортних енергоустановок. Водночас, відсутність розвинутої інфраструктури доставки водню до кінцевих споживачів призводить до пошуків доступних способів отримання водню. До таких відноситься електроліз водних розчинів лугів на борту транспортного засобу для отримання кисневоводневмісного газу, який додається до свіжого заряду двигуна [11]. Дослідженню використання таких сумішей присвячено велику кількість досліджень, зокрема: впливу додавання до повітряного заряду водневмісного газу, попередньо накопиченого в балоні під тиском, на показники карбюраторного двигуна [12]; впливу на показники карбюраторного двигуна використання генерованого водневмісного газу безпосередньо під час роботи двигуна [13]; впливу ефективності технології управління генеруванням водневмісного газу під час роботи двигуна з системою впорскування для забезпечення постійної частки водневмісного газу у повітряному заряді залежно від витрати повітря на ефективні показники двигуна за роботи на бензині [14] та на суміші бензину та 10 % біоетанолу [15]; впливу додавання генерованого під час роботи двигуна із впорскуванням бензину водневмісного газу в режимі низького навантаження на стабільність згоряння Perezbidennoy паливоповітряної суміші [16]; впливу використання системи додавання генерованого водневмісного газу до повітряного заряду двигуна з іскровим запалюванням з використанням термоелектричного генератора на паливну економічність та екологічні показники двигуна в різних режимах роботи та автомобіля під час руху в їздовому циклі [17].

Загальні висновки на основі цих досліджень є наступними: додавання водневмісного газу в невеликих кількостях спричиняє ефект поліпшення процесу згоряння основного палива, що підвищує показники енергоефективності, якщо не враховувати витрати на отримання цього газу; установка для електролізу на борту автомобіля споживає певну кількість електричної енергії з мережі електрообладнання транспортного засобу, що створює додаткове навантаження на колінчастому валу; для компенсації витрат на виробництво водневмісного газу необхідне використання компенсаційних джерел енергії,

найбільш доцільними з яких є рекуперативні. За умови компенсації витрат енергії на виробництво водневмісного газу під час роботи двигуна та управління кількістю доданого газу до повітряного заряду залежно від режиму роботи двигуна можливе поліпшення паливної економічності та екологічних показників автомобіля в окремих режимах (малих навантажень та холостого ходу) та в їздовому циклі.

Аналіз існуючих досліджень з питань впливу використання у двигунах з іскровим запалюванням сумішей бензину та етанолу різного складу та додавання водневмісного газу до повітряного чи свіжого заряду двигуна свідчить, що отримані результати описують вплив фіксованої кількості доданого етанолу чи водневмісного газу до бензину на окремі енергетичні, паливноекономічні та екологічні показники двигуна та не дають повної картини узагальненого впливу на загальну екологічну та енергетичну ефективність використання тих чи інших традиційних, альтернативних палив та їх сумішей у двигуні.

Мета та постановка задачі

Метою дослідження є підвищення енергоефективності транспортних енергоустановок визначенням доцільних для використання комбінацій традиційного та альтернативних палив, зокрема, бензину, етанолу, водневмісного газу, водню, на основі порівняння впливу воднево-вуглецевого відношення цих паливних сумішей на показники енергоефективності енергоустановки. Це дасть можливість обґрунтувати використання на транспорті паливних сумішей, які забезпечують одночасне поліпшення як паливної економічності, так і екологічних показників транспортних засобів, що, в свою чергу, сприятиме раціональному використанню енергетичних ресурсів та зниженню впливу транспорту на довкілля.

Для досягнення поставленої мети виконується уточнення математичної моделі робочого процесу транспортної енергоустановки з двигуном з іскровим запалюванням та математичне моделювання показників енергоефективності в залежності від кількості доданого до бензину етанолу, водневмісного газу чи водню для зміни воднево-вуглецевого відношення паливної суміші.

Уточнення математичної моделі робочого процесу транспортної енергоустановки з двигуном з іскровим запалюванням

Для дослідження впливу додавання етанолу, водневмісного газу чи водню на показники енергоефективності транспортної енергоустановки використана математична модель робочого процесу двигуна внутрішнього згоряння за методом об'ємного балансу [17], уточнена окремими залежностями, що визначають склад робочого тіла та продуктів згоряння, а також параметри процесу згоряння з урахуванням вмісту водневмісного газу, водню та біоетанолу.

Додавка водневмісного газу, водню або етанолу впливають в першу чергу на склад свіжого заряду, який потрапляє із впускного колектора у циліндр. Свіжий заряд в цьому випадку буде складатись з палива (суміші палив), повітря і/або водневмісного газу. Кількість свіжого заряду визначається під час моделювання процесу впуску з використанням диференціальних рівнянь, що описують елементарні кількості свіжого заряду, які потрапляють в циліндр за елементарні проміжки часу в залежності від поточних параметрів стану робочого тіла в циліндрі та свіжого заряду у впускному колекторі перед впускним клапаном. Інтегральне рівняння кількості свіжого заряду, що надходить в циліндр в процесі впуску (M_{C3} , кг) описується рівнянням:

$$M_{C3} = \int_{\varphi_{в.вп}}^{\varphi_{з.вп}} w_{C3i} \cdot \mu_{впi} \cdot \frac{P_{C3i}}{T_{C3i} \cdot R_{C3}} d\tau, \quad (1)$$

де $\varphi_{в.вп}$ – кут повороту колінчастого валу в момент початку відкриття впускного клапану, град п.к.в.; $\varphi_{з.вп}$ – кут повороту колінчастого валу в момент завершення закриття впускного клапану, град п.к.в.; w_{C3i} – швидкість рух свіжого заряду у прохідному перерізі впускного клапану в i -тий момент часу, м/с; $\mu_{впi}$ – ефективний прохідний переріз впускного клапану в i -тий момент часу, м²; P_{C3i} – тиск свіжого заряду перед впускним клапаном в i -тий момент часу, Па; T_{C3i} – температура свіжого заряду перед впускним клапаном в i -тий момент часу, К; R_{C3} – газова стала свіжого заряду, Дж/(кг·К); $d\tau$ – елементарний проміжок часу, с.

Газова стала свіжого заряду (R_{C3} ,

Дж/(кг·К)), який складається у загальному випадку з палива з різним вмістом етанолу чи у суміші з воднем, повітря та водневмісного газу, визначається з рівняння:

$$R_{C3} = \frac{8314}{1 - g_{H_2O} + \alpha \cdot l_0} \times \left(\frac{\alpha \cdot l_0 \cdot g_{H_2O}}{\mu_{H_2O}} + (1 - g_{H_2O}) \cdot \left(\frac{1}{\mu_{пал}} + \frac{\alpha \cdot l_0}{\mu_{пов}} \right) \right), \quad (2)$$

де g_{H_2O} – масова частка водневмісного газу у повітряному заряді; α – коефіцієнт надміру повітря; l_0 – теоретично необхідна кількість повітря для повного згоряння палива (суміші палив), кг палива/кг повітря; μ_{H_2O} , $\mu_{пал}$, $\mu_{пов}$ – мольні маси водневмісного газу палива (суміші палив) та повітря, кг/кмоль (Таблиця 1).

Теоретично необхідна кількість повітря для повного згоряння палива (суміші палив) (l_0 , кг палива/кг повітря), визначається з рівняння на основі відомої залежності [18]:

$$l_0 = \frac{\mu_{пов}}{0,21} \cdot \left(\frac{g_C^{пал}}{12} + \frac{g_H^{пал}}{4} - \frac{g_O^{пал}}{32} \right), \quad (3)$$

де $g_C^{пал}$, $g_H^{пал}$, $g_O^{пал}$ – масові частки вуглецю, водню та кисню у паливі (суміші палив).

Визначення масових часток вуглецю ($g_C^{пал}$), водню ($g_H^{пал}$) та кисню ($g_O^{пал}$) у суміші бензину, етанолу та водню здійснюється за залежностями:

$$g_C^{пал} = \left(g_C^{бенз} \cdot (1 - g_{ет}) + g_C^{ет} \cdot g_{ет} \right) \times (1 - g_{H_2}), \quad (4)$$

$$g_H^{пал} = \left(g_H^{бенз} \cdot (1 - g_{ет}) + g_H^{ет} \cdot g_{ет} \right) \times (1 - g_{H_2}) + g_{H_2}, \quad (5)$$

$$g_O^{пал} = \left(g_O^{бенз} \cdot (1 - g_{ет}) + g_O^{ет} \cdot g_{ет} \right) \times (1 - g_{H_2}), \quad (6)$$

де $g_C^{бенз}$, $g_C^{ет}$, $g_H^{бенз}$, $g_H^{ет}$, $g_O^{бенз}$, $g_O^{ет}$ – масові частки вуглецю, водню та кисню у бензині та етанолі відповідно (Таблиця 1); $g_{ет}$ – масова частка етанолу у суміші з бензином; g_{H_2} – масова частка водню у суміші з рідким паливом.

Мольна маса суміші бензину, етанолу та водню ($\mu_{пал}$, кг/кмоль) визначається із залежності:

$$\mu_{пал} = \frac{1}{\frac{g_{H_2}}{\mu_{H_2}} + (1 - g_{H_2}) \cdot \left(\frac{g_{ет}}{\mu_{ет}} + \frac{1 - g_{ет}}{\mu_{бенз}} \right)}, \quad (7)$$

де μ_{H_2} , $\mu_{ет}$, $\mu_{бенз}$ – мольні маси водню, етанолу та бензину, кг/кмоль.

Для визначення теоретично необхідної кількості повітря для повного згоряння суміші палива з водневмісним газом, кількості продуктів такого згоряння, тощо за відомими залежностями, необхідні значення масових часток вуглецю (g_C), водню (g_H) та кисню (g_O) у суміші основного палива та водневмісного газу, які визначаються за виразами (з урахуванням, що масові частки водню і кисню у водневмісному газі співвідносяться як 1:8):

$$g_C = g_{пал} \cdot g_C^{пал}, \quad (8)$$

$$g_H = \frac{g_{пал} \cdot (9 \cdot g_H^{пал} - 1) + 1}{9}; \quad (9)$$

$$g_O = \frac{g_{пал} \cdot (9 \cdot g_O^{пал} - 8) + 8}{9}, \quad (10)$$

де $g_{пал}$ – масова частка основного палива в суміші з водневмісним газом.

Годинна витрата водневмісного газу (G_{H_2O} , кг/год), яка використовується для визначення його частки у суміші з основним паливом, визначається із залежності:

$$G_{H_2O} = \frac{60 \cdot p_0 \cdot q_{H_2O}}{R_{H_2O} \cdot T_0 \cdot 10^3}, \quad (11)$$

де q_{H_2O} – продуктивність генератора водневмісного газу, л/хв; R_{H_2O} – газова стала водневмісного газу, Дж/(кг·К); p_0 – тиск навколишнього середовища, Па; T_0 – температура навколишнього середовища, К.

Кількість теплоти, що виділяється під час згоряння, визначається за відомими значеннями нижчої теплоти згоряння бензину, етанолу та водню в залежності від їхніх масових часток у паливній суміші.

Добавка водню, водневмісного газу, вміст етанолу в паливі, режим роботи, інші фактори впливають на тривалість і характер згоряння, що враховується під час моделювання

в законі згоряння [19], який описує поточну частку виділеної теплоти в процесі згоряння (x_i) як:

$$x_i = 1 - e^{-6.908 \cdot \left(\frac{\phi_i - (360 - \theta)}{k_{vz} \times \phi_z(n_d, p_s, g_{et}, R_{BF})} \right)^{k_{vz} \times m(n_d, p_s, g_{et}, R_{BF}) + 1}} \quad (12)$$

де ϕ_i – повороту колінчастого валу в i -тий момент часу, град п.к.в.; θ – кут випередження запалювання, град п.к.в.; k_{vz} – коефіцієнт, що враховує вплив на швидкість згоряння добавки водневмісного газу, водню та зміни складу паливоповітряної суміші; $\phi_z(n_d, p_s, g_{et}, R_{BF})$, $m(n_d, p_s, g_{et}, R_{BF})$ – тривалість (ϕ_z , град п.к.в.) та показник характеру згоряння (m) в функції від частоти обертання (n_d , хв⁻¹), тиску у впускному трубопроводі (p_s , Па), вмісту етанолу в суміші з бензином (g_{et}), ступеня рециркуляції відпрацьованих газів (R_{BF} , %), які було уточнено в дослідженнях [20, 21].

Коефіцієнт впливу на швидкість згоряння добавки водневмісного газу, водню та зміни складу паливоповітряної суміші (k_{vz}) описується рівнянням, що враховує відомі залежності [22, 23]:

$$k_{vz} = 0,222 \cdot r_{H_2O} + (1 - r_{H_2O}) \times \left(r_{H_2} \frac{2,2}{10 - \alpha^3} + (1 - r_{H_2}) \frac{41,43}{77,14 - 35,7\alpha} \right), \quad (13)$$

де r_{H_2O} – об'ємна частка водневмісного газу у суміші з паливом і повітрям в циліндрі; r_{H_2} – об'ємна частка водню у суміші з рідким паливом.

Концентрації у відпрацьованих газах оксиду вуглецю (C_{CO} , %) та вуглеводнів ($C_{C_mH_n}$, млн⁻¹) описано поліноміальними залежностями, що враховують режим роботи двигуна, коефіцієнт надміру повітря, хімічний склад палива, та інші фактори. Концентрації діоксиду вуглецю (C_{CO_2} , %) визначено відомими залежностями теорії ДВЗ від елементарного складу паливної суміші [18] з урахуванням фактичної концентрації СО. Концентрації оксидів азоту (C_{NO_x} , млн⁻¹) визначено з використанням термохімічної теорії їх утворення під час моделювання робочого циклу двигуна

на [24]. Ці залежності уточнено на основі стендових досліджень двигуна [2, 17, 25].

Таким чином, загальні вирази для моделювання концентрацій виглядають як:

$$C_{CO} = C_{CO}^{бенз}(n_d, p_s, \alpha) \cdot k_f; \quad (14)$$

$$C_{C_mH_n} = C_{C_mH_n}^{бенз}(n_d, p_s, \alpha, R_{BF}) \cdot k_f; \quad (15)$$

$$C_{NO_x} = k_{NO} \cdot 8314 \cdot \frac{T_{NO_{max}}}{P_{NO_{max}}} \cdot 6 \cdot 10^{25} \times \int_{\phi_0}^{\phi_{NO_{max}}} e^{-\frac{69090}{T_i}} N_{2i} \sqrt{\frac{O_{2i}}{T_i}} d\tau; \quad (16)$$

$$C_{CO_2} = \begin{cases} \text{при } \alpha > 1: \\ \frac{100 \cdot \frac{g_C}{3} \cdot \frac{0,21}{\alpha}}{\frac{g_C}{3} + g_H - \frac{g_O}{8} + \frac{g_H + \frac{g_O}{8}}{\alpha} - \frac{0,21}{0,21}} - C_{CO} \\ \text{при } \alpha \leq 1 \\ \frac{100 \cdot \frac{g_C}{3} \cdot \frac{0,21}{0,79\alpha}}{\frac{g_C}{3} + 2g_H - \frac{g_O}{0,79\alpha} + \frac{g_C}{3} + g_H - \frac{g_O}{8}} - C_{CO} \end{cases}, \quad (17)$$

де $C_{CO}^{бенз}(n_d, p_s, \alpha)$, $C_{C_mH_n}^{бенз}(n_d, p_s, \alpha, R_{BF})$ – поліноміальні залежності концентрацій C_{CO} (%) та $C_{C_mH_n}$ (млн⁻¹) у ВГ бензинового двигуна [2, 17, 25]; k_f – коефіцієнт, що враховує вплив вмісту вуглецю в паливі на концентрації C_{CO} та $C_{C_mH_n}$; k_{NO} – коефіцієнт корекції

концентрації C_{NO_x} відповідно до результатів експериментальних досліджень;

$p_{NO_{max}}, T_{NO_{max}}$ – тиск (Па) та температура (К) робочого тіла в циліндрі у момент досягнення максимальної мольної концентрації NO_x ; $\varphi_0, \varphi_{NO_{max}}$ – кут повороту колінчастого валу в моменти початку згоряння та досягнення максимальної мольної концентрації NO_x , град.п.к.в.; T_i – поточна температура робочого тіла у циліндрі в i -тий момент часу, К; N_{2i}, O_{2i} – поточні мольні концентрації азоту і кисню в циліндрі в i -тий момент часу, моль/см³.

На основі концентрацій шкідливих речовин визначаються масові викиди цих речовин ($G_{CO}, G_{CmHn}, G_{NO_x}$ та G_{CO_2}) за виразами, які враховують елементарний склад та витрату палива, кг/год:

$$G_{CO} = \frac{C_{CO}}{100} \cdot \mu_{CO} \cdot M_{ПЗ}^{сух}; \quad (18)$$

$$G_{CmHn} = \frac{C_{CmHn}}{10^6} \cdot \mu_{CmHn} \cdot M_{ПЗ}^{сух}; \quad (19)$$

$$G_{NO_x} = \frac{C_{NO_x}}{10^6} \cdot \mu_{NO_x} \cdot M_{ПЗ}^{вол}; \quad (20)$$

$$G_{CO_2} = \frac{C_{CO_2}}{100} \cdot \mu_{CO_2} \cdot M_{ПЗ}^{вол}, \quad (21)$$

де $\mu_{CO}, \mu_{CmHn}, \mu_{NO_x}, \mu_{CO_2}$ – мольні маси CO, $CmHn$ (за C_6H_{14}), NO_x (за NO_2) та CO_2 , кг/кмоль; $M_{ПЗ}^{сух}, M_{ПЗ}^{вол}$ – кількість сухих та вологих продуктів згоряння за годину, кмоль/год, які визначають за відомими виразами теорії ДВЗ [18], уточненими з урахуванням додавання водневмісного газу до свіжого заряду:

– при $\alpha \leq 1$:

$$M_{ПЗ}^{сух} = \frac{1}{1 + k_{п}} \times \left[\left(\frac{g_C}{12} + k_{п} \cdot \left(\frac{g_C}{4} + \frac{g_H}{2} - \frac{g_O}{16} \right) \right) \times (G_{пал} + G_{HNO}) + \frac{0,79 + 0,37 \cdot k_{п}}{\mu_{пов}} \cdot G_{пов} \right], \quad (22)$$

$$M_{ПЗ}^{вол} = \left(\frac{g_C}{12} + \frac{g_H}{2} \right) \cdot (G_{пал} + G_{HNO}) + \frac{0,79}{\mu_{пов}} \cdot G_{пов}; \quad (23)$$

– при $\alpha > 1$:

$$M_{ПЗ}^{сух} = \left(\frac{g_O}{32} - \frac{g_H}{4} \right) \cdot (G_{пал} + G_{HNO}) + \frac{G_{пов}}{\mu_{пов}}; \quad (24)$$

$$M_{ПЗ}^{вол} = \left(\frac{g_H}{4} + \frac{g_O}{32} \right) \cdot (G_{пал} + G_{HNO}) + \frac{G_{пов}}{\mu_{пов}}, \quad (25)$$

де $G_{пал}, G_{пов}$ – годинні витрати палива і повітря, кг/год; $k_{п}$ – відношення кількості H_2 до кількості CO у продуктах неповного згоряння, яке може бути визначено як:

$$k_{п} = 1,6306 \cdot \frac{g_H}{g_C} + 0,1788. \quad (26)$$

Ефективний ККД (η_e) визначається як:

$$\eta_e = \frac{3,6 \cdot N_e}{G_{пал} \cdot h_{пал}^{пал} + G_{HNO} \cdot h_{пал}^{HNO}}, \quad (27)$$

де N_e – ефективна потужність енергоустановки, кВт; $h_{пал}^{пал}, h_{пал}^{HNO}$ – нижча теплота згоряння палива (суміші бензину, етанолу або водню) та водневмісного газу, МДж/кг (Таблиця 1).

Нижча теплота згоряння ($h_{пал}^{пал}$, МДж/кг) суміші бензину, етанолу та водню визначається з урахуванням нижчої теплоти згоряння та масових часток компонентів суміші:

$$h_{пал}^{пал} = (h_{пал}^{бенз} (1 - g_{ет}) + h_{пал}^{ет} g_{ет}) \times (1 - g_{H_2}) + h_{пал}^{H_2} g_{H_2}, \quad (28)$$

де $h_{пал}^{бенз}, h_{пал}^{ет}, h_{пал}^{H_2}$ – нижча теплота згоряння відповідно бензину, етанолу та водню, МДж/кг (Таблиця 1).

Нижча об'ємна теплота згоряння паливо-

повітряної суміші (q_n^s , МДж/м³) визначається з урахуванням її складу та параметрів навколишнього середовища:

$$q_n^s = \frac{G_{\text{пал}} \cdot h_{\text{пал}} + G_{\text{ННО}} \cdot h_{\text{ННО}}}{(G_{\text{пал}} + G_{\text{ННО}}) \cdot (1 + \alpha \cdot l_0)} \times \frac{p_0}{R_{\text{CЗ}} \cdot T_0} \quad (29)$$

Значення параметрів базових палив, що використовуються під час розрахунку, (бензину, етанолу, водню, водневмісного газу) для отримання паливних сумішей, які досліджуються, наведено у Таблиці 1. Параметри водневмісного газу отримано розрахунковим шляхом на основі відомих параметрів водню і кисню відповідно до хімічної реакції електролізу води.

Таблиця 1. Параметри базових палив [18, 26]

Назва	Значення			
Вид палива	бензин	етанол	водень	водневмісний газ
Мольна маса, кг/кмоль	115	46	2	12
Елементарний склад:				
g_{C}	0,855	0,522	0	0
g_{H}	0,145	0,130	1	0,111
g_{O}	0	0,348	0	0,889
Теоретично необхідна кількість повітря для повного згоряння, кг/кг	14,82	8,98	34,46	0
Відношення H_2/CO у продуктах згоряння	0,455	0,585	—	—
Нижня теплота згоряння, МДж/кг	43,7	26,8	119,7	13,32

На основі отриманих показників витрати палива та викидів забруднюючих речовин здійснюється визначення критеріїв енергоефективності транспортної енергоустановки.

Груповий критерій енергоефективності енергоустановки (η) визнається як добуток окремих критеріїв:

$$\eta = \eta_e \eta_{\text{H}_2\text{O}} \eta_{n_d} \eta_{\alpha} \eta_{\text{CO}} \eta_{\text{CO}_2} \eta_{\text{NO}_x} \eta_{\text{C}_m\text{H}_n}, \quad (30)$$

де $\eta_{\text{H}_2\text{O}}$, η_{CO} , η_{CO_2} , η_{NO_x} , $\eta_{\text{C}_m\text{H}_n}$, η_{n_d} , η_{α} — окремі критерії енергоефективності за еквівалентними викидами H_2O , CO , CO_2 , NO_x ,

C_mH_n , ефективності управління коефіцієнтом надміру повітря та частотою обертання вихідного валу енергоустановки.

Окремі критерії ефективності управління коефіцієнтом надміру повітря (η_{n_d}) та частотою обертання вихідного валу (η_{α}) енергоустановки у даному дослідженні дорівнюють одиниці та не враховуються, оскільки зміни режимів роботи не відбувається. Окремий критерій енергоефективності за еквівалентним викидом H_2O ($\eta_{\text{H}_2\text{O}}$) визначається як:

$$\eta_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{G_{\text{H}_2\text{O}} h_{\text{H}_2\text{O}}}{\left(R_{\text{CO}} G_{\text{CO}} h_{\text{CO}} + G_{\text{CO}_2} h_{\text{CO}_2} + G_{\text{H}_2\text{O}} h_{\text{H}_2\text{O}} - R_{\text{NO}_x} G_{\text{NO}_x} h_{\text{NO}_2} + R_{\text{C}_m\text{H}_n} G_{\text{C}_m\text{H}_n} \right) \times \frac{G_{\text{пал}} \cdot h_{\text{пал}} + G_{\text{ННО}} \cdot h_{\text{ННО}}}{G_{\text{пал}} + G_{\text{ННО}}} + G_{\text{пал}} \Delta h_a \quad (31)$$

де $G_{\text{H}_2\text{O}}$ — масовий викид H_2O , кг/год; $h_{\text{H}_2\text{O}}$, h_{CO} , h_{CO_2} , h_{NO_2} — теплові ефекти утворення H_2O , CO , CO_2 , NO_2 , МДж/кг ($h_{\text{H}_2\text{O}} = 12,7$, $h_{\text{CO}} = 4,9$, $h_{\text{CO}_2} = 8,96$, $h_{\text{NO}_2} = -1,12$ [27]); R_{CO} , $R_{\text{C}_m\text{H}_n}$, R_{NO_x} — коефіцієнти відносної агресивності CO , C_mH_n , NO_x ($R_{\text{CO}} = 1,0$, $R_{\text{C}_m\text{H}_n} = 3,16$, $R_{\text{NO}_x} = 41,1$ [28]); Δh_a — нереалізована внаслідок неповноти згоряння

зв'язана енергія палива при $\alpha < 1$, МДж/кг [18].

Окремий критерій енергоефективності за еквівалентним викидом CO (η_{CO}) представлений у виразі (32); за еквівалентним викидом CO_2 (η_{CO_2}) — у виразі (33); за еквівалентними викидами NO_x (η_{NO_x}) — у виразі (34) і за еквівалентними викидами C_mH_n ($\eta_{\text{C}_m\text{H}_n}$) — у виразі (35):

$$\eta_{CO} = 1 - \frac{R_{CO} G_{CO} h_{CO}}{\left(R_{CO} G_{CO} h_{CO} + G_{CO_2} h_{CO_2} + G_{H_2O} h_{H_2O} - R_{NO_x} G_{NO_x} h_{NO_2} + R_{C_m H_n} G_{C_m H_n} \times \right. \\ \left. \times \frac{G_{пал} \cdot h_{н}^{пал} + G_{HNO} \cdot h_{н}^{HNO}}{G_{пал} + G_{HNO}} + G_{пал} \Delta h_a \right)}; \quad (32)$$

$$\eta_{CO_2} = 1 - \frac{G_{CO_2} h_{CO_2}}{\left(R_{CO} G_{CO} h_{CO} + G_{CO_2} h_{CO_2} + G_{H_2O} h_{H_2O} - R_{NO_x} G_{NO_x} h_{NO_2} + R_{C_m H_n} G_{C_m H_n} \times \right. \\ \left. \times \frac{G_{пал} \cdot h_{н}^{пал} + G_{HNO} \cdot h_{н}^{HNO}}{G_{пал} + G_{HNO}} + G_{пал} \Delta h_a \right)}; \quad (33)$$

$$\eta_{NO_x} = 1 + \frac{R_{NO_x} G_{NO_x} h_{NO_2}}{\left(R_{CO} G_{CO} h_{CO} + G_{CO_2} h_{CO_2} + G_{H_2O} h_{H_2O} - R_{NO_x} G_{NO_x} h_{NO_2} + R_{C_m H_n} G_{C_m H_n} \times \right. \\ \left. \times \frac{G_{пал} \cdot h_{н}^{пал} + G_{HNO} \cdot h_{н}^{HNO}}{G_{пал} + G_{HNO}} + G_{пал} \Delta h_a \right)}; \quad (34)$$

$$\eta_{C_m H_n} = 1 - \frac{\left(R_{C_m H_n} G_{C_m H_n} \times \frac{G_{пал} \cdot h_{н}^{пал} + G_{HNO} \cdot h_{н}^{HNO}}{G_{пал} + G_{HNO}} \right)}{\left(R_{CO} G_{CO} h_{CO} + G_{CO_2} h_{CO_2} + G_{H_2O} h_{H_2O} - R_{NO_x} G_{NO_x} h_{NO_2} + R_{C_m H_n} G_{C_m H_n} \times \right. \\ \left. \times \frac{G_{пал} \cdot h_{н}^{пал} + G_{HNO} \cdot h_{н}^{HNO}}{G_{пал} + G_{HNO}} + G_{пал} \Delta h_a \right)}; \quad (35)$$

Уточнена математична модель робочого процесу транспортної енергоустановки дозволяє здійснювати дослідження показників енергоефективності в залежності від складу паливної суміші, який доцільно представити у вигляді воднево-вуглецевого відношення Н/С. Збільшення цього відношення характеризує посилення ролі водню у продукуванні енергії транспортною енергоустановкою та зменшення ролі вуглецю, що в цілому збільшує енергоефективність.

Дослідження впливу воднево-вуглецевого відношення паливної суміші на показники енергоефективності транспортної енергоустановки

Представлена математична модель була уточнена з використанням результатів експериментальних досліджень двигуна VW BBY, встановленого у лабораторії випробувань двигунів Національного транспортного університету (Таблиця 2), зокрема, використання сумішей бензину та 25 % етанолу [10], системи додавання водневмісного газу до повітряного заряду з використанням термоелектричної рекуперації теплової енергії відпра-

цьованих газів для компенсації витрат електричної енергії на генерування водневмісного газу [17], впливу ступеня рециркуляції відпрацьованих газів на показники робочого процесу двигуна [20], впливу використання сумішей бензину та 50 % і 75 % етанолу на індикаторні показники [21], паливну економічність та екологічні показники двигуна [25].

З використанням уточненої моделі робочого процесу транспортної енергоустановки з двигуном з іскровим запалюванням досліджено вплив складу свіжого заряду на показники енергоефективності транспортної енергоустановки в окремому режимі роботи з частотою обертання 2400 хв^{-1} та навантаженням 30 Нм (рис. 1–8). Результати досліджень отримано за наступних значень регулювальних параметрів: коефіцієнт надміру повітря $\alpha = 1,0$; кут випередження запалювання $\theta = 18,5$ град п.к.в. Адекватність математичної моделі, використаної для досліджень, підтверджується порівнянням експериментальних даних та змодельованих параметрів енергоустановки, зокрема, годинних витрат палива (рис. 1) та повітря (рис. 2), концентрацій у відпрацьованих газах CO , $C_m H_n$, NO_x ,

CO₂ (рис. 6). Відхилення розрахункових та експериментальних значень не перевищують 10-12 %.

Залежності годинної витрати палива від його складу та вмісту водневмісного газу у повітряному заряді (рис. 1) показують, що додавання різних сполук по різному впливає на витрату палива. При збільшенні масової частки етанолу (C₂H₅OH) у паливі від 0 до 1 його витрата зростає з 3,54 до 5,51 кг/год. При збільшенні масової частки водневмісного газу (ННО) у повітряному заряді від 0 до 1 витрата бензину знижується з 3,54 до 0 кг/год, однак, з'являється витрата ННО до 13,82 кг/год; сумарна витрата бензину та ННО таким чином зростає з 3,54 до 13,82 кг/год. При цьому, у зоні з $g_{\text{ННО}} = 0,7 \dots 0,8$

досягається максимальна сумарна витрата бензину та ННО 14,5...14,7 кг/год, яка потім знижується до 13,82. При використанні суміші водню (H₂) та бензину збільшення масової частки H₂ з 0 до 0,1 практично не змінює витрати суміші палив, а подальше збільшення масової частки H₂ до 1 знижує як сумарну витрату суміші палив (з 3,54 до 1,58 кг/год), так і витрату бензину (з 3,54 до 0 кг/год); витрата H₂ зростає з 0 до 1,58 кг/год. При цьому, розрахункова еквівалентна витрата ННО, необхідна для отримання 1,58 кг/год H₂ складе також близько 14 кг/год, що співрозмірно із витратою ННО при його безпосередньому використанні у якості добавки до свіжого заряду.

Таблиця 2. Технічні параметри двигуна VW BBY

Назва	Значення
Вид палива	бензин А-95, етанол
Число / розташування циліндрів	4 / рядне
Робочий об'єм двигуна, л	1,39
Діаметр циліндра / хід поршня, мм	76,5 / 75,6
Ступінь стиснення	10,5
Номинальна потужність, кВт / частота обертання колінчастого валу, хв ⁻¹	55 / 5000
Максимальний крутний момент, Нм / частота обертання колінчастого валу, хв ⁻¹	126 / 3800
Число впускних / випускних клапанів на циліндр	2 / 2
Система нейтралізації відпрацьованих газів	два трикомпонентних каталітичних нейтралізатори

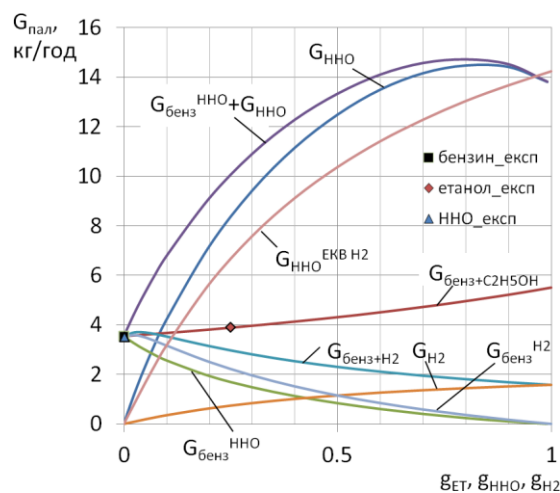


Рис. 1. Залежності годинної витрати палива від його складу та вмісту водневмісного газу у повітряному заряді

Витрата повітря (рис. 2) при збільшенні частки C₂H₅OH незначно знижується з 52,5 до 49,5 кг/год; при збільшенні частки ННО – знижується з 52,5 до 0 кг/год (оскільки, ННО являє собою по суті стехіометричну водне-

кисневу суміш); при збільшенні частки H₂ з 0 до 0,1 – зростає з 52,5 до 59,2 кг/год, при подальшому збільшенні частки H₂ до 1 – знижується з 59,2 до 54,6 кг/год.

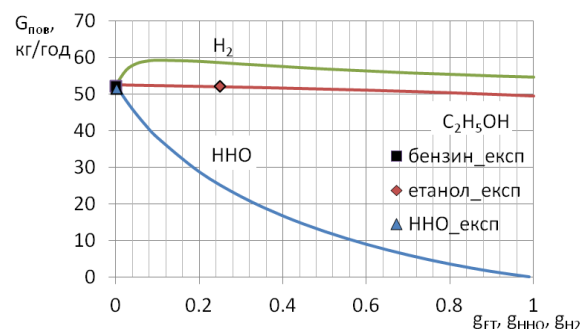


Рис. 2. Залежності годинної витрати повітря від складу палива та вмісту водневмісного газу у повітряному заряді

Такі закономірності зміни витрати повітря пов'язані із регулюванням положення дросельної заслінки та тиску у впускному трубопроводі для підтримання встановленого швидкісного та навантажувального режиму роботи

двигуна ($n = 2400 \text{ хв}^{-1}$, $M_e = 30 \text{ Нм}$). При додаванні $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ступінь відкриття дросельної заслінки та тиск у впускному трубопроводі поступово знижуються, що призводить до зниження витрати повітря, внаслідок підвищення ефективного ККД двигуна з 0,175 до 0,184 (рис. 3) при деякому зниженні нижчої об'ємної теплоти згоряння паливоповітряної суміші з 3,45 до 3,32 МДж/м³ (рис. 4).

При цьому, вплив підвищення ефективного ККД є більш вагомим фактором, тому, відбувається зниження споживання повітря. При додаванні ННО зниження витрати повітря відбувається як з причини відсутності потреби у повітрі для спалювання ННО, так і під дією поступового прикриття дросельної заслінки та зниження тиску у впускному трубопроводі внаслідок суттєвого зростання нижчої об'ємної теплоти згоряння паливоповітряної суміші з 3,45 до 6,54 МДж/м³ (рис. 4). Зниження ефективного ККД з 0,175 до 0,132 (рис. 3), при цьому, не є таким суттєвим, як збільшення теплоти згоряння паливоповітряної суміші.

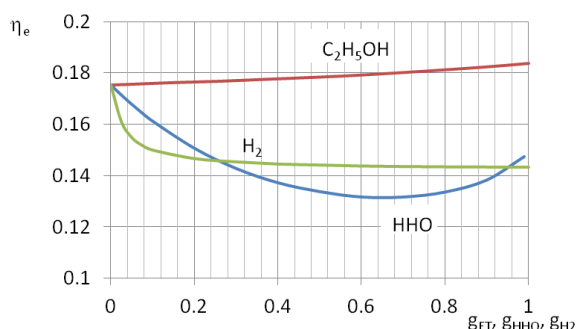


Рис. 3. Залежності ефективного ККД від складу палива та вмісту водневмісного газу у повітряному заряді

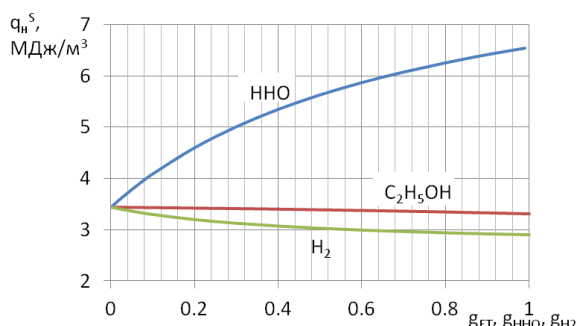


Рис. 4. Залежності нижчої об'ємної теплоти згоряння паливоповітряної суміші від складу палива та вмісту водневмісного газу у повітряному заряді

При додаванні H_2 ступінь відкриття дросельної заслінки та тиск у впускному трубопроводі зростають, що призводить спочатку до збільшення витрати повітря (за частки H_2 з 0 до 0,1), внаслідок зниження ККД з 0,175 до 0,15 (рис. 3) при одночасному зниженні нижчої об'ємної теплоти згоряння паливоповітряної суміші з 3,45 до 3,3 МДж/м³ (рис. 4) на цій ділянці. У подальшому, при збільшенні частки H_2 ефективний ККД знижується несуттєво (до 0,143), нижча об'ємна теплота згоряння продовжує знижуватись до 2,91 МДж/м³, що викликає подальше збільшення ступеня відкриття дросельної заслінки та тиску у впускному трубопроводі. Однак, на відміну від додавання $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ та ННО, додавання H_2 разом зі зниженням нижчої об'ємної теплоти згоряння підвищує масову теплоту згоряння паливоповітряної суміші, а оскільки масова частка повітря у такій суміші зростає, то це спричиняє поступове зниження годинної витрати повітря.

Характер отриманих залежностей ефективного ККД (рис. 3) пояснюється відповідним впливом складу свіжого заряду на параметри робочого процесу двигуна (рис. 5). Як видно із представлених залежностей (рис. 5), додавання $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ незначно впливає на тривалість згоряння (рис. 5а), змінюючи його в межах з 42,4 до 44,7 град. п.к.в. (за частки $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ від 0 до 0,5) та з 44,7 до 41,5 град. п.к.в. (за частки $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ від 0,5 до 1); показник характеру згоряння (рис. 5б) майже лінійно знижується від 3,93 до 3,59. Така зміна параметрів процесу згоряння призводить до зміни максимального тиску в циліндрі (рис. 5в) з 3,7 до 3,5 МПа (за частки $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ від 0 до 0,5) та з 3,5 до 3,76 МПа (за частки $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ від 0,5 до 1). Максимальна температура в циліндрі (рис. 5г) при цьому змінюється з 2920 до 2855 К (за частки $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ від 0 до 0,6) та з 2855 до 2875 К (за частки $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ від 0,6 до 1) також через зміну теплоємності робочого тіла.

Додавання ННО призводить зниження тривалості (з 42,4 до 10 град. п.к.в.) та характеру згоряння (з 3,93 до 1) (рис. 5а,б) внаслідок більшої швидкості згоряння водню. При цьому, максимальний тиск у циліндрі (рис. 5в) спочатку збільшується з 3,7 до 5 МПа (за частки ННО від 0 до 0,6), потім дещо знижується до 4,8 МПа. Це відбувається внаслідок збільшення швидкості згоряння з одного боку та суттєвого зменшення маси робочого тіла в циліндрі (рис. 1, 2) з іншого. Крім того,

останнє є основною причиною суттєвого зростання максимальної температури робочого тіла в циліндрі (рис. 5г) з 2920 до 7700 К (збільшення середньої максимальної температури у 2,6 рази відбувається внаслідок зростання максимального тиску у 1,4 рази, зменшення маси робочого тіла у 4 рази при збільшенні газової сталої у 2,4 рази відповідно до рівняння стану газу).

Додавання H_2 з масовою часткою з 0 до 0,1 різко збільшує об'ємну частку водню з 0 до 0,86. Внаслідок цього різко збільшується швидкість згоряння, що призводить до різко-

го зменшення тривалості (з 42,4 до 14 град. п.к.в.) та характеру згоряння (з 3,93 до 1,2) (рис. 5а,б); збільшення максимального тиску (з 3,7 до 6,15 МПа) та температури (з 2920 до 3320 К) в циліндрі (рис. 5в,г). Подальше збільшення масової частки H_2 з 0,1 до 1 збільшує його об'ємну частку з 0,86 до 1, що призводить до поступового зменшення тривалості (з 14 до 10 град. п.к.в.) та характеру згоряння (з 1,2 до 0,84) (рис. 5а,б); збільшення максимального тиску (з 6,15 до 6,8 МПа) та температури (з 3320 до 3600 К) в циліндрі (рис. 5в,г).

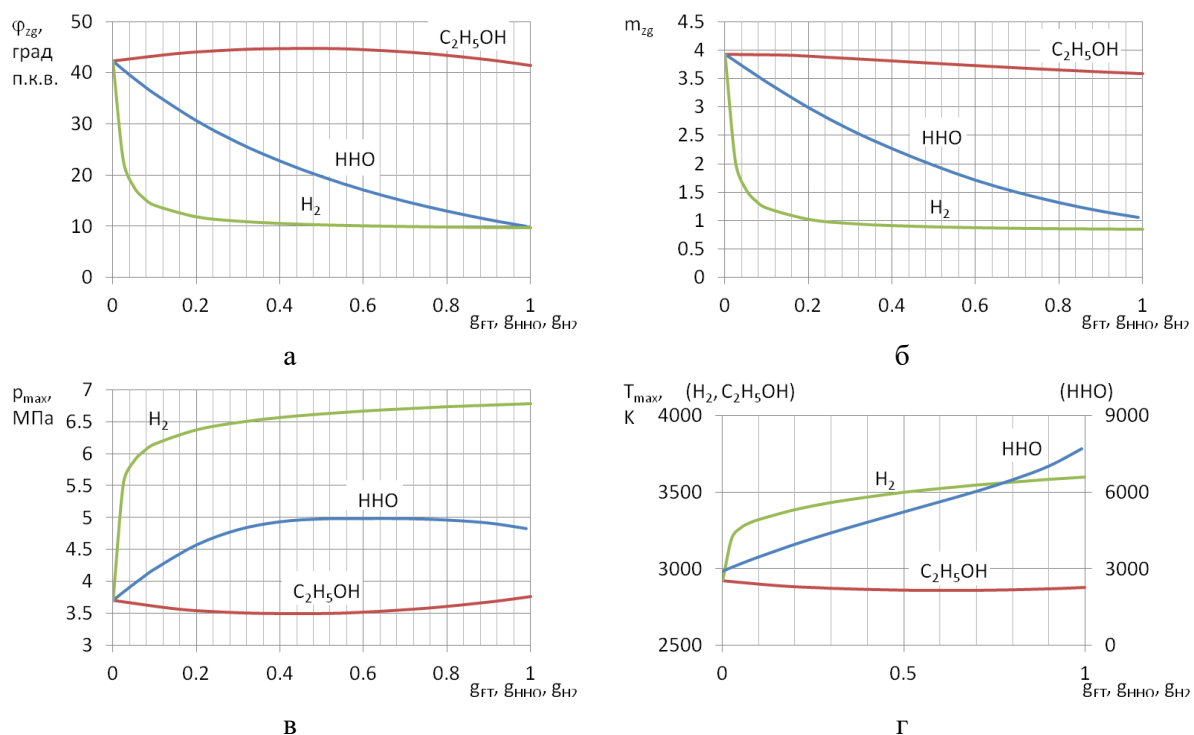


Рис. 5. Залежності параметрів робочого процесу двигуна від складу палива та вмісту водневмісного газу у повітряному заряді: а – тривалість згоряння; б – показник характеру згоряння; в – максимальний тиск в циліндрі; г – максимальна температура в циліндрі

Внаслідок зміни складу свіжого заряду двигуна змінюється вміст у ньому основних хімічних елементів, що приймають участь у згорянні, а саме, масових часток вуглецю, водню та кисню. Це, в свою чергу, призводить до зміни концентрацій у відпрацьованих газах (ВГ) основних забруднюючих речовин (без врахування системи нейтралізації ВГ), зокрема, монооксиду вуглецю CO , вуглеводнів C_mH_n , оксидів азоту NO_x та діоксиду вуглецю CO_2 . При додаванні C_2H_5OH вуглець у паливі поступово заміщується киснем (частка вуглецю знижується з 0,855 до 0,522, частка кисню зростає з 0 до 0,348), що призводить до відповідного скорочення концентрацій CO (з 0,54 до 0,46 %),

C_mH_n (з 125 до 108 млн⁻¹), CO_2 (з 12,5 до 11,9 %) (рис. 6а,б,г). Додавання HNO та H_2 знижує частку вуглецю в паливі до нуля, тому, концентрації CO , C_mH_n , CO_2 у цьому випадку також знижуються до нуля (рис. 6а,б,г). Відмінності у характері залежностей пов'язані з тим, що при додаванні HNO частка вуглецю поступово заміщується киснем, а частка водню практично не змінюється; при додаванні H_2 частка вуглецю поступово повністю заміщується воднем. Залежності концентрацій NO_x (рис. 6в) обумовлені впливом максимальної температури в циліндрі (рис. 5г) та концентрацією вільного кисню в робочому тілі під час згоряння, а у випадку додавання HNO ще і концентрацією

азоту (оскільки, додавання ННО поступово витісняє повітря). Відповідно, додавання C_2H_5OH знижує концентрацію NO_x з 1065 до 756 $млн^{-1}$ внаслідок зниження максимальної температури. Додавання H_2 збільшує концентрацію NO_x з 1065 до 5000 $млн^{-1}$ внаслідок суттєвого збільшення максимальної температури. Отриманий результат цілком корелює з результатами інших досліджень впливу використання водню в ДВЗ [29, 30, 31] та додатково свідчить про адекватність математичного мо-

делювання робочого процесу двигуна та утворення оксидів азоту. При цьому, збільшення частки ННО з 0 до 0,5 збільшує концентрацію NO_x з 1065 до 43000 $млн^{-1}$ внаслідок суттєвого збільшення максимальної температури (з 2920 до 5240 К) та збільшеної концентрації вільного кисню в зоні згоряння (збільшується на 16 %). Подальше збільшення частки ННО до 1 знижує концентрацію азоту до нуля, що призводить до зниження концентрацій NO_x з 43000 $млн^{-1}$ до нуля.

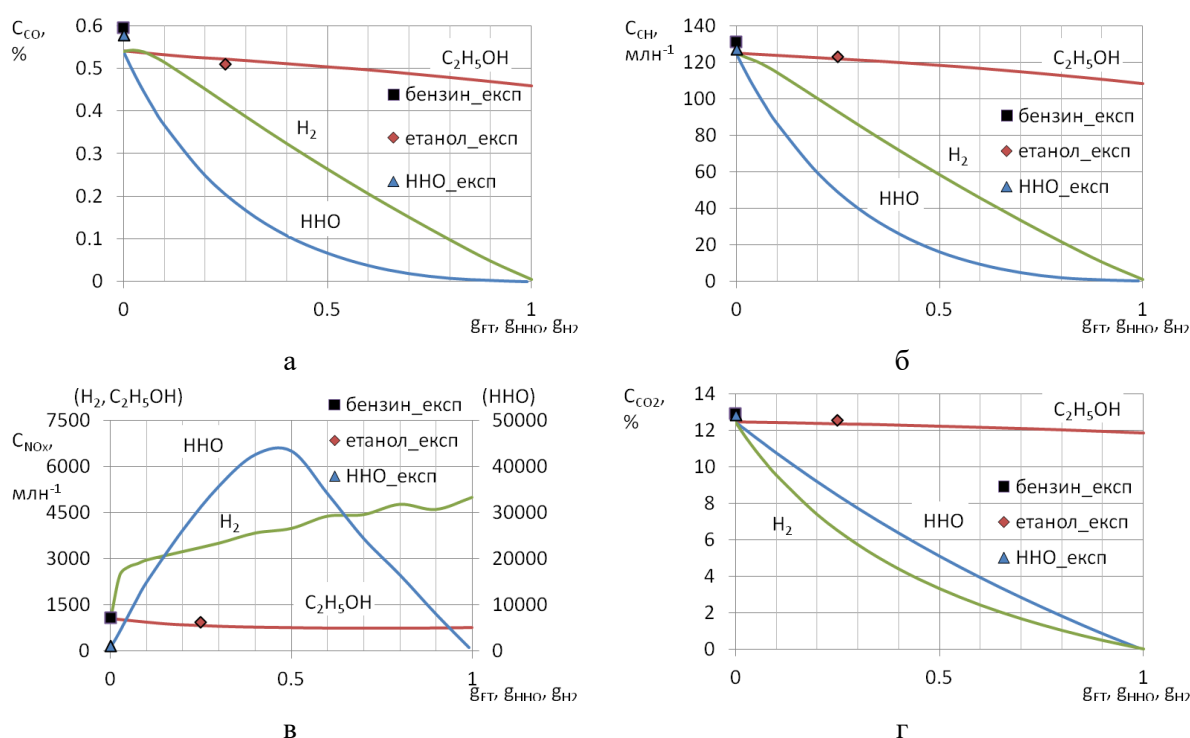


Рис. 6. Залежності концентрацій забруднюючих речовин у відпрацьованих газах від складу палива та вмісту водневмісного газу у повітряному заряді: а – CO ; б – C_mH_n ; в – NO_x ; г – CO_2

Визначені концентрації основних забруднюючих речовин у відпрацьованих газах дозволяють пояснити залежності масових викидів цих речовин від складу палива та вмісту водневмісного газу у повітряному заряді (рис. 7). В цілому, залежності масових викидів повторюють залежності концентрацій забруднюючих речовин у відпрацьованих газах (рис. 6). При збільшенні частки C_2H_5OH викиди CO знижуються з 0,25 до 0,2 $кг/год$; викиди C_mH_n – з 0,0181 до 0,0148 $кг/год$; викиди NO_x – з 0,095 до 0,068 $кг/год$; викиди CO_2 – з 9,23 до 8,29 $кг/год$. Разом з тим, при додаванні частки H_2 від 0 до 0,1 зростає витрата повітря (рис. 2), що збільшує масові викиди шкідливих речовин на цій ділянці, зокрема, викиди CO (з 0,25 до 0,27 $кг/год$) та C_mH_n (з 0,0181 до 0,0182 $кг/год$)

при додаванні H_2 перевищують викиди цих речовин при додаванні C_2H_5OH ; викиди NO_x збільшуються з 0,095 до 0,308 $кг/год$, а викиди CO_2 знижуються з 9,23 до 7,74 $кг/год$. При подальшому збільшенні частки H_2 викиди CO , C_mH_n та CO_2 знижуються до нуля, а викиди NO_x зростають до 0,526 $кг/год$. Також, вплив витрати повітря проявляється і у інтенсивності зниження викидів CO , C_mH_n та CO_2 при додаванні ННО – зниження викидів цих речовин (рис. 7) є більш інтенсивним, ніж зниження їх концентрацій (рис. 6) при збільшенні частки ННО. Крім того, максимум викидів NO_x (2,43 $кг/год$) при цьому, зміщується у бік меншої частки ННО порівняно із максимумом концентрації NO_x .

Водночас, отримані залежності показників транспортної енергоустановки від масо-

вих часток компонентів свіжого заряду не дозволяють об'єктивно порівнювати вплив складу свіжого заряду на зазначені показники через абсолютно різний хімічний склад та кількість компонентів, що додаються. З метою об'єктивнішої оцінки впливу складу свіжого заряду на показники транспортної енергоустановки доцільно використати у якості фактору впливу воднево-вуглецеве відношення паливних компонентів, що ком-

плексно описує склад різних палив з точки зору енергетичної здатності та впливу на викиди вуглецевих сполук з відпрацьованими газами.

На рис. 8 представлено залежності воднево-вуглецевого відношення (Н/С) паливної суміші від зміни її складу додаванням ННО до повітряного заряду або зміною вмісту C_2H_5OH або H_2 в паливі.

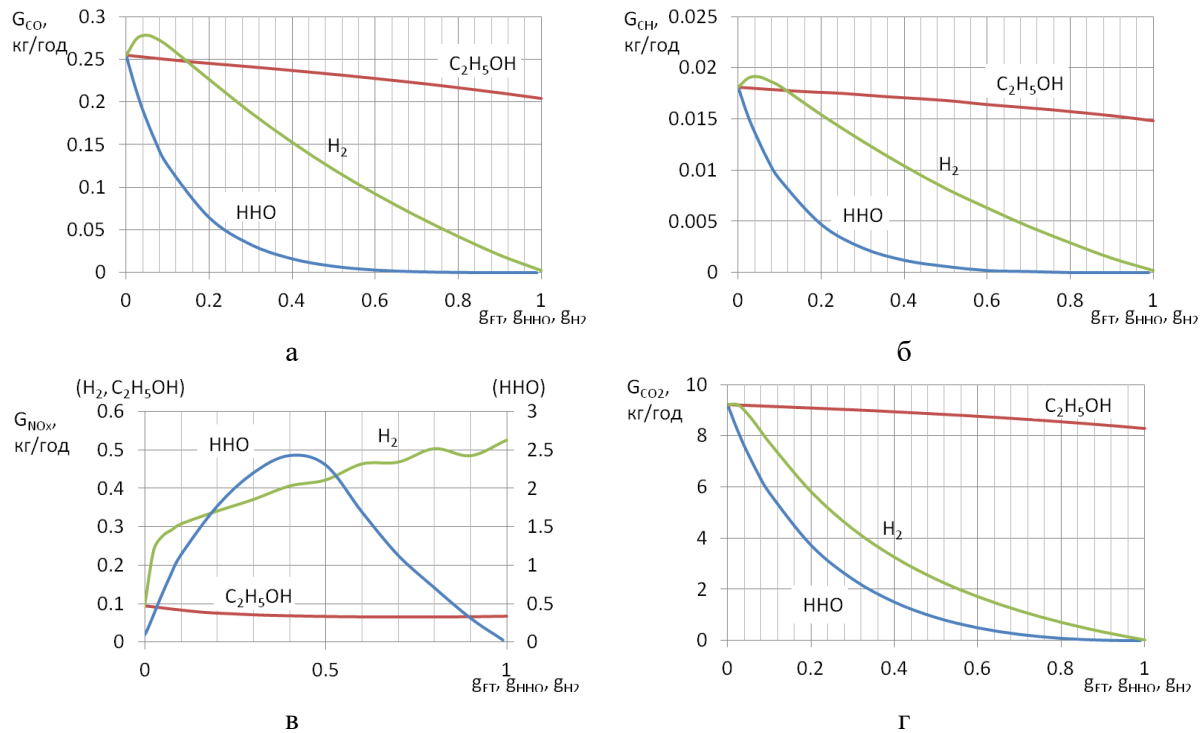


Рис. 7. Залежності масових викидів забруднюючих речовин у відпрацьованих газах від складу палива та вмісту водневмісного газу у повітряному заряді: а – CO; б – C_mH_n ; в – NO_x ; г – CO_2

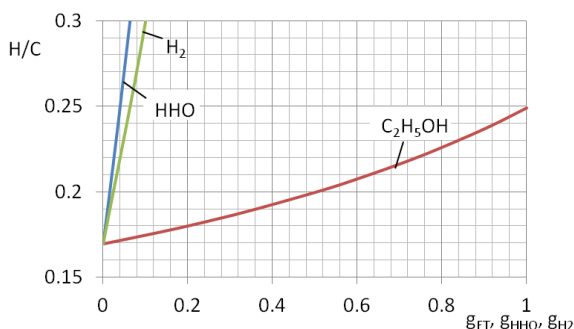


Рис. 8. Залежності воднево-вуглецевого відношення паливної суміші від складу палива та вмісту водневмісного газу у повітряному заряді

Як видно, додавання C_2H_5OH до бензину максимально до 100 % збільшує Н/С до з 0,17 до 0,25. При цьому, додавання 0,06 масової частки ННО та 0,1 масової частки H_2

збільшує Н/С з 0,17 до 0,3. З іншого боку, проведені наукові дослідження в Національному транспортному університеті та інших наукових установах щодо використання водневмісного газу свідчать, що існує обладнання для генерування такого газу під час роботи транспортної енергоустановки дозволяє отримувати ННО з витратою до 50 л/хв. При цьому, масова частка ННО 0,06 у розглянутому режимі роботи двигуна потребує продуктивності близько 80 л/хв. З цієї причини, розглядати вплив складу свіжого заряду на показники енергоефективності транспортної енергоустановки доцільно до значення Н/С до 0,3.

Залежності показників енергоефективності транспортної енергоустановки від воднево-вуглецевого відношення паливної суміші представлено на рис. 9-12.

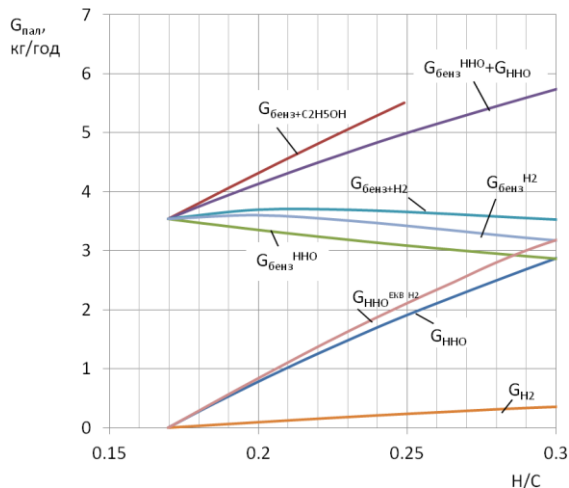


Рис. 9. Залежності годинної витрати палива від воднево-вуглецевого відношення паливної суміші

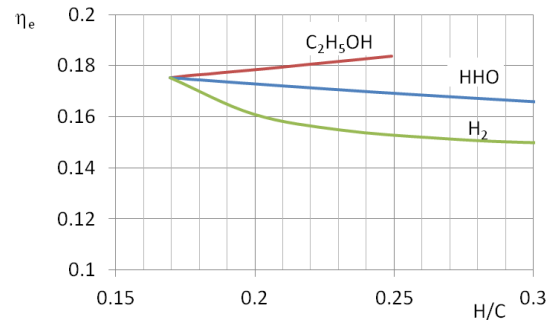
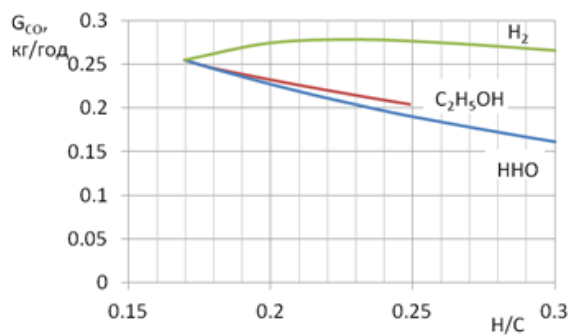
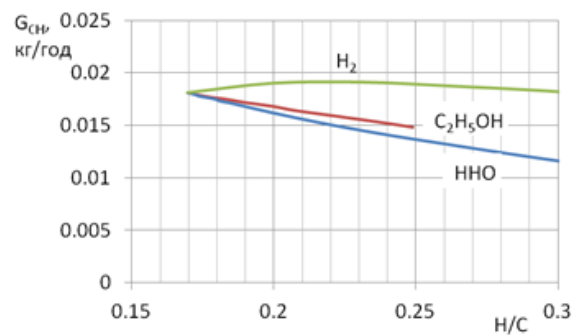


Рис. 10. Залежності ефективного ККД від воднево-вуглецевого відношення паливної суміші

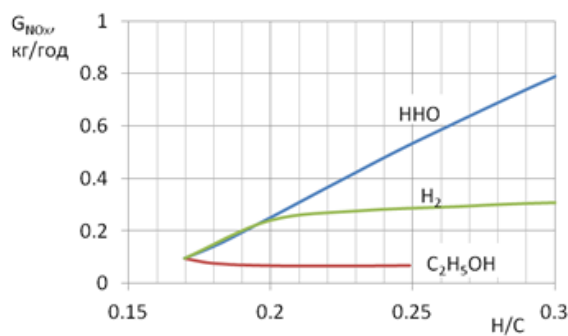
Залежності годинної витрати палива від воднево-вуглецевого відношення паливної суміші (рис. 9) свідчать, що зі зростанням H/C до 0,25 при додаванні C_2H_5OH годинна витрата палива зростає від 3,54 до 5,51 кг/год.



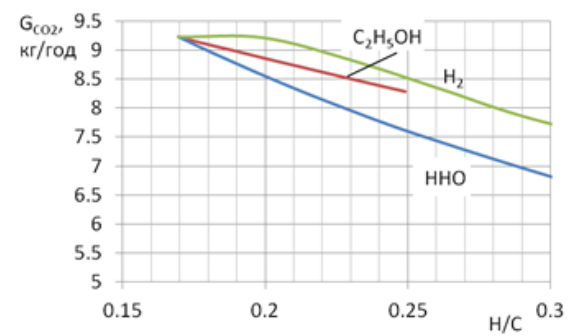
а



б



в



г

Рис. 11. Залежності масових викидів забруднюючих речовин у відпрацьованих газах від воднево-вуглецевого відношення паливної суміші: а – CO ; б – C_mH_n ; в – NO_x ; г – CO_2

Збільшення H/C (до 0,3) додаванням $ННО$ та H_2 знижує витрату бензину з 3,54 до 2,9 та 3,18 кг/год відповідно. При цьому, витрата $ННО$ становить 2,9 кг/год, а сумарна витрата суміші палив – 5,8 кг/год при $H/C = 0,3$. Витрата H_2 становить 0,35 кг/год при $H/C = 0,3$, що відповідає еквівалентній витраті $ННО$ 3,18 кг/год для продукування такої кількості водню. Тоді при збільшенні H/C до 0,3 дода-

ванням H_2 сумарна витрата суміші палив складатиме 3,53 кг/год бензину з H_2 та 6,36 кг/год бензину з еквівалентною кількістю $ННО$.

Ефективний ККД двигуна зростає з 0,175 до 0,184 при збільшенні H/C до 0,25 додаванням C_2H_5OH та зменшується з 0,175 до 0,167 та до 0,15 при збільшенні H/C до 0,3 додаванням $ННО$ та H_2 відповідно (рис. 10).

Масові викиди CO , C_mH_n , NO_x , CO_2 при збільшенні Н/С до 0,25 додаванням $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ знижуються з 0,254 до 0,204, з 0,018 до 0,015, з 0,095 до 0,068, з 9,23 до 8,29 кг/год відповідно (рис. 11).

Масові викиди CO , C_mH_n , CO_2 при збільшенні Н/С до 0,3 додаванням ННО знижуються до 0,16, 0,012, 6,8 кг/год відповідно.

Масові викиди CO_2 при збільшенні Н/С до 0,3 додаванням H_2 знижуються до 7,74 кг/год. Масові викиди CO незначно зростають до 0,266 кг/год, а масові викиди C_mH_n практично не змінюються при збільшенні

Н/С додаванням H_2 . Масові викиди NO_x при збільшенні Н/С додаванням ННО та H_2 зростають до 0,79 та до 0,308 кг/год відповідно.

При цьому, при збільшенні Н/С до 0,2 додаванням ННО та H_2 масові викиди NO_x зростають до 0,24 кг/год в обох випадках.

З використанням залежностей масових викидів забруднюючих речовин визначено окремі критерії енергоефективності енергоустановки за еквівалентними викидами CO , C_mH_n , NO_x , CO_2 , H_2O та груповий критерій в залежності від воднево-вуглецевого відношення паливної суміші (рис. 12).

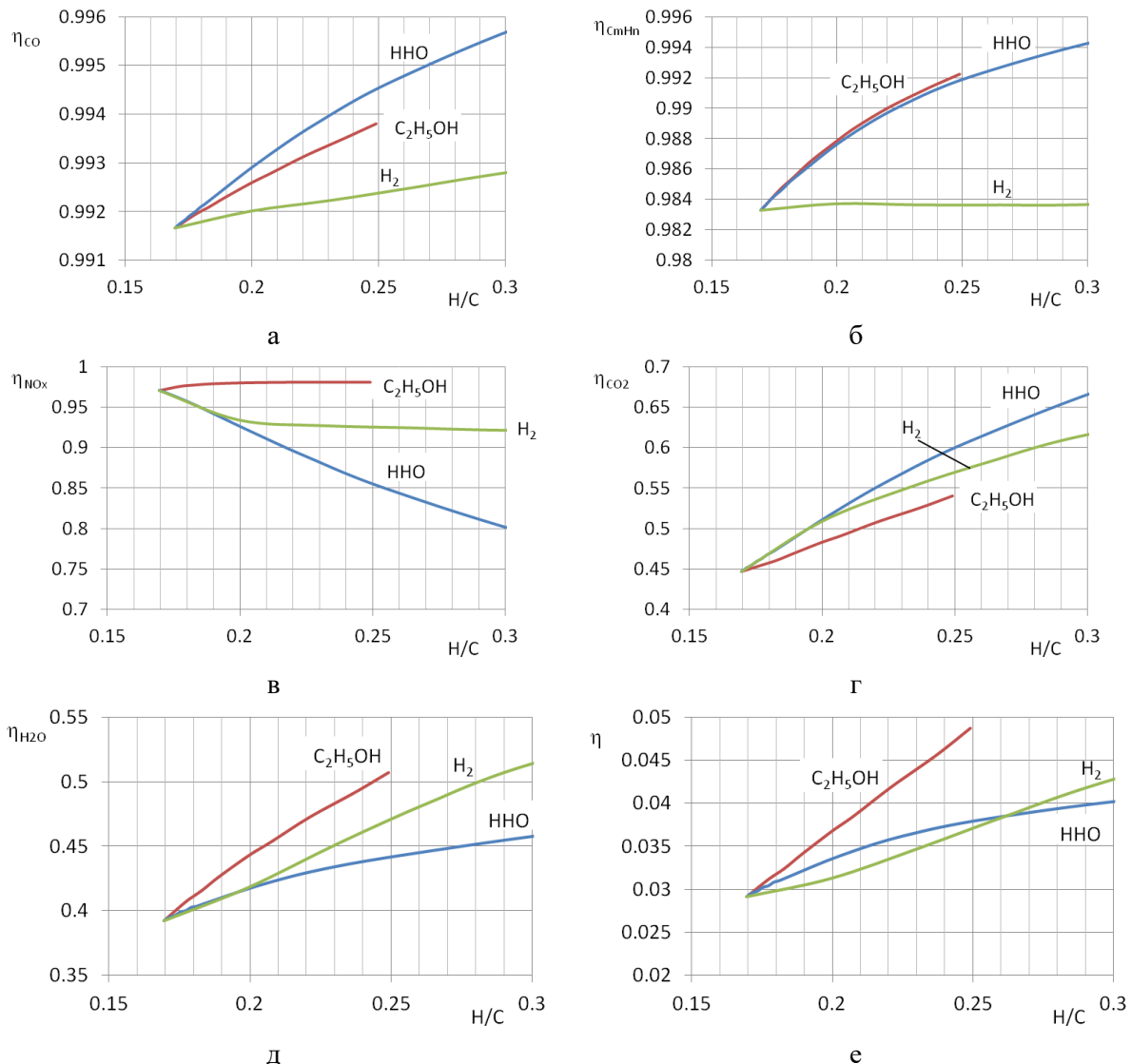


Рис. 12. Залежності окремих критеріїв енергоефективності енергоустановки за еквівалентними викидами (а – CO ; б – C_mH_n ; в – NO_x ; г – CO_2 ; д – H_2O) та групового критерію (е) від воднево-вуглецевого відношення паливної суміші

Окремі критерії енергоефективності за еквівалентними викидами CO , C_mH_n , CO_2 , H_2O при збільшенні Н/С додаванням $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, ННО та H_2 збільшуються. Збільшення окре-

мого критерію енергоефективності за викидами CO (рис. 12а) відбувається від значення 0,9917 до 0,9957 при додаванні ННО, до 0,9937 при додаванні $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ та до 0,9928

при додаванні H_2 . Збільшення окремого критерію енергоефективності за викидами C_mH_n (рис. 12б) відбувається від значення 0,9832 до 0,9941 при додаванні ННО, до 0,9921 при додаванні C_2H_5OH та до 0,9838 при додаванні H_2 . Збільшення окремого критерію енергоефективності за викидами CO_2 (рис. 12г) відбувається від значення 0,45 до 0,67 при додаванні ННО, до 0,62 при додаванні H_2 та до 0,54 при додаванні C_2H_5OH . Збільшення окремого критерію енергоефективності за викидами H_2O (рис. 12д) відбувається від значення 0,39 до 0,51 при додаванні C_2H_5OH , до 0,52 при додаванні H_2 та до 0,46 при додаванні ННО. Окремий критерій енергоефективності за еквівалентними викидами NO_x (рис. 12в) при додаванні C_2H_5OH збільшується від значення 0,97 до 0,98, при додаванні H_2 знижується до 0,92 та при додаванні ННО знижується до 0,8.

Таким чином, найбільший вплив на груповий критерій енергоефективності окрім ефективного ККД здійснюють окремі критерії за еквівалентними викидами H_2O , CO_2 , NO_x . Груповий критерій енергоефективності енергоустановки (рис. 12е) зростає від значення 0,029 при збільшенні Н/С додаванням C_2H_5OH до 0,048, додаванням H_2 до 0,0425 та додаванням ННО до 0,04.

Отже, в межах встановленого доцільного діапазону зміни воднево-вуглецевого відношення паливної суміші додаванням різних альтернативних добавок до бензину найбільшу ефективність має додавання C_2H_5OH , яке збільшує груповий критерій енергоефективності для дослідженого режиму роботи двигуна на 65,5%. Збільшення групового критерію енергоефективності шляхом додавання ННО відбувається більш інтенсивно ніж шляхом додавання H_2 до величини воднево-вуглецевого відношення паливної суміші $H/C = 0,26$, при якому груповий критерій енергоефективності збільшується на 31%. В подальшому, збільшення Н/С додаванням ННО є менш енергоефективним ніж додаванням H_2 . Враховуючи це, можна рекомендувати використовувати добавку ННО до повітряного заряду до встановлення відношення Н/С на рівні 0,26 для дослідженого режиму роботи двигуна. Витрата газу ННО при цьому складатиме 68 л/хв, що можливо забезпечити існуючими мобільними установками. Щодо доцільності додавання H_2 після значення відношення Н/С = 0,26, можна припустити, що це потребує додаткового дослі-

дження, оскільки у цьому випадку можуть спричинити окремий вплив додаткові витрати на забезпечення подачі чистого водню. Крім того, окремого дослідження потребує і визначення оптимальних регулювальних параметрів двигуна, зокрема кута випередження запалювання при додаванні вказаних сполук, оскільки це може вплинути на утворення оксидів азоту, ефективний ККД, викиди інших компонентів ВГ та груповий критерій енергоефективності в цілому. Також, доцільно дослідити вплив сумісного використання добавок C_2H_5OH та ННО на рівень енергоефективності транспортної енергоустановки.

Висновки

В результаті проведеного дослідження оцінено вплив на показники енергоефективності транспортної енергоустановки в окремому режимі роботи додавання до основного палива (бензину) різних альтернативних добавок, зокрема, етанолу, водневмісного газу, водню.

Для проведення дослідження використано уточнену з використанням експериментальних досліджень математичну модель, яка враховує вплив додавання до альтернативних добавок до бензину на склад свіжого заряду, продуктів згоряння, параметри процесу згоряння та дозволяє визначати вплив воднево-вуглецевого відношення паливної суміші на показники енергоефективності транспортної енергоустановки з двигуном з іскровим запалюванням.

За отриманими результатами встановлено, що у дослідженому режимі роботи найбільш ефективним для поліпшення окремих критеріїв енергоефективності за ефективним ККД, викидами вуглеводнів, оксидів азоту, ступенем використання водню у створенні енергії та групового критерію є додавання етанолу до бензину, яке дозволяє збільшити воднево-вуглецеве відношення на 47% порівняно із базовим бензином. Найвищі критерії енергоефективності за викидами CO і CO_2 досягаються додаванням водневмісного газу до свіжого заряду. Однак, додавання водневмісного газу суттєво знижує критерій енергоефективності за викидами NO_x . Тому, додавання водневмісного газу доцільне до значення воднево-вуглецевого відношення 0,26, що вимагає витрати 68 л/хв. Груповий критерій енергоефективності при цьому збільшується на 31%, а при додаванні етанолу – на 65,5%.

Подальше дослідження може бути спрямоване на визначення оптимальних регулювальних параметрів двигуна, зокрема кута випередження запалювання при додаванні вказаних сполук, оскільки це може вплинути на утворення оксидів азоту, ефективний ККД, викиди інших компонентів ВГ та груповий критерій енергоефективності в цілому. Також, доцільно дослідити вплив сумісного використання добавок C_2H_5OH та ННО на рівень енергоефективності транспортної енергоустановки.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Yakovlieva, A., & Boichenko, S. (2020). Energy Efficient Renewable Feedstock for Alternative Motor Fuels Production: Solutions for Ukraine. *Systems, Decision and Control in Energy I*, 247–259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_16.
2. Tsiuman, M. (2019). Evaluation of fuel consumption and harmful substances emissions by vehicle with spark ignition engine under operation conditions with using of fuel containing ethanol. *Selected Aspects of Providing the Chemmotological Reliability of the Engineering*, 299–314. <https://doi.org/10.18372/38237>.
3. Efemwenkiele, U. K., Oyedepo, S. O., Idiku, U. D., Uguru-Okorie, D. C., & Kuhe, A. (2019). Comparative Analysis of a Four Stroke Spark Ignition Engine Performance Using Local Ethanol and Gasoline Blends. *Procedia Manufacturing*, 35, 1079–1086. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.060>.
4. Sakai, S., & Rothamer, D. (2019). Impact of ethanol blending on particulate emissions from a spark-ignition direct-injection engine. *Fuel*, 236, 1548–1558. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.037>.
5. Marques, D. O., Trevizan, L. S. F., Oliveira, I. M. F., Seye, O., & Silva, R. E. P. (2016). Combustion assessment of an ethanol/gasoline flex-fuel engine. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(4), 1079–1086. <https://doi.org/10.1007/s40430-016-0609-4>.
6. Suarez-Bertoa, R., Zardini, A. A., Keuken, H., & Astorga, C. (2015). Impact of ethanol containing gasoline blends on emissions from a flex-fuel vehicle tested over the Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle (WLTC). *Fuel*, 143, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.076>.
7. Редзюк, А.М., Устименко, В.С., Клименко, О.А., & Гутаревич, Ю.Ф. (2003). Вплив високооктанової кисневмісної добавки до бензину на паливну економічність та екологічні показники автомобілів. *Автошляховик України. Окр. вип. Вісник Північного наукового центру ТАУ*, 6, 34–35.
8. Гутаревич, Ю.Ф., Корпач, А.О., Говорун, А.Г., & Захарченко, О.М. (2006). Вплив кута випередження запалювання на показники двигуна за роботи на сумішевих паливах з різним вмістом спиртових сполук. *Автошляховик України*, 1, 19–21.
9. Щербатюк, В.Б. (2013). Покращення екологічних показників двигунів підігрівом свіжого заряду при використанні бензину з добавкою біоетанолу. Дис. ... канд. техн. наук. Київ: НТУ.
10. Shcherbatiuk, V.B. (2013). Pокrashchennia ekolohichnykh pokaznykiv dvyhuniv pidihrivom svizhoho zariadu pry vykorystanni benzynu z dobavkoio bioetanolu. [Improving the environmental performance of engines by heating the air charge when using gasoline with ethanol additive]. *Dys. ... kand. tekhn. nauk. Kyiv: NTU*. [in Ukrainian].
11. Tsiuman, M. P., Yakovlieva, A., Tsiuman, Y., Dobrovolskyi, O., Sosida, S., & Savostin-Kosiak, D. (2021). Evaluation of Ethanol-Containing Fuel Supply Control Efficiency in Spark Ignition Engine. *SAE Technical Paper Series*. <https://doi.org/10.4271/2021-01-1232>.
12. Gerwash, M. K. M., Al-ghonemy, A. M. K., Omara, M. A., Ahmed, I. L. M., Saeed, A., & Abdelaziz, G. B. (2024). Sustainable Production of Green Oxy-Hydrogen from Vehicles' Air Conditioning Drains to Enhance Engine Efficiency and Reduce Greenhouse Gas Emissions. *Hydrogen*, 5(4), 958–975. <https://doi.org/10.3390/hydrogen5040051>.
13. Le Anh, T., Nguyen Duc, K., Tran Thi Thu, H., & Cao Van, T. (2013). Improving Performance

- and Reducing Pollution Emissions of a Carburetor Gasoline Engine by Adding HHO Gas into the Intake Manifold. SAE Technical Paper Series. <https://doi.org/10.4271/2013-01-0104>.
13. Gutarevych, Y., Shuba, Y., Matijošius, J., Karev, S., Sokolovskij, E., & Rimkus, A. (2018). Intensification of the combustion process in a gasoline engine by adding a hydrogen-containing gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(33), 16334–16343. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.124>.
14. Cervantes-Bobadilla, M., Escobar-Jiménez, R. F., Gómez-Aguilar, J. F., García-Morales, J., & Olivares-Peregrino, V. H. (2018). Experimental Study on the Performance of Controllers for the Hydrogen Gas Production Demanded by an Internal Combustion Engine. *Energies*, 11(8), 2157. <https://doi.org/10.3390/en11082157>.
15. Morales, J., Bobadilla, M., Escobar-Jiménez, R., Gómez-Aguilar, J., García-Beltrán, C., & Olivares-Peregrino, V. (2016). Control Scheme Formulation for the Production of Hydrogen on Demand to Feed an Internal Combustion Engine. *Sustainability*, 9(1), 7. <https://doi.org/10.3390/su9010007>.
16. Leyko, J., Słobiński, K., Jaworski, J., Mitukiewicz, G., Bou Nader, W., & Batory, D. (2023). Study on SI Engine Operation Stability at Lean Condition—The Effect of a Small Amount of Hydrogen Addition. *Energies*, 16(18), 6659. <https://doi.org/10.3390/en16186659>.
17. Tsiuman, M. P., Mateichyk, V., Smieszek, M., Sadovnyk, I., Artemenko, R., Tsiuman, Y., Gritsuk, I., & Koval, A. (2020). The System for Adding Hydrogen-containing Gas to the Air Charge of the Spark Ignition Engine Using a Thermoelectric Generator. SAE Technical Paper Series. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2142>.
18. Абрамчук, Ф.І., Гутаревич, Ю.Ф., Долганов, К.Є., & Тимченко, І.І. (2006). Автомобільні двигуни. Підручник. Київ: Арістей. Abramchuk, F.I., Gutarevych, Y.F., Dolganov, K.Y., & Tymchenko, I.I. (2006). *Avtomobilni dvyhuny*. [Automobile engines]. Pidruchnyk. Kyiv: Aristei. [in Ukrainian].
19. Vibe, I. (1970). *Burning process and cycle of internal combustion engines*. Berlin: VEB Verlag Technik.
20. Матейчик, В.П., Цюман, М.П., & Сінкевич, А.Б. (2009). Вплив рециркуляції відпрацьованих газів на показники бензинового двигуна з системою нейтралізації. *Автомобіліст України*. Окремий випуск, 12, 137–141. Mateichyk, V.P., Tsiuman, M.P., & Sinkevych, A.B. (2009). Vplyv retsyrkulatsii vidpratsovanykh haziv na pokaznyky benzynovoho dvyhuna z systemoiu neutralizatsii. [The effect of exhaust gas recirculation on the performance of a gasoline engine with a neutralization system]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*. Okremyi vypusk, 12, 137–141. [in Ukrainian].
21. Сосіда, С.В., & Цюман, М.П. (2023). Дослідження впливу використання палива на основі етанолу на індикаторні показники, енергоефективність та екологічність автомобільного двигуна. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. Науковий журнал, 57, 122–140. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-3-57-122-140>.
- Sosida, S.V., & Tsiuman, M.P. (2023). Doslidzhennia vplyvu vykorystannia palyva na osnovi etanolu na indykatorni pokaznyky, enerhoefektyvnist ta ekolohichnist avtomobilnoho dvyhuna. [Study of the impact of using ethanol-based fuel on indicated performance, energy efficiency and environmental friendliness of the automobile engine]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Seriiia «Tekhnichni nauky»*. Naukovyi zhurnal, 57, 122–140. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-3-57-122-140>. [in Ukrainian].
22. Burwasser, H., & Pease, R.N. (1955). Burning Velocities of Hydrogen-Air Flames1. *Journal of the American Chemical Society*, 77(22), 5806–5808. <https://doi.org/10.1021/ja01627a008>.
23. Simon, D.M. (1951). Flame Propagation. III. Theoretical Consideration of the Burning Velocities of Hydrocarbons1. *Journal of the American Chemical Society*, 73(1), 422–425. <https://doi.org/10.1021/ja01145a137>.
24. Heywood, J.B. (2018). *Internal Combustion Engines Fundamentals*. McGraw-Hill Inc. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260116106>.
25. Цюман, М.П., & Сосіда, С.В. (2022). Експериментальне дослідження паливної економічності та екологічних показників двигуна з іскровим запалюванням, що живиться спиртовмісним паливом з високим вмістом етанолу. *Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури: виклики воєнного часу: збірка тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції*, 232–237. Tsiuman, M.P., & Sosida, S.V. (2022). Eksperymentalne doslidzhennia palyvnoi ekonomichnosti ta ekolohichnykh pokaznykiv dvyhuna z iskrovym zapaliuvanniam, shcho zhivyetsia spyrtovmisnym palyvom z vysokym vmistom etanolu. [Experimental study of fuel efficiency and environmental performance of a spark-ignition engine fueled with alcohol-containing fuel with a high ethanol content]. *Perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu ta infrastruktury: vyklyky voiennoho chasu: zbirka tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, 232–237. [in Ukrainian].

26. Bosch Automotive Handbook, 5th Edition. (2000). Stuttgart: Robert Bosch GmbH.
27. Barin, Ihsan. (1995). Thermochemical data of pure substances. Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo: VCH.
28. Гутаревич, Ю.Ф., Зеркалов, Д.В., Говорун, А.Г., Корпач А.О., & Мерзхивська, Л.П. (2008). Екологія та автомобільний транспорт. Навчальний посібник. Київ: Арістей.
Hutarevych, Y.F., Zerkalov, D.V., Hovorun, A.H., Korpach, A.O., & Merzhyevska, L.P. (2008). Ekolohiia ta avtomobilnyi transport. [Ecology and road transport]. Navchalnyi posibnyk. Kyiv: Aristei. [in Ukrainian].
29. Kalaskar, V., Conway, G., Handa, G., Joo, S., & Williams, D. (2023). Challenges and Opportunities with Direct-Injection Hydrogen Engines. SAE Technical Paper Series. <https://doi.org/10.4271/2023-01-0287>.
30. Beccari, S., Pipitone, E., & Caltabellotta, S. (2023). Analysis of the Combustion Process in a Hydrogen-Fueled CFR Engine. *Energies*, 16(5), 2351. <https://doi.org/10.3390/en16052351>.
31. Joshi, A. (2023). Year in Review: Progress towards Decarbonizing Transport and Near-Zero Emissions. SAE Technical Paper Series. <https://doi.org/10.4271/2023-01-0396>.

Цюман Микола Павлович¹, к.т.н., доц. каф. двигунів і теплотехніки, e-mail: tsuman@ukr.net, тел. +38 097-717-74-79, ORCID: 0000-0003-2537-8010

¹Національний транспортний університет, 01010, Україна, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1.

Enhancing the energy efficiency of transport power units using combinations of traditional and alternative fuels

Abstract. Problem. In order to improve the energy efficiency of transport power units – specifically fuel economy, energy performance, and emissions – various methods of using alternative fuels have recently been investigated. These include their use both as standalone fuels and as additives to conventional fuels. **Goal.** To enhance the energy efficiency of transport power units by identifying suitable combinations of conventional and alternative fuels for practical use. **Methodology.** Mathematical modeling of the energy efficiency

indicators of a transport power unit with a spark-ignition engine is performed, depending on the amount of ethanol, hydrogen-containing gas, or hydrogen added to gasoline, in order to modify the hydrogen-to-carbon ratio of the fuel mixture.

Results. It was found that, under the investigated operating conditions, the most effective approach in terms of thermal efficiency, hydrocarbon and nitrogen oxide emissions, hydrogen utilization for energy generation, and the overall energy efficiency criterion is the addition of ethanol to gasoline. The highest energy efficiency criteria regarding CO and CO₂ emissions are achieved by adding hydrogen-containing gas to the fresh intake charge. However, this significantly reduces the energy efficiency criterion for NO_x emissions. Therefore, the addition of hydrogen-containing gas is advisable only up to a hydrogen-to-carbon ratio of 0.26, which corresponds to a flow rate of 68 L/min. Under these conditions, the overall energy efficiency criterion increases by 31%, while ethanol addition yields a 65.5% increase.

Originality. The study identifies, for the first time, the patterns of influence of various alternative additives (ethanol, hydrogen) to gasoline and of hydrogen-containing gas to the intake air over a wide range of conditions on individual and overall energy efficiency criteria of a transport power unit based on a spark-ignition engine. **Practical value.** A mathematical modeling methodology has been developed and implemented using modern software tools. New data have been obtained regarding the consumption parameters of traditional and alternative fuels and fuel mixtures (gasoline with ethanol, hydrogen, or hydrogen-containing gas), as well as pollutant emissions from modern transport power units when these fuels are applied.

Key words: transport power unit, energy efficiency, pollutant emissions, hydrogen-to-carbon ratio, alternative fuel.

Tsiuman Mykola¹, Ph.D., Assoc. Prof. Engines and Heating Engineering Department, e-mail: tsuman@ukr.net, tel. +38 097-717-74-79, ORCID: 0000-0003-2537-8010

¹National Transport University, 1, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka Str., Kyiv, 01010, Ukraine.

Дослідження та оптимізація температурного режиму літій-іонних акумуляторів у складі тягової батареї електромобіля

Латвинський В.Д.¹, Багач Р.В.¹, Плахтій О.А.², Запорізький В.В.³

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

²Український державний університет залізничного транспорту, Україна

³Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

Анотація. У статті досліджуються електричні та теплові характеристики модульної літій-іонної акумуляторної батареї в умовах імітаційного моделювання розрядних режимів, характерних для руху легкового електромобіля за різними їзовими циклами. У ході експериментальних випробувань проведено якісну та кількісну оцінку тепловиділення літій-іонних акумуляторів у складі тягової батареї електромобіля, а також підтверджено ефективність пасивного повітряного охолодження акумуляторів у запропонованій конструкції модулів батареї.

Ключові слова: електромобіль, тягова акумуляторна батарея, літій-іонний акумулятор, експеримент, випробування навантаження.

Вступ

Останнім часом спостерігається стійка тенденція до збільшення кількості зареєстрованих електромобілів як у світі, так і в Україні. Однією з ключових переваг електричного транспорту є відсутність викидів токсичних речовин у місці його експлуатації. Водночас виробництво електроенергії для електромобілів, здебільшого, базується на використанні вуглеводневого палива, що супроводжується викидами шкідливих речовин в атмосферу [1-3]. Проте ці фактори не нівелюють екологічні переваги електротранспорту з огляду на такі аспекти:

- технології виробництва електроенергії постійно вдосконалюються, підвищуючи ефективність перетворення первинного палива та покращуючи екологічні показники;
- електростанції є локалізованими джерелами викидів, що дає змогу ефективніше впроваджувати природоохоронні заходи;
- розташування електростанцій за межами густонаселених територій мінімізує вплив шкідливих викидів на міське середовище, на відміну від автотранспорту;

– силова установка електромобіля не генерує токсичних викидів у місці експлуатації, що значно покращує якість повітря.

– ефективне використання енергетики в електромобілях значно перевищує ефективність згоряння палива у двигунах внутрішнього згоряння;

– зарядна інфраструктура електромобілів може сприяти балансуванню енергетичної системи, коригуючи нерівномірність навантажень;

– використання відновлюваних джерел енергії для генерації електроенергії значно підвищує енергетичну та екологічну ефективність електротранспорту.

Таким чином, широке впровадження електромобілів у мегаполісах сприятиме покращенню екологічної ситуації та підвищенню рівня життя [4-7].

Водночас сучасний електромобіль поки що не може повністю конкурувати зі звичайним автомобілем за експлуатаційними характеристиками та вартістю для кінцевого споживача. Основною причиною є висока вартість найбільш дорогої складової електромобіля – тягової літій-іонної акумуляторної батареї, яка становить близько 40% від загальної

вартості транспортного засобу [8,9].

Покращення таких експлуатаційних параметрів, як запас ходу, динамічні характеристики, термін служби та стабільність роботи за різних температур, безпосередньо залежить від оптимізації температурного режиму роботи акумуляторів у складі тягової батареї. Ефективне відведення тепла в процесі розряду та заряду або підтримання необхідного температурного режиму в холодний період року є критичними факторами, що визначають експлуатаційні характеристики електромотобіля та довговічність його батареї [9].

Аналіз публікацій

Для роботи тягових акумуляторів у складі ТАБ електромотобіля характерні різні режими експлуатації, зокрема короточасні максимальні струмові розряди та тривалі струмові навантаження, які супроводжуються значним виділенням теплової енергії. Перевищення допустимого температурного діапазону літій-іонних акумуляторів (ЛІА) призводить до зниження їхнього ресурсу, а у критичних випадках – до теплового розгону та виходу з ладу [8-10].

Менш руйнівним, хоча й небажаним фактором, є експлуатація ЛІА за низьких температур, що спричиняє зниження ємності та потужності тягової батареї, а також обмеження зарядних струмів.

Серед методів підтримання оптимального температурного режиму ТАБ ефективним є відведення тепла від акумуляторів до пристрою теплообміну з навколишнім середовищем. Основні технології охолодження ТАБ [11-13] електромотобілів включають:

- пасивне охолодження – характеризується простотою та низькою вартістю, проте має значні недоліки: нерівномірне відведення тепла, відсутність нагрівальних елементів і теплоізоляції, що негативно впливає на ємність батареї в умовах низьких температур [14];
- примусове повітряне охолодження – забезпечує рівномірний розподіл температури у батареї, має невелику вартість і малу вагу, однак поступається іншим методам за питомою енергією на одиницю об'єму [15];
- рідинне охолодження – найбільш ефективний спосіб термостатування, що забезпечує стабільний температурний режим, проте має високу складність і вартість [16].

У цій статті розглядається запропоноване

авторами рішення щодо конструкції ТАБ електромотобіля, яке поєднує дві системи термостатування, природну конвекцію та примусову повітряну вентиляцію [17,18].

Мета та постановка задачі

Метою даної роботи є експериментальна оцінка тепловиділення акумуляторних модулів та ефективності реалізованого конвекційного охолодження в складі тягової акумуляторної батареї (ТАБ) електромотобіля.

Дослідження спрямоване на покращення експлуатаційних характеристик батареї шляхом оптимізації температурного режиму роботи акумуляторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розрахунок потужності розряду та заряду ТАБ в різних умовах руху електромотобіля;
- визначення струмового навантаження в типовому їздовому циклі;
- розрахунок еквівалентного струму розряду акумуляторної батареї;
- експериментальне відтворення розрахункових струмів навантаження на стендових випробуваннях;
- оцінка тепловиділення акумуляторних модулів під час реалізації навантажувальних режимів;
- аналіз ефективності пасивного повітряного охолодження запропонованої конструкції батареї;
- розгляд впливу різних режимів експлуатації на температуру та робочий ресурс акумуляторів.

Опис конструкції тягової батареї електромотобіля

Основу батарейного модуля Nissan Leaf становить металева рама, що забезпечує жорсткість конструкції та захищає елементи від пошкоджень.

Внутрішню частину займають призматичні літій-іонні акумуляторні осередки, згруповані у кілька модулів. Для рівномірного розподілу тепла вони розташовані в алюмінієвих корпусах, які також виконують функцію захисту. Модулі батарей Nissan Leaf представлені на рис. 1.

Передача електроенергії відбувається через систему високовольтних кабелів, які мають яскравий помаранчевий колір для легкої ідентифікації та безпечного обслуговування. Ці кабелі з'єднують між собою окремі модулі

аккумулятора та забезпечують підключення до силової електроніки автомобіля, яка керує процесами зарядки та розрядки. Високовольтні з'єднання мають спеціальні ізоляційні матеріали, що гарантують їхню надійність та безпеку при експлуатації.



Рис. 1. Модулі батарей Nissan Leaf

Охолодження аккумуляторів відбувається пасивним способом, без використання рідинної системи. Відведення тепла забезпечується через конструкційні елементи батареї та вентиляційні зазори між модулями.

Контроль температури здійснюється за допомогою вбудованих термодатчиків, розміщених на ключових елементах батарейного модуля. Вони реєструють температуру осередків та корпусу, передаючи дані в систему управління батареєю (BMS).

BMS виконує не лише функцію моніторингу, а й прогнозує можливі ризики. Якщо система виявляє, що температура наближається до критичних значень, вона може автоматично зменшити струм зарядки або розрядки, щоб запобігти перегріву. Таким чином, управління температурним режимом допомагає продовжити термін служби батареї та забезпечити її стабільну роботу протягом усього періоду експлуатації.

Захисний корпус батареї містить ізоляційний шар, що підвищує безпеку експлуатації, а зверху закривається металевою кришкою, яка забезпечує механічний захист і екранування від зовнішніх впливів.

Завдяки комплексному підходу до розробки, батарейний модуль Nissan Leaf поєднує в собі високу продуктивність, довговічність та безпеку, що робить його одним із ключових елементів успішного функціонування електромобіля.

Визначення режимів роботи ТАБ у складі енергетичної системи електромобіля Nissan Leaf

Режими роботи аккумуляторної батареї електромобіля Nissan Leaf залежать від багатьох факторів, серед яких ключовими є характеристики транспортного засобу (маса, площа фронтальної проєкції, аеродинамічний опір, радіус коліс тощо) та умов експлуатації (динаміка швидкості руху, тип дороги, температура навколишнього середовища, стан дорожнього покриття, рівень завантаженості транспортного потоку).

Характеристики Nissan Leaf залишаються незмінними, тоді як умови руху є змінними та залежать від багатьох факторів. Наприклад, у міському циклі середня швидкість нижча, кількість прискорень і гальмувань більша, а частка зупинок значно вища порівняно з рухом за містом. Використання клімат-контролю або підігріву салону впливає на витрату енергії та загальний запас ходу, що необхідно враховувати. Для об'єктивного аналізу роботи ТАБ було вибрано стандартизовані цикли руху, що відображають максимально навантажені умови експлуатації електромобіля, надаючи можливість оцінити ефективність його роботи в різних ситуаціях.

У межах цього дослідження виконано розрахунок струмових навантажень ТАБ при русі Nissan Leaf у типових циклах: ECE15, EUDC, NYCC, HFEDS, NEDC, FTP72, US06. Об'єктом дослідження є модель Nissan Leaf модернізації 2015 р., оснащена літій-іонною тяговою батареєю ємністю 30 кВт·год та номінальною напругою 360 В. Аккумулятор складається з 48 модулів (192 осередки) загальною масою 275 кг. Запас ходу електромобіля за циклом NEDC становить 250 км. Життєвий цикл батареї варіюється в межах від 5 до 10 років залежно від умов експлуатації та інтенсивності використання, що є одним з ключових параметрів, які слід враховувати при оцінці довговічності електромобіля.

Для заданих циклів руху, що характеризуються тривалістю T , залежністю швидкості руху V та прискорення (уповільнення) a від часу t для легкового електромобіля, здійснено розрахунок необхідних показників роботи тягового електродвигуна (ТЕД). Зокрема, визначено частоту обертання ротора n_m у функції часу t та необхідного моменту на валу M_m .

Частоту обертання ротора n_m визначаємо за формулою:

$$n_m = \frac{30 \cdot V \cdot i}{\pi \cdot r_k} t, \quad (1)$$

де V – швидкість руху електромобіля в циклі,

$$M_m = \frac{[m \cdot (f \cdot g \cdot \cos \alpha + g \cdot \sin \alpha + \delta) + 0.5 \cdot \rho \cdot c_x \cdot S \cdot V^2] \cdot r_k}{i \cdot \eta}, \quad (2)$$

де m – маса електромобіля; f – коефіцієнт опору кочення; g – прискорення вільного падіння, м/с²; $\cos \alpha$ – кут підйому або ухилу (градус); $\sin \alpha$ – прискорення (гальмування) електромобіля, м/с²; δ – коефіцієнт урахування обертів мас; ρ – густина повітря, кг/м³; c_x – коефіцієнт аеродинамічного опору; S – площа фронтальної проекції електромобіля, м²; η – ККД трансмісії.

Величини M_m та n_m використовуються для визначення потужності заряду або розряду ТАБ залежно від струму навантаження, який визначається за формулою:

$$I_b = \frac{M_m \cdot n_m}{9550 \cdot U_b \cdot n_m \cdot \eta_i}, \quad (3)$$

де I_b – струм ТАБ, А; η_m – ККД тягового електродвигуна; η_i – ККД інвертора; U_b – номінальна напруга батареї.

Оскільки струм батареї змінюється в широкому діапазоні, що залежить від режиму руху, доцільно для порівняння енергетичних навантажень використовувати еквівалентне

м/с; r_k – динамічний радіус колеса, м; i – передавальне число трансмісії; t – час, с.

Момент на валу M_m , що вимірюється в Н·м, визначаємо за формулою (2):

значення струму, яке визначається за формулою:

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{\left\{ \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt \right\}}, \quad (4)$$

де $I_{\text{екв}}$ – еквівалентний струм, що відповідає постійному навантаженню в умовах експериментальних досліджень.

Його використання дозволяє оцінювати нагрівання батареї при різних температурних режимах, наближених до реальних умов експлуатації електромобіля.

Аналіз досліджуваних рухових циклів та оцінка характеристик роботи ТАБ для легкового електромобіля в цих умовах наведені в табл. 1. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що серед стандартних рухових циклів найбільш енерговитратним є US06, який імітує рух у міських умовах із високою швидкістю та інтенсивними прискореннями.

Таблиця 1 – Параметри їздових циклів і струмове навантаження ТАБ електромобіля [17]

Параметр	NYCC	ECE	US06	HFEDS	EUDC	FTP72	NEDC
Тип циклу	Міський			Заміський		Змішаний	
Тривалість циклу, с	598	195	600	765	400	1368	1181
Подолана відстань, м	1898	1013	12800	16512	6955	12100	11007
Максимальна швидкість, км/год	44,6	50	129,2	96,4	120	91,2	120
Середня швидкість, км/год	11,4	19	77,3	77,7	62,6	31,5	33,4
Максимальний струм ТАБ I_{max} , А	105,7	50,2	298,3	96,7	130,7	117,6	130,7
Еквівалентний струм ТАБ $I_{\text{екв}}$, А	17,3	14,4	78,2	40,6	44,5	25,2	28,2

Максимальний струм розряду ТАБ у такому режимі досягає 298 А, тоді як еквівалентний струм із урахуванням власних потреб автомобіля становить 78 А.

Представлені результати дозволили сформулювати умови роботи ТАБ для експериментальних досліджень теплових режимів роботи акумулятора.

Розрахунок струмів навантаження та теплових режимів ТАБ електротромобіля

У межах цього дослідження було проведено експериментальну оцінку електричних і теплових режимів запропонованого технічного рішення щодо конструкції модулів тягової акумуляторної батареї електромобіля [17,18].

Для комплексного аналізу роботи тягової та енергетичної систем електрообладнання розроблено стенд комплексних випробувань (СКІ), який дозволяє досліджувати різні режими роботи акумуляторних батарей та електричних приводів. До складу стенду входять автономний інвертор напруги, електродвигун-генератор, навантажувальний пристрій, блок силової комутації, пульт дистанційного керування, вимірювальні датчики струму та напруги, вимірювальний перетворювач напруги, система контролю стану акумуляторів і персональний комп'ютер. Усі ці компоненти працюють у комплексі для забезпечення точності досліджень та моделювання реальних умов експлуатації.

До стенду підключено тягову акумуляторну батарею, що складається з восьми послідовно з'єднаних модулів, кожен з яких має певні електрохімічні параметри. Важливим аспектом роботи стенду є можливість регулювання навантаження та вимірювання основних параметрів у реальному часі. Принцип роботи стенду базується на встановленні необхідного струму розряду батареї за допомогою електричного приводу змінного струму, який працює на навантажувальний пристрій. Користувач задає робочий режим через пульт дистанційного керування, а вимірювання параметрів струму та напруги здійснюється за допомогою відповідних датчиків. Отримані дані перетворюються і реєструються на персональному комп'ютері, що дозволяє проводити подальший аналіз ефективності роботи акумуляторної батареї та виявляти можливі відхилення від нормативних значень. Контроль стану акумуляторів виконується через спеціалізовану систему моніторингу, яка відстежує рівень заряду та температуру батарей. Таке технічне рішення дозволяє своєчасно виявляти несправності та запобігати передчасному зносу елементів живлення.

У ході експерименту було реалізовано послідовність розрядних режимів, що включали розряд максимальним струмом відповідно до циклу US06, розряд постійним струмом, еквівалентним навантаженню в режимі US06, а

також повторення цього режиму після короткої паузи. Максимальні струми застосовувалися в повторно-короткочасному режимі з чергуванням фаз розряду та релаксації. Отримані результати щодо вимірювань струму, напруги та розрахунку потужності навантаження представлені на відповідних графіках та таблицях. Аналіз графіків показує зміну робочих параметрів тягової акумуляторної батареї при поступовому збільшенні струму розряду та його подальшому утриманні на максимальному рівні протягом 16 секунд. Це дозволяє оцінити, як змінюється продуктивність батареї в умовах, наближених до реальної експлуатації. Такі режими характерні для інтенсивного розгону електромобіля до високих швидкостей або руху на підйом. У реальних умовах експлуатації подібні навантаження мають короткочасний характер, складають лише незначну частину загального їздового циклу та зазвичай чергуються з менш інтенсивними режимами роботи. Незважаючи на високу величину струму розряду, такі навантаження чинять обмежений вплив на загальний тепловий режим ТАБ, оскільки після пікових навантажень слідує період відносного спокою, що дозволяє батареї частково охолоджуватися. Результати експерименту представлені на рис. 2.

Для оцінки теплового стану модулів ТАБ на другому та третьому етапах випробувань було реалізовано тривалий розряд постійним струмом $I_{\text{екв}} = 78,2$ А. Це значення відповідає умовам експлуатації батареї в змішаному їздовому циклі US06, що включає як міський режим із низькою швидкістю, так і рух по автомагістралі з підвищеним рівнем навантаження. Аналіз отриманих результатів показав, що навіть при тривалих навантаженнях температурний режим батареї залишається в межах допустимих значень, що підтверджує ефективність використання таких акумуляторів у транспортних засобах з електричним приводом. Такі результати дозволяють рекомендувати ці акумуляторні батареї для подальшого використання у комерційних електротранспортних засобах.

Окрім цього, планується дослідження довготривалого впливу різних навантажувальних профілів на деградацію акумуляторів. Вивчення кінетики зміни електрохімічних характеристик дозволить сформулювати рекомендації щодо ефективного використання батарей у транспортних засобах. Подальші дослі-

дження спрямовані на оптимізацію параметрів зарядно-розрядних циклів, покращення системи терморегуляції та підвищення довговічності акумуляторних батарей у реальних умовах експлуатації. Використання сучасних

методів аналізу дозволить розширити можливості стенду комплексних випробувань та зробити його більш універсальним для різних типів акумуляторних систем.

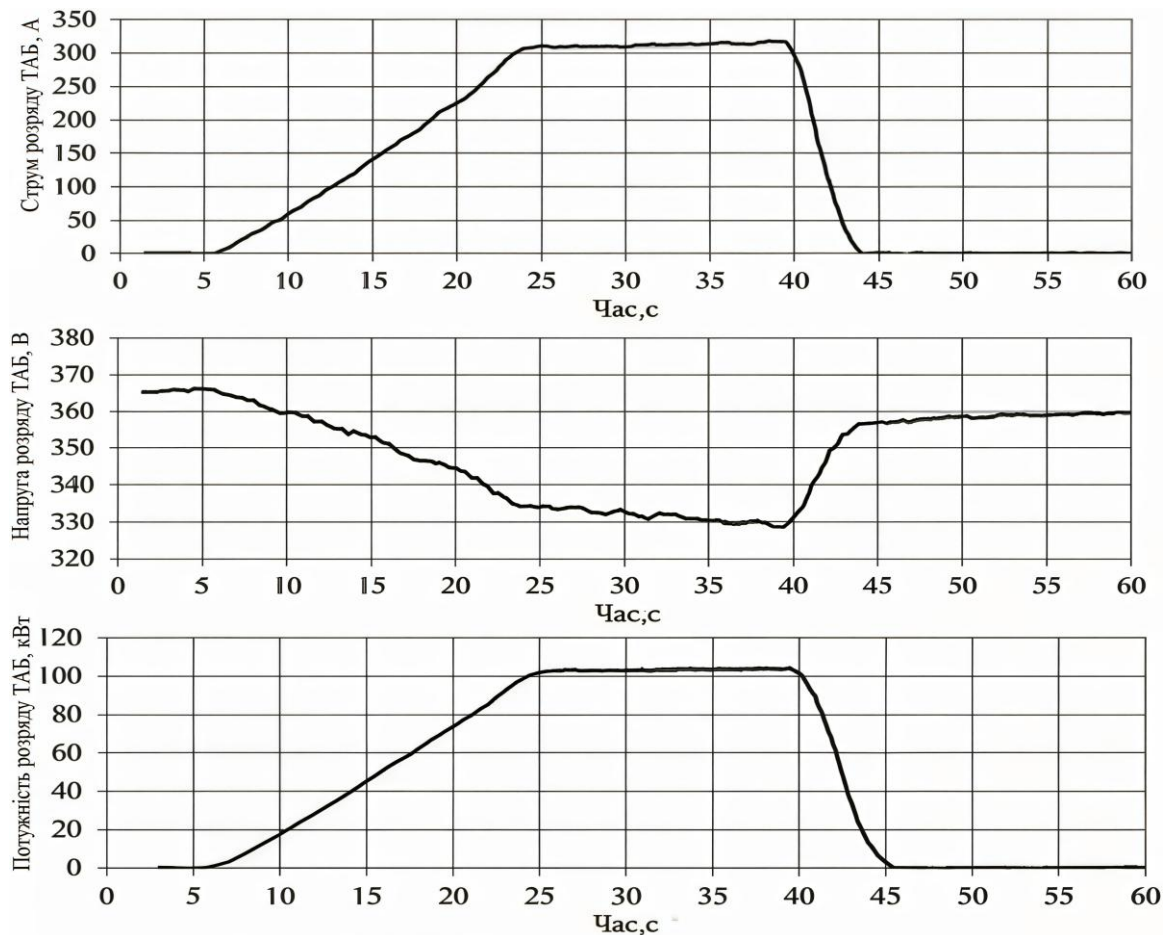


Рис. 2. Показники режиму роботи батареї з підтримкою максимального струму розряду

Для моделювання теплових процесів використовувалося програмне забезпечення COMSOL Multiphysics, яке дозволяє здійснювати високоточне чисельне моделювання з урахуванням геометричних, фізичних та теплотехнічних параметрів. Було застосовано модуль Heat Transfer з налаштуванням граничних умов відповідно до експериментальних параметрів. Такий підхід забезпечив змогу отримати достовірні результати, які відображають реальні фізичні процеси, що відбуваються під час теплового навантаження. Також для попередньої обробки геометричних даних використовувався SolidWorks, а для аналізу результатів – MATLAB.

Під час випробувань температура кожного модуля батареї контролювалася після завершення кожної стадії експерименту. Інфрачер-

воні зображення модулів у складі ТАБ із зазначенням температурних показників представлені на відповідних рисунках, а рівень нагріву внутрішніх електричних з'єднань – на додаткових графіках. Узагальнені результати вимірювань температури наведені в табл. 2.

Отримані дані підтверджують, що запропоноване технічне рішення забезпечує допустимий тепловий режим роботи акумуляторів навіть у найскладніших енергетичних умовах, характерних для їздового циклу US06. Максимальна температура, зафіксована у повітряному проміжку між секціями модулів, склала 24,3°C, а на поверхні тепловідведення акумуляторів – 28,9°C. З огляду на допустиму робочу температуру акумуляторів +55°C, можна зробити висновок про ефективність пасивного охолодження модулів без використання активних систем вентиляції. Варто зазначити,

що передбачена, але не задіяна примусова повітряна вентиляція акумуляторних секцій може значно розширити діапазон робочих температур та забезпечити стабільне підтримання нормального теплового режиму кожного акумулятора. Дослідження в цьому напрямку сприятимуть створенню нових, більш ефективних енергетичних систем для електротранспорту та сприятимуть розвитку сучасних методів енергоменеджменту. Термограма модулів ТАБ представлена на рис. 3.

Додатково було проведено аналіз впливу різних умов експлуатації на температурні ха-

рактеристики акумуляторних модулів. Випробування в умовах підвищеної вологості та змінного навантаження показали, що запропонована система охолодження ефективно підтримує оптимальний температурний баланс, не допускаючи перегріву окремих елементів.

Таким чином, результати проведених досліджень демонструють значний потенціал для розвитку пасивних систем охолодження, що є важливим кроком у напрямку створення більш надійних і безпечних акумуляторних технологій для сучасного електротранспорту.

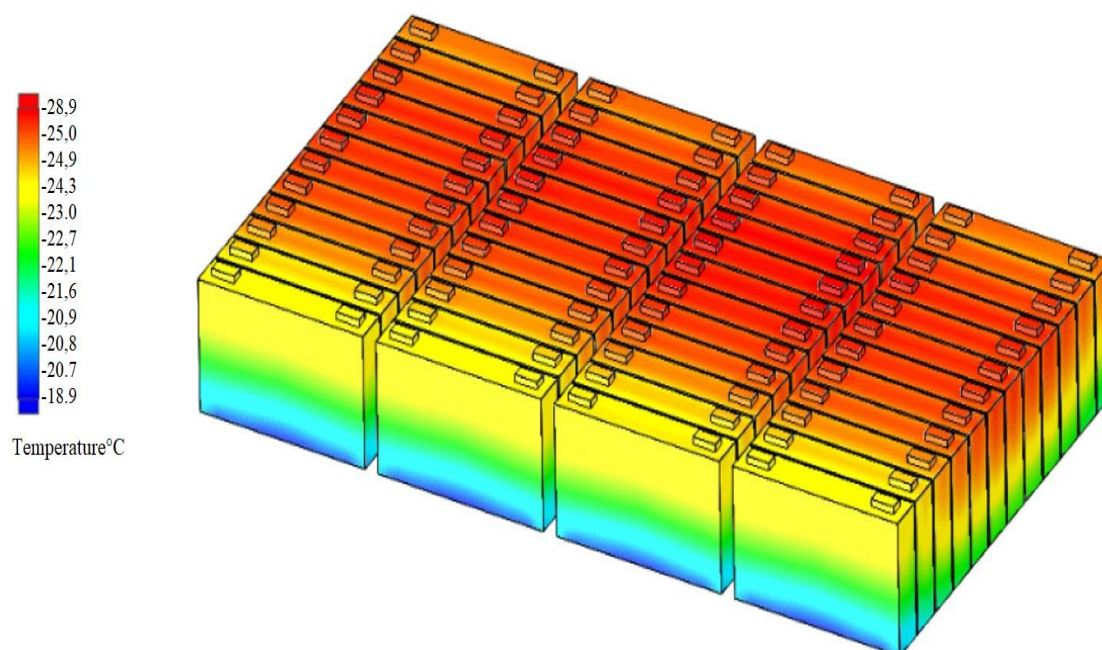


Рис. 3. Термограма модулів ТАБ після третьої стадії випробувань [19]

Таблиця 2 – Результати оцінки теплових режимів ТАБ електромобіля при максимальному струмі та двох послідовних циклах US06

Параметри	Стадії випробувань		
	1	2	3
Максимальна температура тепловідведення ТАБ, °C	22,1	25,0	28,9
Максимальна температура корпусу ТАБ, °C	20,8	22,7	24,3
Середня температура корпусу ТАБ, °C	18,9	20,9	21,6
Максимальна температура з'єднувачів ТАБ, °C	20,7	23,0	24,9

Хоча отримані результати дослідження є значущими та свідчать про ефективність пасивного охолодження, доцільним є більш глибокий аналіз особливостей температурного

розподілу в середині модуля. Наприклад, варто враховувати можливі теплові градієнти у різних частинах акумуляторного блоку, які можуть впливати на рівномірність зносу елементів і довготривалу надійність системи. Також існує вплив режимів експлуатації з частими піками навантаження, які можуть створювати короточасні температурні сплески, не зафіксовані під час стандартного тестування. Такий розширений підхід до аналізу дозволить більш точно оцінити потенціал системи в умовах реальної експлуатації електротранспорту.

Оскільки модуль ТАБ містить значну кількість з'єднаних між собою акумуляторів, важливим аспектом є якість внутрішніх електричних з'єднань.

У зв'язку з цим під час експериментальних досліджень проводився контроль темпера-

тури в місцях з'єднання електродів. Максимальна температура найбільш навантаженого електричного з'єднувача під час випробувань не перевищила 24,9°C, а температурний розкид усіх з'єднувачів у модулі становив близько 0,5°C.

Ці результати підтверджують надійність реалізованого роз'ємного гвинтового з'єднання та ефективність конструктивного виконання електричних контактів у складі модуля ТАБ.

Висновок

Екологічно чисті та енергетично ефективні транспортні засоби є основою автотранспортного комплексу майбутнього, який тісно взаємодіє з електроенергетичною галуззю, що базується на аналогічних принципах.

Оскільки накопичувачі електроенергії є найдорожчим і найвибагливішим елементом сучасного транспорту, їхня експлуатація потребує особливих умов, спрямованих на продовження терміну служби та ефективне використання енергетичних можливостей. Важливим завданням є забезпечення оптимальних умов роботи акумуляторів у складі тягових батарей, особливо з огляду на новітні технології у сфері хімічних джерел струму.

Запропоноване в цій статті конструктивне рішення модульної акумуляторної батареї спрямоване на вирішення цих завдань. Аналіз отриманих результатів підтверджує ефективність застосованих технічних рішень щодо охолодження акумуляторів у складі модуля батареї електромобіля [17-19].

Розглянутий підхід до визначення еквівалентного струмового навантаження дозволяє оцінити режими роботи акумуляторів у складі тягових батарей. Він забезпечує відтворення тепловиділення, яке відповідає умовам як розряду в тяговому режимі, так і заряду під час рекуперативного гальмування. Такий підхід суттєво спрощує відтворення теплових режимів ТАБ у ході експериментальних досліджень, що необхідно для оцінки ефективності різних систем термостатування акумуляторів у складі електромобільного транспорту.

Література

1. Hnatova, A., Bagach, R., & Sokhin, P. (2021). Economic and environmental impact of electric vehicles. *Proceedings of the Fourth International Scientific and Practical Conference "Automotive Transport and Infrastructure"* (pp. 215-217). Kyiv.

2. Багач, Р. В. (2024). Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму (Докторська дисертація, Харківський національний автомобільно-дорожній університет). Bahach, R. V. (2024). *Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii avtomobilnoho elektrottransportu z vykorystanniam zaryadnykh stantsii postijnoho strumu*. [Improving the efficiency of electric vehicle operation using DC charging stations.] (Doctoral dissertation, Kharkivskyi natsionalnyi avtomobilno-dorozhnii universytet). <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/20343> [in Ukrainian].
3. Багач, Р.В., & Кальченко, О.О. (2023). Перспективи та розвиток літєвих акумуляторів в Україні. Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 25–27 жовт. 2023 р. (с. 31–34). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. Bahach, R. V., & Kalchenko, O. O. (2023). *Perspektyvy ta rozvytok litiievkykh akumuliatoriv v Ukraini*. [Prospects and development of lithium batteries in Ukraine.] *Svitovi tendentsii resursozberezhennia na elektrichnomu transporti: materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf., Kharkiv, 25–27 zhovt. 2023 r.* (pp. 31–34). Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2023/Tezy_2023/Tezy_ET_23-25_10_23.pdf#page=31 [in Ukrainian].
4. Латвинський, В., & Багач, Р. (2024). Вплив зарядних станцій на екосистеми урбанізованих територій. *Редакційна колегія*, 28.(с. 28–31) *Vplyv zaryadnykh stantsiy na ekosystemy urbanizovanykh terytoriy*. [Influence of charging stations on the ecosystems of urbanization areas] *Redaktsiyna kolehiya*, 28. (pp 28–31) https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2024/Tezy_2024/Zbirmik_Ekol_stalij_rozvyurbosistem_2024.pdf#page=28 [in Ukrainian]
5. Гнатов, А. В., Аргун, І. В., & Улянець, О. А. (2017). Електромобілі–майбутнє, яке вже настало. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, (11), 24-28. Hnatov, A. V., Arhun, Sh. V., & Ulyanets, O. A. (2017). *Elektromobili-maibutnie, yake vzhe nastalo*. [Electric cars are the future that has already arrived.] *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, (11), 24-28. http://nbuv.gov.ua/UJRN/veit_2017_11_6 [in Ukrainian].
6. Багач РВ (2023). Відновлювана енергетика електротранспорту. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 6 листопада 2024 р., Держ. біотехнологічний ун-

- т. Харків: ДБТУ, 2024. С. 60-61. Bahach R.V. Vidnovlyuvana enerhetyka elek-trotransportu. [Renewable energy for electric transport.] Electric power engineering, electromechanics and technologies in agro-industrial complex: materials of the International Scientific-Practical Conference, November 6, 2024, State Biotechnological University. Kharkiv: DBTU, 2024. P. 60-61.
https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/59440/1/EE_tekhnolohiyi_APK_2024_60-61.pdf [in Ukrainian].
7. Багач, Р.В. (2023). Використання зарядних станцій для електромобілів у Харківській області. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування SEUTTOO-2023: 14-а Міжнародна науково-практична конференція (с. 323–327). Херсон: Херсонська державна морська академія. Bahach, R. V. (2023). Vykorystannia zaryadnykh stantsii dlia elektromobiliv u Kharkivskii oblasti. [Use of charging stations for electric vehicles in Kharkiv region.] Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnolohii ta obladnannia dlia yikh obsluhovuvannia SEUTTOO-2023: 14-a Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (pp. 323–327). Kherson: Khersonska derzhavna morskа akademiia <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/05/Матеріали-СЕУТТОО-2023.pdf> [in Ukrainian].
8. Багач, Р.В. (2021). Перспективи подальшого вдосконалення акумуляторних батарей для електромобілів. Міжнародна науковопрактична конференція присвячена 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету "Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців" (pp. 346-349). Харків: ХНАДУ. Bahach, R. V. (2021). Perspektyvy podalshoho vdoskonallennia akumuliatornykh batarei dlia elektromobiliv. [Prospects for further improvement of batteries for electric vehicles.] Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia, prysviachena 90-richchiu Kharkivskoho avtomobilnodorozhnogo universytetu ta 90-richchiu avtomobilnoho fakultetu "Novitni tekhnolohii v avtomobiliebuduvanni, transporti ta pry pidhotovtsi fakhivtsiv" (pp. 346–349). Kharkiv: KhNADU <https://api.dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/f2cddad8-ee08-4314-831e-018403b09d23/content> [in Ukrainian].
9. Латвинський, В. Д., & Багач, Р. В. (2024). Порівняльний аналіз характеристик тягових акумуляторів для сучасних електромобілів. Сучасне автомобілебудування, автотехнічна експертиза, експлуатація автомобільного транспорту та підготовка фахівців галузі транспорту: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції до Дня автомобіліста та дорожника, 22–23 жовтня 2024 р. (с. 267–271). Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Latvynskiy, V. D., & Bahach, R. V. (2024). Porivnialnyi analiz kharakterystyk tiahovykh akumuliatoriv dlia suchasnykh elektromobiliv [Comparative analysis of traction battery characteristics for modern electric vehicles]. In Suchasne avtomobilobuduvannia, avtotekhnichna ekspertyza, ekspluatatsiia avtomobilnoho transportu ta pidhotovka fakhivtsiv haluzi transportu: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to Motorist and Road Worker Day (pp. 267–271). Kharkivskiy natsionalnyi avtomobilno-dorozhnii universytet. <https://api.dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/2462be2b-bfa3-4347-8dc9-223b5b385034/content> [in Ukrainian].
10. Багач, Р. В., & Нетребенко, О. В. (2024). Тенденції та майбутнє систем контролю літій-іонних батарей. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: Збірка матеріалів IX Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції (Харків, 21–22 листопада 2024 р.). (с. 41–43). Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Bahach, R. V., & Netrebenko, O. V. (2024). Tendentsii ta maibutnie system kontroliu litii-ionnykh batarei [Trends and future of lithium-ion battery management systems]. In Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii: Proceedings of the IX International Scientific and Technical Online Conference (Kharkiv, November 21–22, 2024) (pp. 41–43). Kharkiv: Kharkivskiy natsionalnyi avtomobilno-dorozhnii universytet. [in Ukrainian].
11. Fan, Y., Zhan, D., Tan, X., Lyu, P., & Rao, J. (2021). Optimization of cooling strategies for an electric vehicle in high-temperature environment. *Applied Thermal Engineering*, 195, 117088. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431121005305>
12. Togun, H., Aljibori, H. S. S., Abed, A. M., Biswas, N., Alshamkhani, M. T., Niyas, H., ... & Paul, D. (2024). A review on recent advances on improving fuel economy and performance of a fuel cell hybrid electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 89, 22-47. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319924040072>
13. Буряківський, В. А. (2024). Аналітичне дослідження впливу температурних режимів тягових батарей електромобілів на їх ефективність. Сучасне автомобілебудування, автотехнічна експертиза, експлуатація автомобільного транспорту та підготовка

- фахівців галузі транспорт : зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф. до Дня автомобіліста та дорожника, 22–23 жовт. 2024 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2024. – С. 235–237. Buriakivskiy, V. A. (2024). Analitichne doslidzhennia vplyvu temperaturnykh rezhymiv tiahovykh batarei elektromobiliv na yikh efektyvnist [Analytical study of the impact of temperature regimes of electric vehicle traction batteries on their efficiency]. Modern automotive industry, automotive technical expertise, operation of road transport and training of transport industry specialists: collection of abstracts of the International Scientific and Practical Conference on the Day of the Motorist and Road Worker, October 22–23, 2024 / Kharkiv. National Automobile and Road Univ. – Kharkiv, 2024. – P. 235–237.
<https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/24035> [in Ukrainian].
14. Mallick, S. S., Neog, S., Mahanta, D. K., & Rafi, M. (2021, April). A review on passive cooling techniques for lithium-ion battery thermal management system of electric vehicle. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1145, No. 1, p. 012046). IOP Publishing. (pp. 1–12).
https://www.researchgate.net/publication/351865257_A_review_on_passive_cooling_techniques_for_lithium-ion_battery_thermal_management_system_of_electric_vehicle
15. Saechan, P., Dhuchakallaya, I., & Saat, F. A. Z. M. (2023). Thermal performance improvement of forced-air cooling system combined with liquid spray for densely packed batteries of electric vehicle. *Engineered Science*, 24 (4), 886. (pp.1–14).
<https://www.espublisher.com/journals/article/details/886>
16. Wang, B., Ou, Y., Wang, P., Li, Z., Zhang, Y., Zhang, X., & He, X. (2022, December). An Analysis of Li-ion Traction Battery System Thermal Simulation Based on Simplified Pipeline Fluid Model and Liquid Cooling Enhancement. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2399, No. 1, p. 012035). IOP Publishing. (pp.1–9).
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2399/1/012035/meta>
17. Xie, Y., Wang, X., Hu, X., Li, W., Zhang, Y., & Lin, X. (2021). An enhanced electro-thermal model for EV battery packs considering current distribution in parallel branches. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(1), 1027–1043.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9508844>
18. Дослідження літій-іонних батарей для експлуатації електромобілями при різних температурних умовах. ISSN 2074-2630 Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» № 1 (30) 2024. 58-64. Latvynskiy, V.D., & Bahach, R.V. (2024). Doslidzhennia litii-ionnykh batarei dlia ekspluatatsii elektromobiliamy pry riznykh temperaturnykh umovakh. [Study of lithium-ion batteries for electric vehicle operation under different temperature conditions.] ISSN 2074-2630 Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: «Elektrotehnika i enerhetyka» № 1 (30) 2024.
<https://doi.org/10.31474/2074-2630-2024-1-58-64> [in Ukrainian]
19. Mei, N., Xu, X., & Li, R. (2020). Heat dissipation analysis on the liquid cooling system coupled with a flat heat pipe of a lithium-ion battery. *ACS omega*, 5(28), 17431–17441.
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c01858?fig=fig6&ref=pdf>
- Латвинський Владислав Дмитрович¹**, асистент кафедри автомобільної електроніки, e-mail: latvin2000@gmail.com, тел. +38 0988956781, +38 0992599142
- Багач Руслан Володимирович¹**, доктор філософії (PhD), доцент кафедри автомобільної електроніки, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, тел. +38 0507255660, +38 0935761042, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>
- Плахтій Олександр Андрійович²**, кандидат наук, доцент, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, e-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com тел. +38 0939176020 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>
- Запорізький Валентин Вікторович³**, аспірант, кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки e-mail: valentyn.zaporizkyi@nure.ua тел. +38 0979486565 ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8348-3657>
- ¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.
- ²Український державний університет залізничного транспорту, 61001, Україна. м. Харків, майдан Оборонний Вал, 7.
- ³Харківський національний університет радіоелектроніки, 61166, Україна, м. Харків, проспект Науки, 14.

Effects and optimization of the temperature regime of Lithium-ion batteries in the traction battery of an electric car

Abstract. Problem. The article investigates the electrical and thermal characteristics of a modular lithium-ion battery under conditions of simulation of discharge modes typical for the movement of a passenger electric vehicle in fast

driving cycles. During experimental tests, a qualitative and quantitative assessment of the heat dissipation of lithium-ion batteries in the traction battery compartment of an electric vehicle was carried out, and the effectiveness of passive air cooling of batteries in the proposed design of battery modules was also confirmed. **Goal:** The purpose of this work is to experimentally assess the heat dissipation of battery modules and the efficiency of the implemented convection cooling in the composition of the traction battery (TAB) of an electric vehicle. The study is aimed at improving the operational characteristics of the battery by optimizing the temperature regime of the batteries. **Methodology.** To achieve the set goal, it is necessary to solve several key tasks. First, the discharge and charge power of the TAB must be calculated under various driving conditions of an electric vehicle. Next, the current load in a typical driving cycle needs to be determined, followed by the calculation of the equivalent current of battery discharge. Once these calculations are completed, an experimental reproduction of the calculated load currents will be conducted through bench tests. Additionally, the heat dissipation of battery modules during different load regimes will be assessed. The efficiency of passive air cooling in the proposed battery design will be analyzed, along with the impact of various operating modes on battery temperature and service life. **Results.** The study analyzed energy efficiency parameters of an external DC EV charging station using an active rectifier. The conducted research demonstrated that the maximum efficiency of the system is achieved in the mode of minimum charge current. At the same time, reducing the charge current leads to an increase in the charging process duration and a slight deterioration in power quality parameters. **Originality.** The findings of this study present a novel approach to battery thermal management, integrating passive

cooling techniques with efficient battery module design to optimize energy utilization and extend operational lifespan. **Practical value.** The results of this study hold significant practical value for the advancement of electric vehicle battery technology. The proposed optimization techniques can be integrated into future battery systems to improve thermal stability and efficiency, thereby supporting the broader adoption of electric vehicles in modern transportation networks.

Keywords: electric vehicle, traction battery, lithium-ion battery, experiment, load test.

Latvynskyi Vladyslav¹, Assistant of the automotive electronics Department,
e-mail: latvin2000@gmail.com,
tel. +38 0988956781, +38 0992599142,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4891-2925>

Bahach Ruslan¹, Doctor of philosophy (PhD),
Associate Professor of the automotive electronics Department,
e-mail: bagach.ruslan@gmail.com,
tel. +38 0507255660, +38 0935761042,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>

Plakhtii Oleksandr², Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Department of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics,
e-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com
tel. +38 0939176020
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>

Zaporizkyi Valentyn³, Ph. D. student, Department of computer-integrated technologies, automation and robotics, e-mail: valentyn.zaporizkyi@nure.ua,
tel. +38 0979486565,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8348-3657>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Ukrainian state university of railway transport, 7 Obroyny Val Square, Kharkiv, 61001, Ukraine

³Kharkiv National University of Radio Electronics, 14 Nauky Avenue, Kharkiv 61166, Ukraine.

Розробка прогностичної моделі деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів

Смирнов О.П.¹, Борисенко А.О.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Стаття присвячена проблемі визначення остаточного ресурсу літій-іонних акумуляторних батарей на ранній стадії експлуатації електромобілів за допомогою нової моделі деградації ємності. Проведений аналіз працездатності та деградації літій-іонних акумуляторів та досліджені фактори їх деградації. Розроблена прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, яка визначає залишковий ресурс акумуляторної батареї та передбачає його життєвий цикл, використовуючи дані лише з ранніх циклів заряд/розряд, на яких відбувається значно менша деградація. Наведені методи підвищення терміну служби батарей електромобілів.

Ключові слова: акумуляторна батарея, деградація, електромобіль, прогнозування, прогностична модель, стан працездатності, цикл заряд/розряд, термін служби

Вступ

Через проблеми зміни клімату та виснаження викопного палива електричні транспортні засоби стали привабливим рішенням для декарбонізації транспортного сектора. Літій-іонні батареї стали домінуючим рішенням для живлення електромобілів через їхні гарні характеристики (високу щільність енергії та потужності) порівняно з іншими технологіями.

Деградація літій-іонних акумуляторних батарей є тривалим поступовим процесом, і на стан батареї впливають різні фактори, такі як температура, величина струму заряду та розряду, балансування акумуляторів у батареї та напруга заряду. Наразі досягнуто певних успіхів у дослідженні та моделюванні стану працездатності акумуляторних батарей електромобілів. Пов'язані дослідження включають механізм деградації батареї та аналіз факторів старіння, керування справністю батареї, моніторинг і оцінку стану акумуляторних батарей, прогнозування терміну їх служби, тощо.

Під час деградації літій-іонної батареї побічні реакції в електродах та електроліті призводять до втрати літію та активного матеріалу. Деградація батареї відбувається як під

час циклічної роботи батареї, так і під час простою. Стан заряду, температура, високий циклічний струм є зовнішніми факторами, які впливають на зменшення ємності акумуляторної батареї електромобіля. Тим часом внутрішній опір збільшується під час деградації, що призводить до зниження максимальної потужності батареї.

Отже, прогнозування стану працездатності акумуляторних батарей є важливою проблемою при експлуатації електромобілів. Розробка прогностичної моделі деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, яка визначає залишковий ресурс акумуляторної батареї та передбачає його життєвий цикл є важливою проблемою як для власників електромобілів (як нових та тих, що були в експлуатації), так і виробників електричних транспортних засобів (для формування гарантійних зобов'язань).

Прогностична модель деградації літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів заснована на використанні даних з перших циклах заряд/розряд (від 200 до 250), на яких відбувається ще незначна деградація. Важливою проблемою також є визначення методів

підвищення терміну служби акумуляторних батарей електромобілів.

Аналіз публікацій

Найбільшою проблемою для широкого впровадження електромобілів є розробка недорогих довговічних та енергоємних акумуляторних систем, які дозволять електромобілям збільшити дальність руху на одному заряді [1]. Тому виробники акумуляторів вкладають значні кошти у свої розробки високоефективних накопичувачів електричної енергії [2]. Проте очікуваний термін служби, висока потужність і щільність енергії акумуляторних батарей ще не досягнуто [3]. Крім того проблема безпеки літій-іонних акумуляторних батарей, такі як пожежа та вибух, викликають серйозне занепокоєння [4]. В дослідженнях [5] проведений огляд стратегій безпеки та пожеж літій-іонної батареї. Виробники електричних транспортних засобів посилюють тести на безпеку, особливо ті, що стосуються вибухів та горіння в умовах експлуатації електромобілів [6].

Керування температурою є одним із ключових факторів безпеки, ефективності та довговічності акумуляторних батарей електромобілів. Літій-іонні акумулятори чутливі до коливань температури, тому їх використання поза оптимальним температурним діапазоном може призвести до прискореної деградації, зменшення ємності та погіршення безпеки. Ключові показники, які використовуються для оцінки ефективності системи управління температурою батареї, включають рівномірність температури, ефективність охолодження, споживання енергії та вплив на термін служби батареї. У статті [7] описано експериментальне дослідження, під час якого розглядалося, як літій-іонні батареї для електромобілів поводитимуться в критичних умовах експлуатації. У дослідженні [8] запропоновано стратегію управління температурою та проведений повний аналіз останніх розробок і проблем у застосуванні охолодження літій-іонних акумуляторів електромобілів.

У статті [9] проведений огляд методів прогнозування працездатності літій-іонних акумуляторів, застосованих у реальних умовах експлуатації. У дослідженні [10] пропонується нова модель глибокого навчання LSTM-Informer для крапко-інтервального прогнозування ємності літій-іонної батареї.

У дослідженні [11] проведений аналіз розподілу стану працездатності батареї, ємності,

внутрішнього опору і спектроскопія електрохімічного стану, які були застосовані як діагностичні параметри для знятих з експлуатації літій-іонних батарей електромобілів. Крім того, було виконано балансування модулів в батареях, щоб оцінити, як зміна стану заряду батареї впливає на стан працездатності. Результати демонструють, що методологія діагностики залежить від хімічного складу батареї, і що не існує єдиної надійної діагностичної процедури, яку можна застосувати до всіх типів літій-іонних батарей.

У дослідженні [12] запропоновано гібридну структуру для точного передбачення та прогнозування стану працездатності літій-іонних акумуляторів для електромобілів з використанням шумових даних. Автори статті [13] використовують статистичні дані акумуляторних батарей від 550 електромобілів для прогнозування стану їх працездатності. Метод прогнозування працездатності, заснований на характеристиках гістограм, дозволяє визначити стан працездатності від навантаження батареї в процесі експлуатації.

У дослідженні [14] представлено методику точного прогнозування стану акумулятора, що є вирішальним для забезпечення безпеки та завоювання довіри споживачів. Використовуючи різні алгоритми машинного навчання, це дослідження вивчає досягнення в оцінці стану працездатності акумуляторів.

Літій-іонні елементи демонструють двофазну поведінку зменшення ємності: спочатку ємність знижується з низькою швидкістю, а потім, починаючи з певної початкової точки, ємність прискорює зниження. Таку точку вигину в англійській літературі називають knee-point – точка коліна [15-21].

Стандарт IEEE 485™-2010 [18] пов'язує «точку коліна» з переходом до стадії швидкого зниження ємності та потужності. Виникнення коліна є вирішальним фактором життєвого циклу акумулятора. Таким чином, здатність виявляти та, що більш важливо, прогнозувати виникнення коліна та (якщо можливо) його початок є цінною для виробників акумуляторних батарей, які можуть коригувати свої специфікації та відповідні гарантії, а також для кінцевого користувача.

Хоча це поняття knee-point добре задокументовано [15-21], література про ідентифікацію та прогнозування точки вигину є рідкісною, задокументовані лише кілька спроб. Наприклад, у дослідженні [16] визначають точку ви-

гину як перетин двох дотичних ліній до кривої згасання ємності, проведених у двох значущих точках (точці перегину та точці максимального коефіцієнта зміни нахилу).

На рис. 1 показано ідентифіковані точки вигину підігнаних графіках деградації ємності акумуляторів при різних температурах.

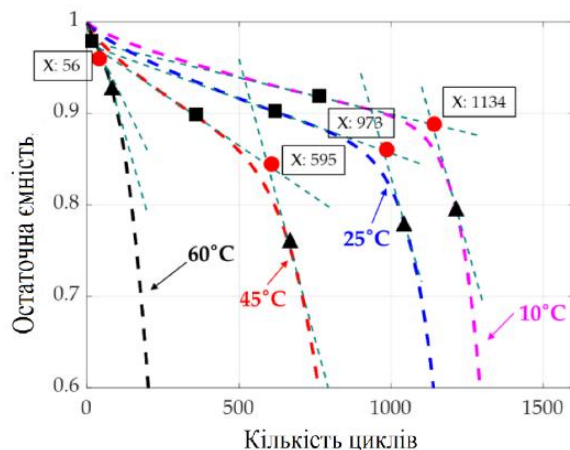


Рис. 1. Ідентифіковані точки вигину на графіку деградації ємності літій-іонних акумуляторів при різних температурах [18]

На рис. 2 нанесено відповідні дотичні лінії кожної кривої, а точки перетину дотичних позначено суцільними червоними колами. Точки з мінімальним і максимальним абсолютним коефіцієнтом зміни ухилу позначені на графіку чорними квадратами і чорними трикутниками відповідно. Кількість циклів X на перетині – це час, коли відбулося коліно.

У дослідженні [17] представлена нова методологія, яка призначена для передбачення появи точки вигину під час експлуатації акумулятора. Такий підхід передбачає детальний аналіз диференціальної напруги та ступеня неоднорідності для моніторингу та прогнозування вирішального моменту, коли акумулятор, ймовірно, досягне свого кінцевого рівня.

У дослідженні [19] визначають точку вигину як точку максимальної кривизни та розробляють алгоритм на основі цього визначення, який можна застосувати до широкого діапазону систем.

У дослідженні [20] визначено точку вигину як перетин двох прямих з різними нахилами та запропоновано алгоритм для онлайн-виявлення коліна на основі квантильної регресії. Автори виявили, що точки вигину в акумуляторах типу NMC з'явилася між 90 % та 95% стану працездатності SOH.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є прогнозування остаточного ресурсу літій-іонних акумуляторних батарей на ранній стадії експлуатації електромобілів за допомогою нової моделі деградації ємності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести дослідження працездатності та деградації акумуляторних батарей електромобілів, визначити основні фактори, що впливають на ефективність та термін служби літій-іонних акумуляторів та виконати аналіз сучасних публікацій за тематикою дослідження;
- розробити прогностичну модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, яка визначає залишковий ресурс акумулятора та передбачає його життєвий цикл, використовуючи дані лише з ранніх циклів заряд/розряд, на яких відбувається значно менша деградація;
- визначити методи підвищення терміну служби акумуляторних батарей за рахунок раціонального використання електромобілів.

Працездатність та деградація літій-іонних акумуляторів

Стан працездатності (від англ. State of Health, SOH) акумуляторної батареї електромобіля – це поточний показник остаточної ємності батареї порівняно з її ідеальними початковими умовами. На момент виготовлення SOH початкова ємність батареї складає 100 % та зменшується під час експлуатації. Найбільшими факторами, які впливають на працездатність та довговічність акумуляторної батареї електромобіля, є агресивне водіння та інфраструктура заряду (струми заряду та розряду, а також глибина розряду), тепла динаміка (підвищена або низка температура), швидкість деградації та термін експлуатації.

Системи керування батареями (від англ. Battery Management System, BMS) призначені для безпечної та ефективної роботи літій-іонних акумуляторних батарей та контролює процес заряду та розряду, температуру, стан працездатності, стан заряду (від англ. State of Charge, SOC). У розробників систем керування акумуляторних батарей BMS електромобілів немає консенсусу щодо того, як слід визначати стан працездатності SOH. Розробники BMS використовують різні параметри (окремо чи в комбінації), щоб отримати адекватне значення для стану працездатності акумуляторної батареї електромобілів:

- внутрішній опір (якщо внутрішній опір

зростає на 100 % від початкового, то акумуляторна батарея стає непридатною для електромобіля);

- ємність (якщо ємність стає нижче 80 % від початкової, то акумуляторна батарея стає непридатною для електромобіля);
- напруга, що вимірюється під різним навантаженням;
- саморозряд батареї та можливість приймати заряд;
- кількість циклів заряд-розряд;
- температурний режим батареї;
- порівняння загальної зарядженої та розрядженої енергії, тощо.

Деградація акумуляторів є ключовою науковою проблемою в дослідженнях систем накопичення енергії електромобілів. Ефект деградації літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля – це природний процес погіршення стану батареї та поступове зниження спосібності батареї зберігати та доставляти енергію. У середньому, залежно від використання та конкретних умов експлуатації, яким вони піддаються, акумуляторні батареї електромобілів втрачають від 1 % до 3 % свого запасу на рік.

На рис. 2 наведений приклад керованого діапазону ємності акумуляторної батареї, який використовується виробниками електромобілів, щоб зменшити вплив деградації на дальність пробігу електромобіля.

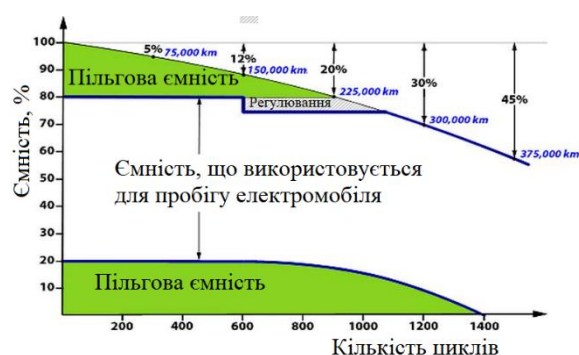


Рис. 2. Приклад керованого діапазону ємності акумуляторної батареї електромобіля. Зображення: Battery University [21]

Пільгова ємність (дивись рис. 1) – це додаткова ємність акумуляторної батареї електромобілів понад рекламовану, яка встановлюється виробником як буфер проти природної деградації та забезпечує додатковий запас безпеки від шкідливих методів зарядки [21].

Зменшення ємності акумуляторної батареї відбувається внаслідок незворотних електро-

хімічних побічних реакцій і може бути розділене на календарну та циклічну деградацію. Календарна деградація є функцією часу, температури та стану заряду SOC і виникає навіть тоді, коли акумулятор не використовується. Циклічна деградація пов'язана з кількістю циклів заряд-розряд та є функцією розглянутих вище факторів, які впливають на працездатність та довговічність акумуляторної батареї електромобіля.

Незважаючи на те, що для руху електричного транспортного засобу може бути використана лише корисна ємність, деградаційні процеси охоплюють всю ємність акумуляторної батареї.

Ємність акумулятора [22]:

$$Q(t) = Q_{batt} \left[1 - (q_{cal}(t) + q_{cycle}(t)) \right], \quad (1)$$

де $q_{cal}(t)$ – накопичена календарна деградація, %; $q_{cycle}(t)$ – накопичена циклічна деградація, %.

Календарна деградація батареї оцінюється за допомогою рівняння Арреніуса [22]:

$$\frac{dq_{cal}}{dt} = A_1 \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_k}} \sqrt{\frac{t}{86400}}, \quad (2)$$

де A_1 – постійна інтегрування; E_a – енергія активації, що дорівнює 24,5 кДж; T_k – абсолютна температура акумуляторної батареї, К; t – час, с; R – універсальна газова стала дорівнює $R = 8,31446261815$ Дж/(моль·К).

У дослідженні [22] також побудовані моделі зменшення ємності та потужності акумуляторних батарей електромобілів.

Прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів

Оцінка та прогнозування процесу деградації літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля, виявлення її причин, наслідків і стратегій мінімізації є критично важливою проблемою, особливо в умовах зростання електрифікації транспортної галузі. Ефективність літій-іонних акумуляторів значно виграють від точних ранніх прогнозів майбутньої втрати ємності, щоб покращити керування батареєю та підтримувати бажані характеристики для конкретного застосування якомога довше. Літій-

іонні елементи демонструють повільне зниження ємності до точки вигину, після чого погіршення швидко прискорюється до завершення терміну служби елемента.

Дослідження, що пов'язані з визначенням прогностичних характеристик акумуляторних батарей, ускладнюються тим, що для побудови моделі деградації акумуляторної батареї потрібен надзвичайно тривалий процес, що заснований на експериментальних дослідженнях поведінки конкретного акумулятора. Але емпіричну модель, отриману для однієї батареї, навряд чи можна перенести на інший тип батареї, навіть якщо розглядається той самий хімічний склад, оскільки розбіжність між осередками вже існує в процесі виробництва. Емпіричні моделі можуть бути непридатними для впровадження систем керування батареями, тому що реальні умови використання також будуть відрізнятися від лабораторних.

Зазвичай виробники електромобілів і систем накопичувачів енергії надають восьмирічну гарантію на акумуляторні батареї. Однак ідентичні електричні транспортні засоби або системи накопичення енергії можуть піддаватися дуже різним робочим циклам і умовам навколишнього середовища, що впливає на швидкість деградації акумуляторної батареї.

Прогнозування точки вигину дозволить визначити початок швидкого погіршення ємності літій-іонних акумуляторів і, таким чином, слугуватиме індикатором швидкої деградації акумулятора. Це також показник, який можна використовувати в поєднанні з порогом зниження ємності до 80 % для оцінки тривалості ефективності та надійності акумуляторної батареї електромобіля. Визначення залишкового терміну служби акумулятора є значним показником для кваліфікаційної оцінки, планування технічного обслуговування акумуляторів у комерційних електронних системах, а також для оцінки та планування вторинного використання акумуляторів знятих з електромобілів.

Проблема раннього прогнозування має на меті передбачити (якісно чи кількісно) залишковий ресурс акумулятора та передбачити його життєвий цикл, використовуючи дані лише з ранніх циклів акумуляторів, де відбувається значно менша деградація. На рис. 3 наведені два підходи до прогнозування точки вигину на графіку деградації ємності.

Якщо відомі данні про графіки деградації ємності та про повний життєвий цикл акумуля-

лятора та вони працюють приблизно в однакових умовах експлуатації, то можна з високою достовірністю провести раннє прогнозування та раціонально визначити точку вигину, а також спрогнозувати залишковий ресурс акумуляторної батареї електромобіля.

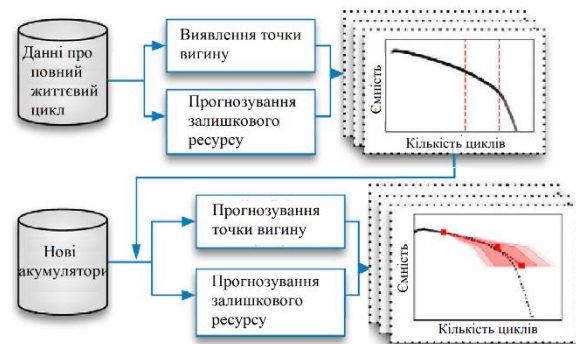


Рис. 3. Два підходи до прогнозування точки вигину на графіку деградації ємності літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля [15]

Але в даному випадку треба враховувати умови експлуатації літій-іонної акумуляторної батареї такі як клімат, в якому експлуатується електромобіль, скільки швидких зарядів вона отримала, скільки років є в експлуатації та в яких критичних режимах працювала акумуляторна батарея електромобіля.

Якщо невідомі данні про повний життєвий цикл акумулятора (нові акумулятори) тоді зробити процес прогнозування значно ускладнюється, тому що може бути декілька сценаріїв роботи літій-іонного акумулятора електромобіля, як це показано на рис. 3 червоними лініями.

Розроблена прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів визначає початок викривлення «колінного суглоба», як початок нелінійної деградації. Ми пов'язуємо життєвий цикл літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля з такими параметрами:

- початок викривлення;
- точка вигину;
- значна деградація.

Визначення початку викривлення на графіку деградації ємності, як це показано на рис. 4, прогнозує ідентифікацію точки вигину, а визначення точки вигину прогнозує ідентифікацію початку значної деградації та остаточного життєвого циклу акумуляторної батареї.

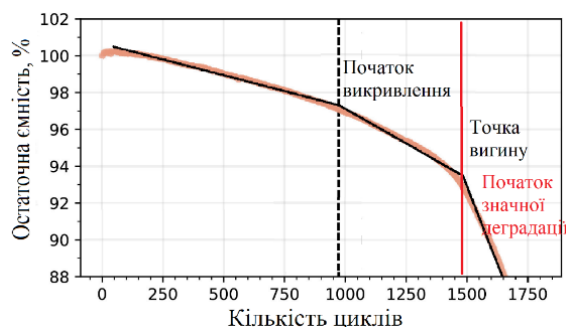


Рис. 4. Визначення початку викривлення на графіку деградації ємності [15]

Точка початку викривлення (дивись рис. 4) означає кінець першої фази лінійної деградації ємності акумуляторної батареї, за якої зниження ємності теж можна апроксимувати як лінійну функцію до точки вигину. Визначення початку викривлення може бути кращим у додатках, де важливий залишковий термін корисного використання, оскільки він дає змогу отримати раннє попередження про прискорення деградації акумулятора. Прогнозування точки вигину дає змогу отримати початок інтенсивної деградації акумулятора та адекватно прогнозувати його остаточний термін служби.

Можливість виявлення початку викривлення дає власнику електромобіля попереднє попередження про те, що починається прискорена деградація акумуляторної батареї. Таким чином, здатність ідентифікувати/передбачити початок прискореної деградації акумуляторних батарей є бажаною з точки зору кінцевого користувача.

Поява точки вигину на графіку деградації ємності літій-іонного акумулятора може бути класифікована згідно кількості циклів заряд/розряд на наступні діапазони:

- короткий діапазон, якщо кількість циклів складає менш 500;
- середній діапазону, якщо кількість циклів від 500 до 1100;
- довгий діапазон, якщо кількість циклів більш 1100.

У дослідженні [23] проведені експериментальні дослідження з 124 комерційними літій-іонними фосфатне-графітовими LFP акумуляторами типу APR18650M1A, що виготовлені компанією A123 Systems. Ці літій-іонні акумулятори проходили цикли заряд/розряд на 48-канальному потенціостаті Arbin LBT у температурній камері з примусовою конвекцією, встановленою на 30 °C. Акумулятори

мають номінальну ємність 1,1 А·год і номінальну напругу 3,3 В.

Літій-іонні LFP акумулятори типу APR18650M1A циклічно проходили розряд струмом 4С з наступними різними умовами швидкого заряду в основному струмом від 3С до 8С, при цьому лише невелика кількість акумуляторів заряджалася струмом від 1С до 2С (менше 10 %). Набір даних містить вимірювання температури, струму, зарядної та розрядної ємності під час циклів, а також вимірювання ємності, внутрішнього опору та часу заряду за цикл. Експериментальні данні записуються послідовно, починаючи з другого циклу, принаймні, до циклу, коли кожна комірка досягає 80 % номінальної ємності. Детальний опис отриманих даних і проведеного експерименту можна знайти на сайті [24].

Нами проведений досконалий аналіз результатів цього експерименту та інших аналогічних досліджень, що присвячені визначенню деградації ємності реальних акумуляторів. Результати проведеного аналізу графіків деградації ємності реальних літій-іонних акумуляторів від кількості циклів заряд/розряд дозволили сформулювати наступні положення, що є основою прогностичної моделі деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів:

- точка викривлення на графіку деградації ємності літій-іонного акумулятора виникає між 97 % та 95 % ємності. При чому в критичних умовах експлуатації (при струмах заряду 8С) деградація ємності складала 97%, а в легких умовах експлуатації (при струмах заряду від 1С до 2С) – 95 %, як це показано на рис. 5;

- точка вигину на графіку деградації ємності літій-іонного акумулятора виникає між 94% та 90 % ємності. При чому в критичних умовах експлуатації (при струмах заряду 8С) деградація ємності складала приблизно 94 %, а в легких умовах експлуатації (при струмах заряду від 1С до 2С) – приблизно 90 % як це показано на рис. 5;

- кількість циклів заряд/розряд (позначення на рис. 5 як 1,5d) від початку експерименту до точки вигину на графіку деградації ємності літій-іонного акумулятора у 1,4-1,5 разів перевищує кількість циклів заряд/розряд (позначення на рис. 5 як d) від початку експерименту до точки викривлення. Такий взаємозв'язок спостерігається як для критичних умов експлуатації, так і для легких, як це показано на рис. 5. Наприклад, якщо кількість

циклів заряд/розряд від початку експерименту до точки початку викривлення на графіку деградації ємності літій-іонного акумулятора складає 500, то кількість циклів заряд/розряд від точки початку викривлення до точки вигину складає від 200 до 250 циклів. А загальна кількість циклів заряд/розряд акумулятора до точки вигину складає від 700 до 750 циклів. Після 750 циклів заряд/розряд інтенсивність деградації літій-іонного акумулятора ще посилюється, але експлуатацію акумулятора, ще можна продовжувати ;

- тангенс кута (позначення на рис. 5 як $2tg\alpha$) від точки викривлення до точки вигину приблизно у 2 рази перевищує $tg\alpha$, де α - кут спаду дотичної прямої від початку експлуатації до точки викривлення – це той кут, визначення якого дозволяє прогнозувати стан працездатності та термін служби акумуляторної батареї електромобіля, якщо його умови використання не будуть значно змінюватись. Тангенс кута спаду дотичної прямої нижче точки вигину, після якої починається інтенсивна деградація акумулятора, перевищує початковий тангенс кута нахилу більш ніж у 4 рази (позначення на рис. 5 як $>4tg\alpha$). Такий взаємозв'язок спостерігається як для критичних умов експлуатації, так і для легких. Слід відмітити, що тангенс кута спаду дотичної прямої характеризує швидкість деградації акумуляторів, наприклад, якщо за перші 350 циклів заряд/розряд ємність акумулятора зменшилась на 3 %, це означає, що акумулятор у кожному циклі втрачає приблизно 0,0085 % ємності. Такий процес деградації визначається тангенсом кута спаду дотичної прямої від початку експлуатації до точки викривлення $tg\alpha$ з урахуванням масштабного коефіцієнту. А якщо за наступні 175 циклів заряд/розряд ємність акумулятора зменшилась ще на 3 %, це означає, акумулятор у кожному циклі втрачає приблизно 0,017 % ємності, а тангенс кута акумуляторної батареї збільшуватиметься у два рази та буде дорівнювати $2tg\alpha$;

- існує кореляційна залежність між тангенсом кута спаду дотичної прямої від початку експлуатації до точки викривлення та кількістю прогнозованих циклів заряд/розряд $d_{жц}$. Причому чим менший кут α_{min} , тим буде більша кількість циклів заряд/розряд $d_{жц}$ при життєвому циклі акумуляторної батареї перед початком інтенсивної деградації, при цьому буде довшим термін служби акумулятора, як

це показано на рис. 5. Та навпаки, чим більший кут α_{max} , тим буде менша кількість прогнозованих циклів заряд/розряд $d_{жц}$, тим буде коротшим життєвий цикл акумулятора.

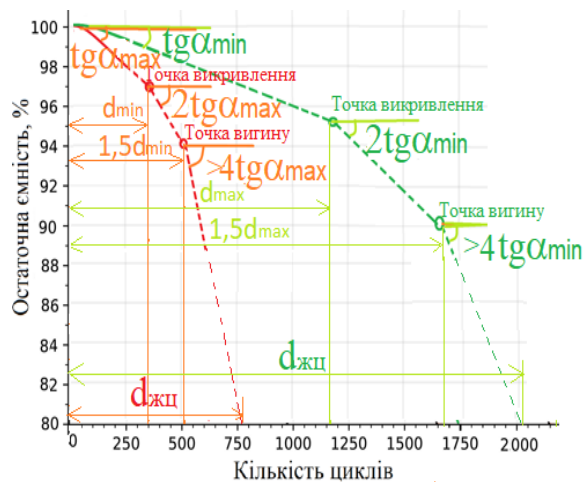


Рис. 5. Прогностичні моделі деградації ємності літій-іонних акумуляторів в легких та критичних умовах експлуатації

На рис. 5 показані дві прогностичні моделі стану працездатності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, які експлуатуються в двох крайніх режимах роботи: легких (α_{min} , d_{max}) та критичних (α_{max} , d_{min}). Всі інші прогностичні моделі будуть знаходитись між цими двома моделями та мати відповідні пропорційні значення тангенса кута спаду дотичної прямої α від горизонтальної лінії та кількістю прогнозованих циклів заряд/розряд $d_{жц}$. Точка вигину демонструє початок інтенсивної деградації акумулятора.

Як згадувалося раніше, коли ємність акумуляторної батареї електромобіля досягає 80% своєї початкової ємності, вона вважається такою, що досягла кінця свого життєвого циклу. В легких умовах експлуатації акумуляторної батареї електромобіля кількість циклів заряд/розряд $d_{жц}$ може складати більш 2000, але в критичних режимах $d_{жц}$ може не перевищувати і 750 циклів заряд/розряд (дивись рис. 5). Таким чином критичні умови експлуатації електромобілів можуть зменшити життєвий термін експлуатації літій-іонних акумуляторних батарей майже в 3 рази.

Згідно проведеного дослідження можна побудувати прогностичну модель стану працездатності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів та визначити прогнозний термін служби батареї в початковий період експлуатації електричного транспортного засобу. Для більш точного прогнозування остаточного

ресурсу акумуляторної батареї достатньо виконати від 150 до 200 циклів заряд/розряд.

На рис. 6 наведена прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів.

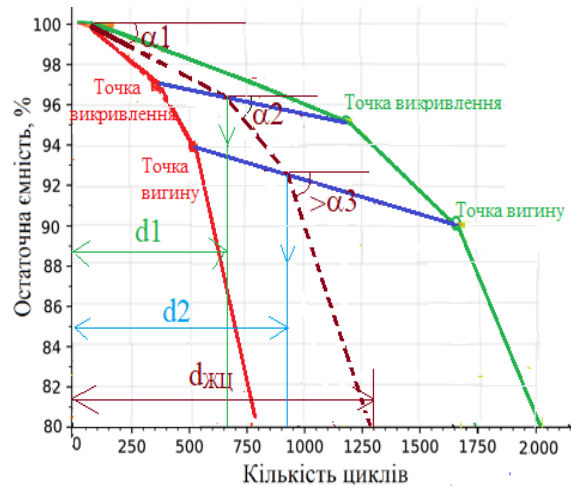


Рис. 6. Прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів

Після визначення відповідного кута α_1 (дивись рис. 6), який характеризує швидкість деградації акумуляторної батареї на початку експлуатації електромобіля, та який дорівнює відношенню втрати ємності ΔC до кількості перших Δd циклів заряду/розряду з урахуванням масштабних коефіцієнтів:

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{\Delta C1}{\Delta d1} \cdot \frac{md}{mC}\right), \quad (3)$$

де $\Delta C1$ – зниження ємності акумуляторної батареї за перші $\Delta d1$ циклів заряду/розряду, %; $\Delta d1$ – кількість циклів заряду/розряду, після яких трапляється зниження ємності акумуляторної батареї на величину $\Delta C1$, md та mC – масштабні коефіцієнти кількості циклів та остаточної ємності відповідно, які узгоджують параметри циклів та ємності на графіках прогностичної моделі деградації ємності акумуляторної батареї.

Відношення масштабних коефіцієнтів $\frac{md}{mC}$ розраховано наступним чином. На графіку прогностичної моделі деградації ємності акумуляторної батареї, наприклад, відрізок від 0 до 1000 циклів (різниця 1000, тому $md=1000$) дорівнює відрізку від 80 % до 90 %

(різниця 10, тому $mC=10$), а відношення $\frac{md}{mC}$ буде як раз відношенням цих параметрів $\frac{md}{mC} = \frac{1000}{10} = 100$.

Прийmemo, що після перших 200 циклів заряд/розряду акумуляторна батарея знизила ємність на 1 %. Тоді кут

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{1}{200} \cdot 100\right) = 26,5\%$$

Тоді на кожному циклі заряду/розряду акумулятор втрачає в середньому 0,005 % своєї ємності.

Далі згідно рис. 6 під визначеним за формулою (3) кутом $\alpha_1=26,5\%$ вирисовуємо прогностичну пряму від початку експлуатації електромобіля, коли ємність акумуляторної батареї дорівнює 100 %, до прямої, яка з'єднує крайні точки виправлення. Точка перетину буде прогнозню точкою викривлення для цієї акумуляторної батареї.

Опустимо перпендикуляр від прогнозню точки викривлення на вісь кількості циклів та отримаємо кількість надійних циклів заряд/розряду $d1$, в яких деградація акумуляторних батарей буде незначною. В нашому випадку $d1=650$ циклів.

Після цього проводимо розрахунок кута α_2 , який визначає швидкість деградації акумуляторної батареї від точки викривлення до точки вигину:

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{\Delta C2}{\Delta d2} \cdot \frac{md}{mC}\right), \quad (4)$$

де $\Delta C2$ – прогнозоване зниження ємності акумуляторної батареї від точки викривлення до точки вигину, %; $\Delta d2 = \frac{\Delta d1}{2}$ – кількість циклів заряду/розряду, після яких трапилось прогнозоване зниження ємності акумуляторної батареї електромобіля на величину $\Delta C2$.

Прогнозний розрахунок кута нахилу прямої від точки викривлення до точки вигину показує, що кут

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{1}{200/2} \cdot 100\right) = 45\%.$$

Тоді на кожному циклі заряду/розряду акумулятор втрачає в середньому 0,01 % своєї ємності.

Далі згідно рис. 6 під визначеним за формулою (4) кутом $\alpha_2=45\%$ вирисовуємо прогностичну пряму від прогнозню точки викривлення до прямої, яка з'єднує крайні точки вигину. Точка перетину буде прогнозню точкою

вигину для цієї акумуляторної батареї. Опустимо перпендикуляр від прогнозованої точки вигину на вісь кількості циклів та отримаємо кількість циклів заряд/розряд d_2 , в яких деградація акумуляторної батареї буде більш інтенсивною, ніж в першому випадку. З графіка деградації ємності отримуємо $d_2=950$, що у 1,46 разів перевищує d_1 .

Після цього проводимо розрахунок кута α_3 , який визначає прогнозовану швидкість деградації акумуляторної батареї після точки вигину. Після точки вигину починається етап інтенсивної деградації акумуляторної батареї електромобіля:

$$\alpha_3 \geq \arctg\left(\frac{\Delta C_3}{\Delta d_3} \cdot \frac{md}{mC}\right), \quad (5)$$

де ΔC_3 – прогнозоване зниження ємності акумуляторної батареї після точки вигину, %; $\Delta d_3 = \Delta d_1 / 4$ – кількість циклів заряду/розряду, після яких трапилось прогнозоване зниження ємності акумуляторної батареї електромобіля на величину ΔC_3 .

Прогнозний розрахунок кута нахилу прямої від точки вигину до кінцевого терміну служби акумулятора показує, що кут

$$\alpha_3 \geq \arctg\left(\frac{1}{200/4} \cdot 100\right) \geq 65\%. \quad \text{Приймаємо}$$

$\alpha_3 = 70\%$. Тоді на кожному циклі заряду/розряду акумулятор втрачає в середньому 0,02 % своєї ємності.

Далі згідно рис. 6 під визначеним за формулою (5) кутом $\alpha_3 = 70\%$ вирисовуємо прогностичну пряму до 80 % остаточної ємності акумуляторної батареї, при якій закінчується термін служби акумуляторної батареї. Перетин цієї прямої з віссю циклів визначає прогнозовану кількість циклів заряд/розряд акумуляторної батареї електромобіля $d_{жц}$. В нашому випадку $d_{жц} = 1300$ циклів. Це означає, що на кожному циклі заряду/розряду акумулятор втрачає в середньому за весь життєвий цикл приблизно 0,01538 % своєї ємності.

Визначення циклів заряд/розряд акумуляторної батареї $d_{жц}$ допоможе провести прогнозування наступних характеристик електромобіля:

- загальний прогнозний пробіг електромобіля, тис. км;
 - прогнозна кількість років експлуатації.
- Кількість прогнозних циклів заряд/розряд

акумуляторної батареї електромобіля $d_{жц}$ можна перевести спочатку у км пробігу електромобіля. Наприклад, якщо дальність пробігу на повному заряді акумуляторних батарей складає $S=200$ км, то для визначення ресурсу батареї треба кількість циклів $d_{жц}$ помножити на S . В нашому випадку загальний прогнозний пробіг електромобіля складає $1300 \cdot 200 = 260$ тис. км.

Якщо відомий середньорічний пробіг електромобіля, то можна визначити прогнозну кількість років його експлуатації, як відношення загального прогнозного пробігу електромобіля на середньорічний пробіг. Приймаємо, що середньорічний пробіг електромобіля складає 20 тис. км. Тоді в нашому випадку прогнозна кількість років експлуатації буде складати $260/20 = 13$ років.

Але слід визначити, що ми враховували тільки циклічну деградацію акумуляторних батарей. Існує також календарна деградація, яка є функцією часу, температури та стану заряду SOC і виникає навіть тоді, коли акумулятор не знаходиться у процесі експлуатації.

Таким чином, згідно наведеної концепції можна провести прогностичні оцінки тривалості життя акумуляторної батареї електромобіля на основі даних раннього періоду експлуатації. Такі дослідження мають вирішальне значення для просування технологій акумуляторів, покращення їх ефективності та умов експлуатації. Також такі дослідження будуть актуальними та корисними при оптимізації політики швидкої зарядки та забезпечення надійного страхового ринку для акумуляторів.

Таким чином, існуюча концепція точки вигину або «початку коліна» додатково уточняється новим підходом, який визначає точку, в якій акумуляторна батарея демонструє перші ознаки переходу до фази прискореної деградації. Така точка має назву точка викривлення. Визначення точки викривлення дає більш раннє попередження, ніж точка вигину («точка коліна»), після якої починається швидка деградація акумуляторів. Це веде до більш ефективного прогнозованого технічного обслуговування, оскільки здатність передбачити виникнення швидкої деградації акумуляторної батареї дає кінцевому користувачеві достатньо часу для планування заміни до того, як акумулятор перестане відповідати вимогам потрібної ємності та ефективності.

Запропонована прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних

батарей електромобілів, яка прогнозує визначення точки викривлення та точки вигину, які, як показано, забезпечують послідовні та візуально точні результати прогнозування. Крім того, розроблена прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей працює навіть у сценаріях, коли інші відомі методики не працюють.

Методи підвищення терміну служби акумуляторних батарей електромобілів

Власники електромобілів можуть застосувати кілька стратегій, щоб пролонгувати термін служби акумуляторної батареї. До них відносяться паркування в затінених місцях або середовищах з контрольованою температурою, підтримка оптимального діапазону зарядки (від 20 % до 80 %), запровадження плавного еко-водіння, тощо.

Для підвищення терміну служби акумуляторних батарей необхідно обмежувати струм та температуру їх зарядки. Існують певні обмеження температури заряджання для літій-іонних акумуляторів. Вони чудово працюють під час заряджання за нижчих температур, а також активують систему «швидкої зарядки» акумулятора. Діапазон температур для цього має бути від 5 °C до 25 °C, оскільки це вважається найкращим температурним діапазоном для заряджання. Низька температура також негативно впливає на ефективність та термін служби літій-іонних акумуляторів. Коли температура знижується нижче 0 °C, струм заряду слід значно зменшити, але зарядка можлива. Коли відбувається зарядка при низькій температурі, невелике підвищення температури є вигідним, оскільки відбувається нагрів за рахунок струму, що протікає через внутрішній опір акумулятора.

Термін служби літій-іонного акумулятора має певну кореляцію з глибиною розряду батареї (від англ. Depth Of Discharge, DOD), яка вказує на відсоток розряду батареї відносно загальної ємності батареї. У дослідженні [25] наведено що, якщо DOD акумулятора типу NMC змінюється з 20 % до 80 %, відсоток погіршення стану працездатності батареї збільшуватиметься на 0,014 % у кожному циклі. Результати таких досліджень співпадають з розробленою прогностичною моделлю деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, в якій визначено, що на кожному циклі заряду/розряду акумулятор

втрачає в середньому за весь життєвий цикл 0,01538 % своєї ємності.

Отже, щоб зберегти гарантований термін служби літій-іонної акумуляторної батареї, виробники електричних транспортних засобів зазвичай обмежують діапазон стану заряду нової літій-іонної акумуляторної батареї його середньою областю, як це показано на рис.2. Якщо використовувати частковий діапазон при заряді та розряді акумуляторної батареї електромобіля протягом усього терміну служби, тоді точка вигину буде пролонгована у часі та сам перегін буде більш плавний. Порівняно з повним діапазоном напруги, частковий діапазон напруги також легше отримати під час щоденного використання електромобіля та регулярного циклу заряду.

Висновки

Розроблена прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей та розглянути методи підвищення терміну служби акумуляторних батарей електромобілів дозволяють підвищити безпеку, екологічність та економічність електричних транспортних засобів за рахунок визначення стану працездатності та прогнозованого остаточного ресурсу літій-іонних акумуляторних батарей та продовження терміну їх життєвого циклу за рахунок раціонального використання електромобіля.

Прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів допомагає визначити залишковий ресурс акумуляторної батареї та передбачає її термін служби, що є важливою проблемою як для власників електромобілів (як нових та тих, що були в експлуатації), так і виробників електричних транспортних засобів (для формування гарантійних зобов'язань та стратегій експлуатації акумуляторних батарей).

Особливістю розробленої прогностичної моделі деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів є те, що визначення життєвого циклу батарей відбувається за рахунок використання даних з перших циклів заряд/розряд (від 200 до 250), на яких відбувається ще незначна деградація. Але таких даних буде достатньо, щоб ідентифікувати спочатку точку викривлення, визначити точку вигину та потім встановити повний термін служби акумуляторної батареї електромобіля, який обмежений 80 % корисної ємності. Важливим аспектом концепції

прогнозування стану деградації ємності акумуляторної батареї є те, що аналіз даних у поєднанні з результатами цього дослідження демонструє практично лінійний зв'язок між життєвим циклом, точкою вигину та точкою викривлення.

Подяка

Ця робота проводилась у рамках науково-дослідної роботи «Розробка енергоефективних та високоманеврених багатовісних автомобілів подвійного призначення для Збройних Сил України», державний реєстраційний номер: 0123U101766, що фінансується Міністерством освіти і науки України.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

- Masias, A., Marcicki, J., & Paxton, W. A. (2021). Opportunities and Challenges of Lithium Ion Batteries in Automotive Applications. *ACS Energy Letters*, 6(2), 621–630. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.0c02584>
- Zeng, X., Li, M., Abd El-Hady, D., Alshitari, W., Al-Bogami, A. S., Lu, J., & Amine, K. (2019). Commercialization of Lithium Battery Technologies for Electric Vehicles. *Advanced Energy Materials*, 9(27), 1900161. <https://doi.org/10.1002/aenm.201900161>
- Wang, G., Lu, Z., Li, Y., Li, L., Ji, H., Feteira, A., Zhou, D., Wang, D., Zhang, S., & Reaney, I. M. (2021). Electroceramics for High-Energy Density Capacitors: Current Status and Future Perspectives. *Chemical Reviews*, 121(10), 6124–6172. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01264>
- Lai, T., Zhao, H., Song, Y., Wang, L., Wang, Y., & He, X. (2024). Mechanism and Control Strategies of Lithium-Ion Battery Safety: A Review. *Small Methods*. <https://doi.org/10.1002/smt.202400029>
- Chombo, P. V., & Laoonual, Y. (2020). A review of safety strategies of a Li-ion battery. *Journal of Power Sources*, 478, 228649. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228649>
- Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., & Huang, X. (2020). A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. *Fire Technology*, 56(4), 1361–1410. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>
- Chen, K., Li, Y., & Zhan, H. (2022). Advanced separators for lithium-ion batteries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1011(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1011/1/012009>
- Sadar, A., Mohammad, N., Amir, M., & Haque, A. (2024). An Experimental Study on Lithium-ion Electric Vehicles Battery Packs Behavior Under Extreme Conditions for Prevention of Thermal Runaway. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.09.019>
- Chavan, S., Venkateswarlu, B., Salman, M., Liu, J., Pawar, P., Joo, S. W., Choi, G. S., & Kim, S. C. (2024). Thermal management strategies for lithium-ion batteries in electric vehicles: Fundamentals, recent advances, thermal models, and cooling techniques. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 232, 125918. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125918>
- von Bülow, F., & Meisen, T. (2023). A review on methods for state of health forecasting of lithium-ion batteries applicable in real-world operational conditions. *Journal of Energy Storage*, 57, 105978. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105978>
- Liu, Z.-F., Huang, Y.-H., Zhang, S.-R., Luo, X.-F., Chen, X.-R., Lin, J.-J., Tang, Y., Guo, L., & Li, J.-X. (2025). A collaborative interaction gate-based deep learning model with optimal bandwidth adjustment strategies for lithium-ion battery capacity point-interval forecasting. *Applied Energy*, 377, 124741. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124741>
- Vásquez, F. A., Sara Gaitán, P., & Calderón, J. A. (2025). Comparative study of methodologies for SOH diagnosis and forecast of LFP and NMC lithium batteries used in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 105, 114725. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114725>
- Maleki, S., Ray, B., & Hagh, M. T. (2022). Hybrid framework for predicting and forecasting State of Health of Lithium-ion batteries in Electric Vehicles. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 30, 100603. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100603>
- von Bülow, F., Wassermann, M., & Meisen, T. (2023). State of health forecasting of Lithium-ion batteries operated in a battery electric vehicle fleet. *Journal of Energy Storage*, 72, 108271. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108271>
- Fermín-Cueto, P., McTurk, E., Allerhand, M., Medina-Lopez, E., Anjos, M. F., Sylvester, J., & dos Reis, G. (2020). Identification and machine learning prediction of knee-point and knee-onset in capacity degradation curves of lithium-ion cells. *Energy and AI*, 1, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100006>
- Diao, W., Saxena, S., Han, B., & Pecht, M. (2019). Algorithm to Determine the Knee Point on Capacity Fade Curves of Lithium-Ion Cells. *Energies*, 12(15), 2910. <https://doi.org/10.3390/en12152910>
- Fuhrmann, M., Torcheux, L., & Kobayashi, Y. (2024). Knee point prediction for lithium-ion bat-

- teries using differential voltage analysis and degree of inhomogeneity. *Journal of Power Sources*, 621, 235210. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235210>
18. IEEE Recommended practice for sizing lead-Acid batteries for stationary applications. IEEE Std 485–2010 (Revision of IEEE Std 485–1997)2011:1–90. Official edition.
 19. Satopaa, V., Albrecht, J., Irwin, D., & Raghavan, B. (2011). Finding a "Kneedle" in a Haystack: Detecting Knee Points in System Behavior. У 2011 31st International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCS Workshops). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icdcs.2011.20>
 20. Zhang, C., Wang, Y., Gao, Y., Wang, F., Mu, B., & Zhang, W. (2019). Accelerated fading recognition for lithium-ion batteries with Nickel-Cobalt-Manganese cathode using quantile regression method. *Applied Energy*, 256, 113841. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113841>
 21. How does EV battery aging affect range and performance? (2023). EV Engineering & Infrastructure. <https://www.evengineeringonline.com/how-does-ev-battery-aging-affect-range-and-performance>
 22. Смирнов, О., & Борисенко, А. (2023). Порівняльний аналіз електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (24), 50–61. <https://doi.org/10.30977/veit.2023.24.0.5>
 - Smyrnov, O., & Borysenko, A. (2023). Porivnialnyi analiz elektrychnykh modelei litii-ionnykh akumulatornykh batarei elektromobiliv [Comparative analysis of electric models of lithium-ion batteries for electric vehicles]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, (24), 50–61. <https://doi.org/10.30977/veit.2023.24.0.5> [in Ukrainian]
 23. Severson, K. A., Attia, P. M., Jin, N., Perkins, N., Jiang, B., Yang, Z., Chen, M. H., Aykol, M., Herring, P. K., Fraggadakis, D., Bazant, M. Z., Harris, S. J., Chueh, W. C., & Braatz, R. D. (2019). Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation. *Nature Energy*, 4(5), 383–391. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0356-8>
 24. Experimental Data Platform. data.matr.io. URL: <https://data.matr.io/1/>
 25. Wang, Y., Zhou, Z., Botterud, A., Zhang, K., & Ding, Q. (2016). Stochastic coordinated operation of wind and battery energy storage system considering battery degradation. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 4(4), 581–592. <https://doi.org/10.1007/s40565-016-0238-z>

Смирнов Олег Петрович¹, д.т.н., професор кафедри автомобільної електроніки, e-mail: smirnov1oleg@gmail.com, тел. +38 068-609-94-58, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-9042>

Борисенко Анна Олегівна¹, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільної електроніки, e-mail: anutochka2111@gmail.com, тел. +38 096-110-69-49, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Development of a predictive model for the degradation of the capacity of lithium-ion batteries in electric vehicles

Abstract. Problem. The article is devoted to the problem of determining the residual life of lithium-ion rechargeable batteries at the early stage of operation of electric vehicles using a new model of capacity degradation. The analysis of the performance and degradation of lithium-ion batteries is carried out and the factors of their degradation are studied. A predictive model of the degradation of the capacity of lithium-ion batteries in electric vehicles has been developed, which determines the remaining useful life of the battery and predicts its life cycle using data only from early charge/discharge cycles, during which significantly less degradation occurs. Methods for increasing the service life of electric vehicle batteries are given. **Goal.** The aim of the work is to improve the safety, environmental friendliness and efficiency of electric vehicles by determining the predicted final resource of lithium-ion batteries using a new predictive model of capacity degradation. **Methodology.** Methods of scientific analysis and synthesis of increasing the service life of batteries. A predictive model of capacity degradation of lithium-ion batteries of electric vehicles determines the remaining useful life of the battery and predicts its life cycle. **The results.** Based on the analysis of publications and studies, a predictive model of capacity degradation of lithium-ion batteries was developed. As a result, the final resource of lithium-ion batteries is predicted. An important aspect of the concept of predicting the state of degradation of the battery capacity is that the data analysis in combination with the results of this study demonstrates a virtually linear relationship between the life cycle, inflection point and curvature point. Methods for increasing the service life of batteries of electric vehicles and prolonging their life cycle through the rational use of an electric vehicle are considered. The results of the research coincide with the developed predictive model of lithium-ion battery capacity degradation, which determines that at each charge/discharge cycle, the electric vehicle battery loses an average of 0.015 % of its capacity over the entire life cycle. The considered methods for increasing the battery life, which allows increasing the number of charge/discharge cycles and the life cycle due to the rational use of the electric vehicle. **Originality.** The peculiarity of the developed predictive model of lithium-ion battery capacity

degradation in electric vehicles is that the battery life cycle is determined by using data from the first charge/discharge cycles (from 200 to 250), where minor degradation still occurs. But such data will be sufficient to identify the distortion point, then the inflection point and then determine the full service life of the electric vehicle battery, which is limited to 80% of the useful capacity. **Practical value.** A predictive model for the capacity degradation of lithium-ion batteries in electric vehicles determines the remaining useful life of the battery and predicts its service life, which is an important issue for both electric vehicle owners (both new and used) and electric vehicle manufacturers (for the formation of warranty obligations and battery operation strategies).

Key words: battery, degradation, electric vehicle, forecasting, predictive model, state of health, charge/discharge cycle, service life

Smyrnov Oleh¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 068-60-99-458, e-mail: smirnov1oleg@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-9042>

Borysenko Anna¹, Ph.D., Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department, tel. +38 096-11-06-949, e-mail: anutochka2111@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Шляхи вдосконалення автомобільного шасі засобу аеродромно-технічного забезпечення польотів встановленням гібридного силового агрегата

Рогозін І. В.¹, Новічонок С. М.¹, Нечаус А. О.², Ісаєв А. С.³

¹Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

³ТОВ "ЕПАМ ДІДЖИТАЛ"

Анотація. У статті запропоновані шляхи вдосконалення автомобільного шасі засобу аеродромно-технічного забезпечення польотів встановленням гібридного силового агрегата. Проведено аналіз існуючих конструкцій військових автомобілів з гібридним силовим агрегатом, а також здійснено теоретичне обґрунтування варіанта модернізації автомобільного шасі засобу аеродромно-технічного забезпечення польотів встановленням гібридного силового агрегату за умовою забезпечення електричною енергією роботи власного спеціального обладнання та обладнання аеродрому. Використання наданого варіанта автомобільного шасі засобу аеродромно-технічного забезпечення польотів з гібридним силовим агрегатом надає можливість у подальшому розробити комплекти для модернізації будь-яких автомобілів до рівня PHEV під час проведення капітального або середнього ремонту.

Ключові слова: автомобільне шасі, гібридний силовий агрегат, джерело електроенергії, електромотор-генератор, засіб аеродромно-технічного забезпечення польотів, накопичувач електроенергії.

Вступ

Досвід відсічі збройної агресії Російської Федерації та сучасних збройних конфліктів свідчить про важливість аеродромно-технічного забезпечення польотів авіації. Сучасна війна Російської Федерації проти України проілюструвала розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА), переважно FPV (розвідники, "камікадзе" та ін.) а також інших зразків високоточної зброї, які спроможні з відносно невисокими витратами знищувати або пошкоджувати ОБТ, у тому числі засоби аеродромно-технічного забезпечення польотів (ЗАТЗП) та їх автомобільні шасі (АШ). Це викликає необхідність їх швидкого пересування під час ведення бойових дій [1–4].

Характер сучасних бойових дій, що постійно змінюється може викликати потребу у збільшенні кількості та напруженості операцій з забезпечення польотів авіації. Для надійного

забезпечення виконання завдання за призначенням АШ ЗАТЗП виникає потреба у:

- зменшенні часу на виконання операцій з забезпечення бойових дій (пересування особового складу та вантажів, виконання спеціальних операцій тощо);
- збільшенні швидкості руху АШ для зменшення вірогідності потрапляння під удар високоточної зброї;
- розосередженні та маскуванні;
- збільшенні виробничих можливостей ЗАТЗП;
- можливості постійного забезпеченні електроенергією встановленої якості:
 - а) в умовах відсутності або руйнування промислової електромережі;
 - б) додаткових систем (зв'язку, систем що перешкоджають роботі БПЛА або знищують їх, тощо);
 - в) потужного електричного обладнання, яке потрібне для проведення робіт з забезпе-

чення польотів авіації [1–5].

Одним, з шляхів вирішення цієї задачі може бути створення або модернізація під час капітального ремонту ЗАТЗП встановленням у трансмісії АШ електричної машини (мотор-генератора), яка під час руху забезпечить швидке пересування, а під час стоянки може бути застосована у якості джерела автономного електроживлення спеціального обладнання цих засобів [5–25].

Таким чином виникає потреба у вдосконаленні та розвитку ЗАТЗП та їх АШ.

Аналіз публікацій

Амос С. Фок у роботах [6, 7], проаналізував досвід минулих війн та сучасну війну Російської Федерації проти України відзначив, що воєнна логістика має враховувати виклики майбутніх війн та передбачати застосування:

- ворогом різноманітних далекобійних високоточних засобів ураження, у тому числі БпЛА всіх видів;

- засобів захисту, яких зазвичай немає в тактичних формуваннях, включаючи різноманітні кіберсистеми, засоби протиповітряної оборони та засоби введення в оману.

Все це робить майже неможливим здійснювати будь-які дії приховано, потребує у майбутніх війнах додаткового захисту, маскування та прикриття під час рух до місця застосування сил логістики. Він пропонує узагальнені підходи до вирішення проблем ураження логістичних шляхів та вважає реальною загрозою ураження ОВТ, які переважно орієнтовані на невідновлюване паливо, у тому числі пропозицій з розробки альтернативного відновлюваного палива для військової техніки та відновлюваних і перезаряджуваних джерел енергії [6–8].

На військовому форумі “Sustaining the Army of 2040” [8] командувачем матеріально-технічного управління армії США генералом Чарльз Гамільтоном було підкреслено, що для забезпечення майбутньої готовності армії до відсічі сучасних та перспективних загроз потребується вирішення підприємствами обов’язкових завдань, серед яких є «електрифікація платформ і використання альтернативних джерел палива».

В роботі [11] проведено теоретичне обґрунтування способу розрахунку параметрів гібридного силового агрегату для спеціалізованих автотранспортних засобів за умовою забезпечення роботи спеціального обладнан-

ня елементами автомобільного шасі. Проте у вказаній роботі не розглядається побудова структурної схеми та специфіка використання АШ ЗАТЗП.

В роботах [5, 9, 10] відмічається проблема, що виникають при організації «пасивного» захисту автономних джерел систем електрозабезпечення військових об’єктів від ураження високоточною зброєю через їх стаціонарне розташування та значні площі маскування об’єктів. В [5] запропонована та обґрунтована потенційна доцільність напрямку сумісного розвитку військових транспортних засобів та пересувних джерел електричної енергії, який полягає у застосуванні та розвитку конструкції гібридних силових агрегатів автомобільних шасі. Розглянути питання застосування автомобільних шасі з гібридними силовими агрегатами, які мають властивості пересувних джерел електричної енергії. Але у вказаній роботі не враховується специфіка роботи ЗАТЗП.

Відомо [12, 18], що засоби аеродромно-технічного забезпечення польотів включають до себе складові, які наведені на рис. 1.

Серед вказаних засобів є ті, що забезпечують електроенергією виконання робіт з аеродромно-технічного забезпечення польотів. До них відноситься електрогазова техніка засобів аеродромно-технічного обслуговування, а саме аеродромні пересувні електроагрегати (АПА) АПА-50, АПА-80, АПА-100 [18], які є на озброєнні Повітряних Сил ЗС України та які доцільно у першу чергу модернізувати встановленням гібридних силових агрегатів в їх АШ.

Аналіз останніх публікацій показав, що в них відсутні рекомендації щодо подолання протиріччя, зазначеного при постановці проблеми, а саме вибору функціональної схеми та визначення основних властивостей перспективного АШ з гібридним силовим агрегатом ЗАТЗП.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є розробка раціональної функціональної схеми та визначення основних властивостей перспективного автомобільного шасі з гібридним силовим агрегатом засобу аеродромно-технічного забезпечення польотів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- аналіз існуючих конструкцій військо-

вих автомобілів з гібридним силовим агрегатом та вибір раціональної;

- розробка функціонної схеми перспективного АШ ЗАТЗП з гібридним силовим агрегатом;

гатором;

- визначення основних параметрів гібридного силового агрегату перспективного АШ ЗАТЗП.



Рис. 1. Склад засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів (розроблено авторами за даними [12]).

Аналіз існуючих конструкцій військових автомобілів з гібридним силовим агрегатом

Конструкції сучасних АШ ОБТ постійно вдосконалюється. В силових агрегатах сучасних АШ переважно застосовуються двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). Проте останнім часом набуває поширення застосування електричних та гібридних (як правило ДВЗ та електричний) двигунів. На увагу заслуговує те, що застосування саме АШ з гібридним силовим агрегатом поєднує в собі дві основних якості, які набувають великого значення в сучасній війні – висока мобільність та можливість виробітку електричної енергії [13–17].

Пріоритетним напрямком формування парку автомобільної техніки армій провідних країн світу є створення нових та широке застосування існуючих АШ цивільного призначення з додатковою доробкою. Так, наприклад, в армії США у якості АШ широко використовуються новітні уніфіковані сімейства повнопривідних багатоцільових автомобілів виробництва компанії Oshkosh Defense. За загальною класифікацією, яка надана на

рис. 2, їх можна поділити на чотири основні групи [13–15]:

- 1) легкі тактичні транспортні засоби (Light Tactical Vehicles (LTV)) – JLTV, L-ATV, S-ATV, eJLTV;
- 2) середні тактичні транспортні засоби (Medium Tactical Vehicles (MTV)) – FMTV, FMTV A2, MTVR;
- 3) важкі тактичні транспортні засоби (Heavy Tactical Vehicles) – HEMTT, HET, LVSR, PLS, Wheeled Tanker;
- 4) перспективні бойові транспортні засоби (Combat Vehicles) – безпілотна роботизована бойова машина (Robotic Combat Vehicle (RCV)) Oshkosh.

Компанією Oshkosh Defense виробляються АШ, які мають мінно-стійкий захист від засідки (Mine-Resistant Ambush Protected (MRAP)) та побудовані на базі наведених вище автомобілів. Залежно від призначення АШ мають капотне або безкапотне компонування.

Одним з перспективних напрямів, що розвивають сучасні автовиробники є розробка та застосування електричних та гібридно-електричних транспортних засобів (Hybrid

Electric Vehicle (HEV)), а також безпілотних (роботизованих) АШ. Слід відзначити, що практично у кожній з груп АШ, що виробля-

ються компанією Oshkosh Defense для збройних сил є моделі HEV, які на рис. 2 позначені пунктиром [13–15].

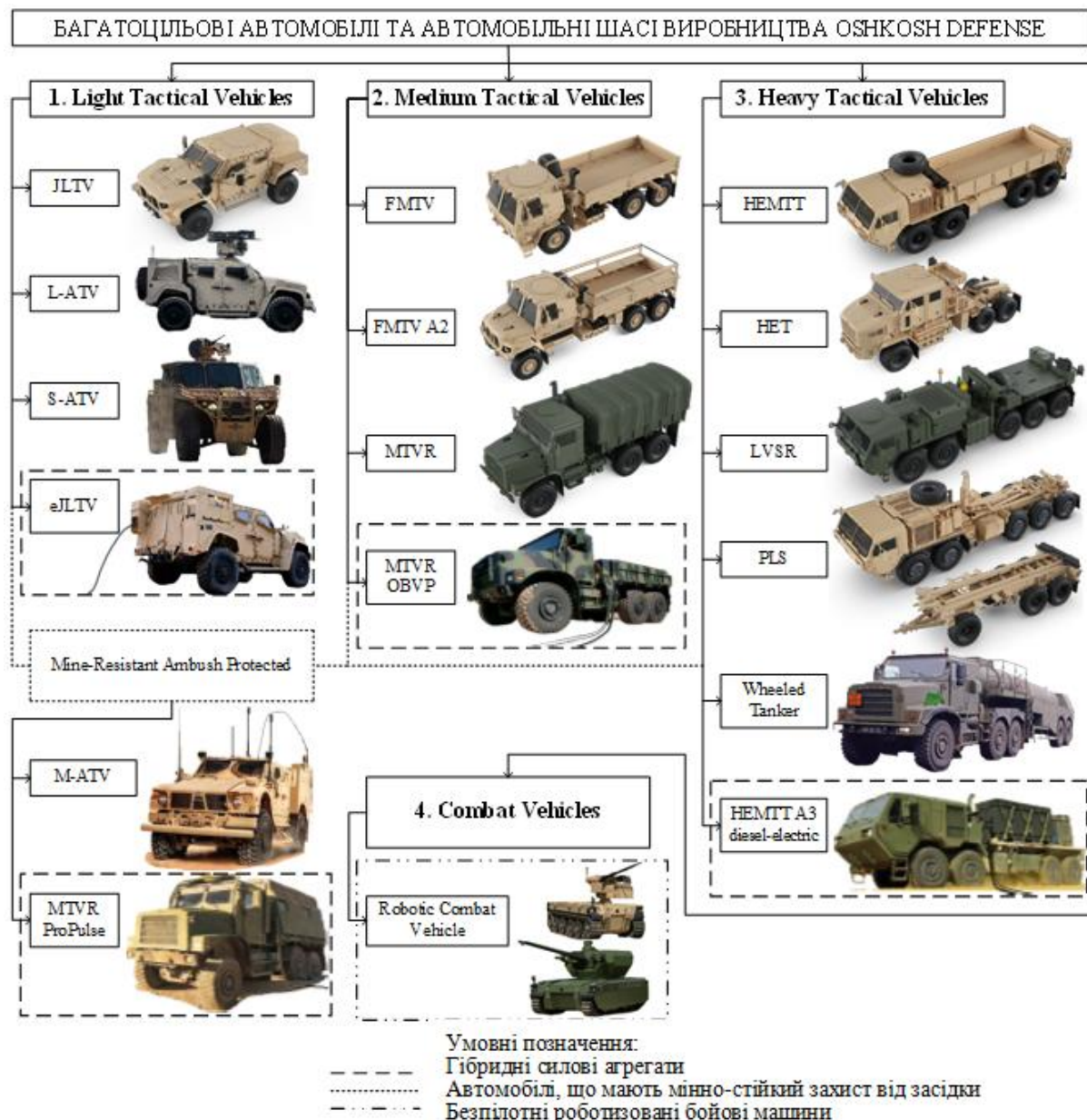


Рис. 2. Загальна класифікація військових КТЗ виробництва компанії Oshkosh Defense (США) (розроблено авторами за даними [13–15])

Проведені у різні періоди часу дослідження [5–8, 11, 13–19] вказують, що автомобілі з гібридним електричним силовим агрегатом мають покращену паливну економічність у порівнянні зі «звичайним» силовим агрегатом тобто з ДВЗ.

На рис. 3 надані функціональні схеми гібридного силового агрегату двовісних транс-

портних засобів HUMVEE Hybrid Electric Drive (HED), що досліджувалися на початку 2000-х років [19].

За даними [19] на рис. 4 побудовано гістограму відносного покращення (збільшення) у % деяких технічних характеристик АШ з гібридним силовим агрегатом відносно серійних.

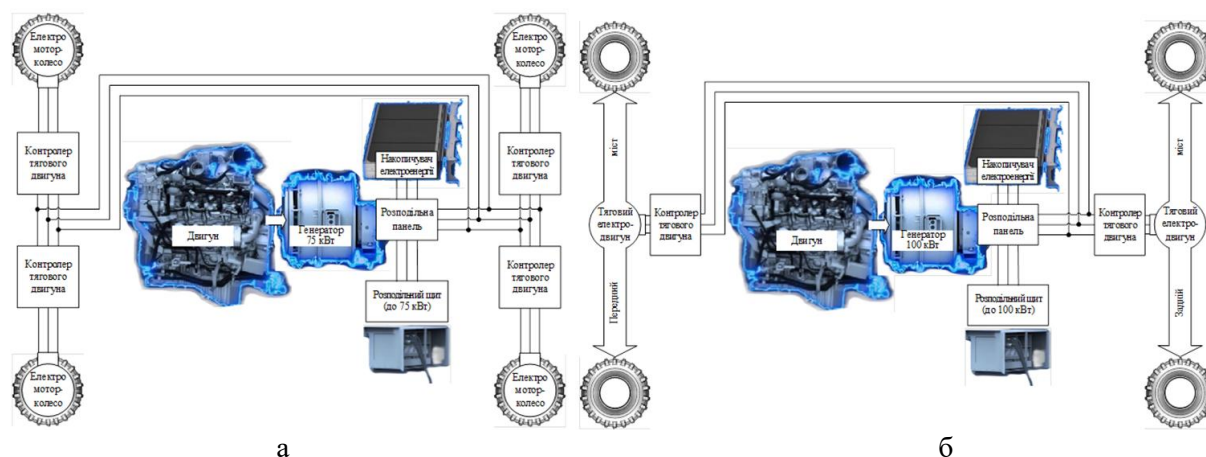


Рис. 3. Функціональні схеми гібридного силового агрегату двовісних АШ HUMVEE HED: а – з приводом на електромотор-колеса; б – з «осьовим» приводом (розроблено авторами за даними [19])

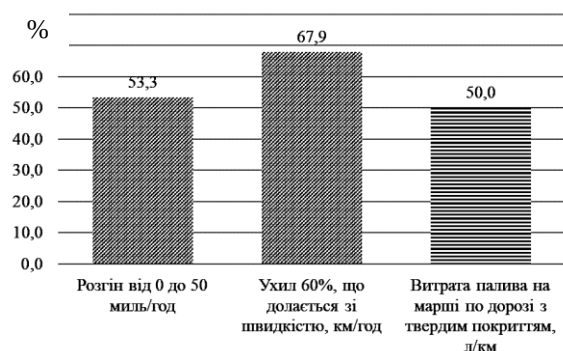


Рис. 4. Гістограма відносного покращення технічних характеристик АШ з гібридним силовим агрегатом (розроблено авторами за даними [19])

За підсумками досліджень [19] було відзначено, що під час виконання завдань за призначенням найбільший генератор, який зазвичай буксирують HUMVEE до 15 кВт (причіпна електростанція МЕР-804А масою до 2 т) [5]. Натомість HUMVEE HED, залежно від обраної конструкції, може постійно виробляти під час роботи на місці не менше 75 кВт електроенергії виконуючі функцію мобільного електричного генератора виключаючи потребу у застосуванні причіпної електростанції. Це, у свою чергу, дозволяє зменшити витрати палива та збільшити швидкість руху та прохідність [5]. Однією з пропозицій за підсумком випробувань було, після вдосконалення, використовувати запропоновані складові гібридного силового агрегату HED як «змінний комплект» для стандартного HUMVEE для можливості модернізації легких тактичних транспортних засобів [19].

До того, крім визначених на гістограмі

(рис. 4) переваг, було встановлено, що під час стоянки кожний з HUMVEE HED, що випробувались мав можливість постачати електроенергію зовнішнім споживачам:

- від накопичувачів електроенергії – акумуляторних батарей (АКБ) до 10 кВт;
- від генератора, при працюючому двигуні до 75 кВт (максимально припустиме до 250 кВт) [19].

На теперішній час застосовують різні варіанти АШ ОБТ з гібридними силовими агрегатами. Для розробки раціональної функціональної схеми перспективного АШ ЗАТЗП з гібридним силовим агрегатом розглянемо основні з них.

Схема гібридного силового агрегату з послідовним перетворенням енергії (рис. 5) застосована у важкому багатовісному автомобілі НЕМТТ А3 diesel-electric (колісна формула 8х8).

Дизельний двигун не має механічного зв'язку з колесами, а натомість приводить до руху великий електричний генератор, який, у свою чергу, забезпечує живлення електроенергію модуля кожної осі транспортного засобу та забезпечує накопичення запасу електроенергії. Кожний з чотирьох модулів осей транспортного засобу має перетворювач енергії та електродвигун, що приводить до руху колеса визначеної осі, а під час гальмування працює у режимі генератора [3, 11, 15].

Слід відзначити, що гібридний силовий агрегат послідовної схеми автомобілів НЕМТТ А3 diesel-electric (рис. 5), HUMVEE HED (рис. 3) тощо, забезпечує наступні режими руху АШ:

- тяговими електродвигунами, що живляться від генератора, якій приводиться в дію ДВЗ – рух у режимі часткових навантажень, сталого навантаження на постійній швидкості, тощо;
- тяговими електродвигунами, що живляться від генератора, якій приводиться в дію ДВЗ та від накопичувачів електроенергії

(НЕС) – рух з великими навантаженнями, під час руху угору, прискорення, тощо;

- тяговими електродвигунами, що живляться від НЕС – рух з місця та на малій швидкості у режимі економії палива, рух у «тихому» режимі під час прихованого переміщення тощо [3, 11, 15, 19].

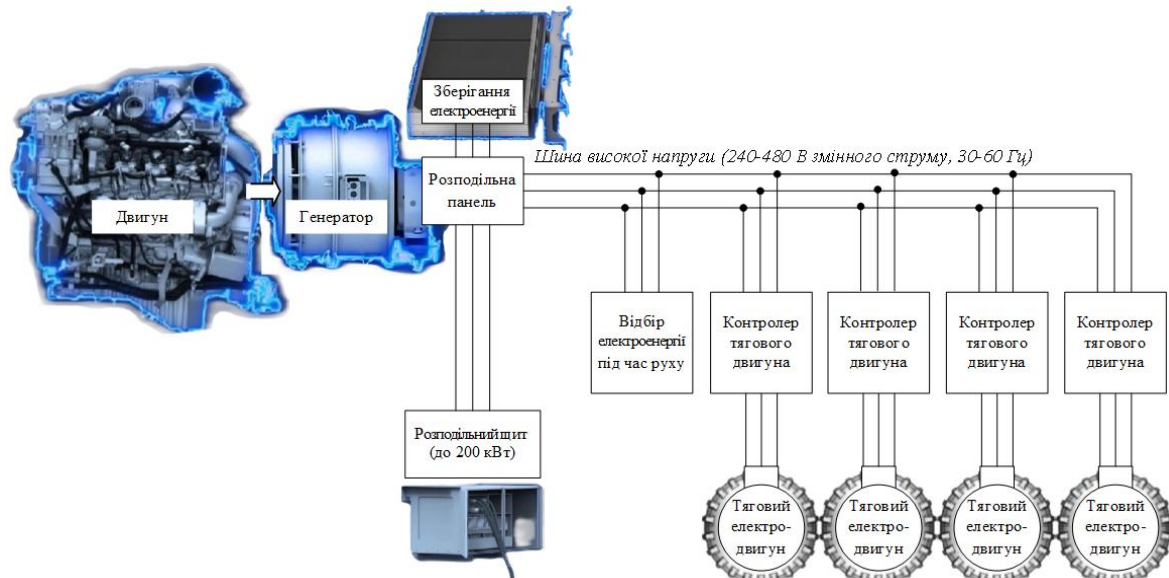


Рис. 5. Функціональна схема гібридного силового агрегату чотирьохвісних АШ (HEMTT A3 diesel-electric) (розроблено авторами за даними [15])

Гібридний силовий агрегат MTRV OBVP (колісна формула 6х6) виконаний по схемі з послідовно-паралельним перетворенням енергії (так званий гібридний синергетичний при-

від Hybrid Synergy Drive (HSD)) з подвійним потоком потужності, що може працювати у декількох режимах (рис. 6) [3, 13, 21–24].

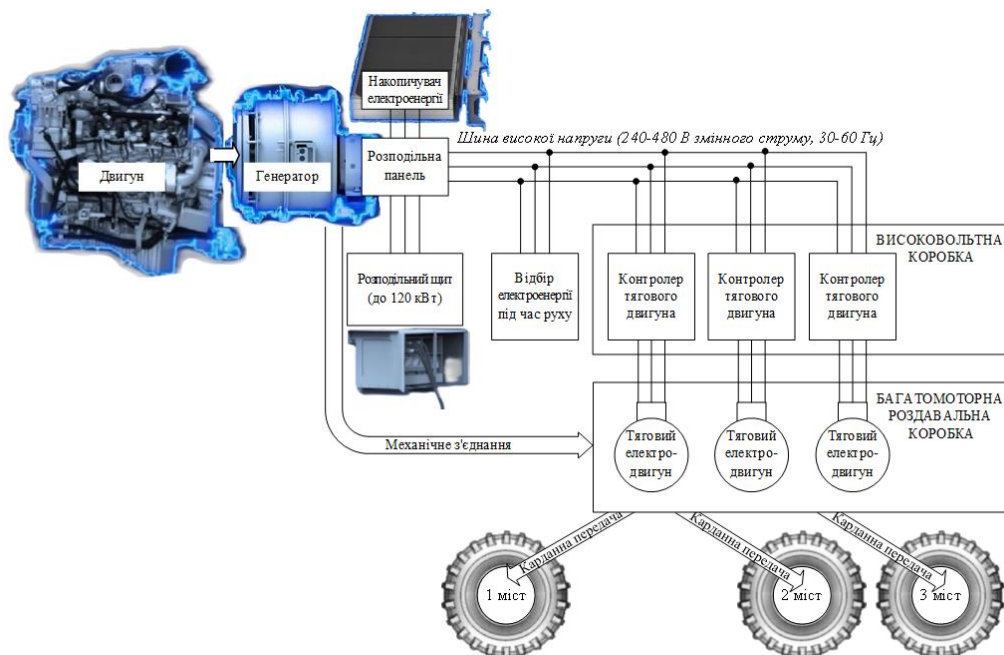


Рис. 6. Функціональна схема гібридного силового агрегату трьохвісних АШ (MTRV OBVP) (розроблено авторами за даними [13])

На відміну від розглянутого вище НЕМТТ АЗ diesel-electric, гібридний силовий агрегат MTVR OBVP зберігає механічний зв'язок від двигуна до коліс та, залежно від режиму руху, доповнює його електроенергією.

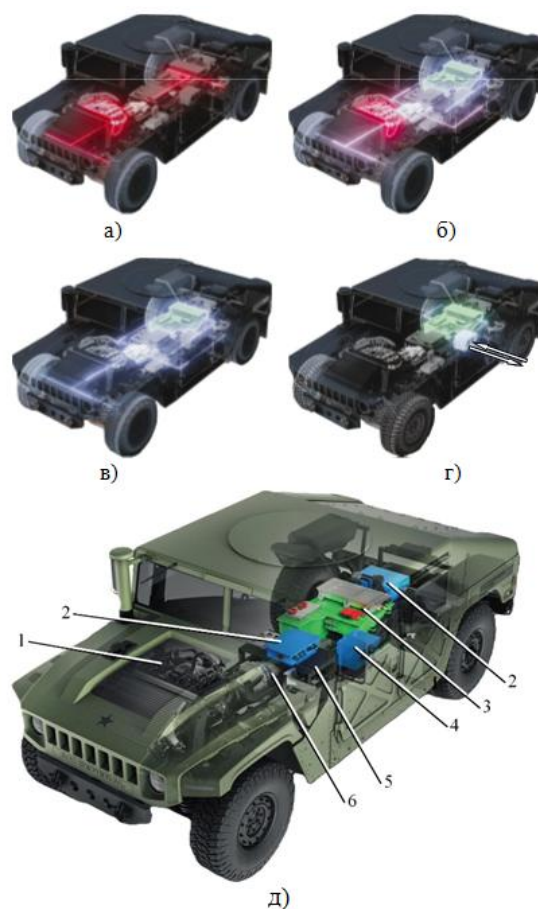
Трансмісія MTVR OBVP, крім генератора, має так звану багатомоторну роздавальну коробку (Multi-Motor Transfer Case) [13].

До багатомоторної роздавальної коробки крутний момент може підводиться механічним шляхом від двигуна транспортного засобу через генератор. Крім того, рух транспортного засобу може забезпечуватися трьома тяговими електродвигунами, які приєднані до багатомоторної роздавальної коробки. Залежно від режиму руху, тягові електродвигуни отримують електроенергію від генератора або від НЕЕ. Від багатомоторної роздавальної коробки крутний момент підводиться до коліс транспортного засобу складовими, що застосовані у MTVR зі «звичайним» силовим агрегатом [13].

Потужність до виходу з цього гібридного силового агрегату підводиться за двома потоками. Основна частина цього потоку потужності йде механічним шляхом, інша частина – електричним. Багатомоторна роздавальна коробка поєднує потік потужності який віддає ДВЗ. Відомо, що ДВЗ, порівняно з електродвигунами, має мінімальний крутний момент на низьких обертах колінчастого валу двигуна. Тому, для забезпечення прискорення транспортного засобу при зрушенні з місця, подолання важких ділянок доріг, тощо, до потужності ДВЗ додається потужність тягових електродвигунів багатомоторної роздавальної коробки [3, 13].

Подібні розглянутій вище послідовно-паралельної схеми гібридного силового агрегату застосовані у сучасних легких військових транспортних засобах таких як eJLTV (Oshkosh Defense) [14], eISV (GM Defense LLC) [6, 8] та HUMVEE Charge (AM General LLC) [16]. Проте вони мають деякі особливості, а саме, це так звані гібридні електромобілі, що підключається (plug-in hybrid electric vehicle (PHEV)) [14, 16, 21–24]. Крім наданих вище властивостей, ці транспортні засоби PHEV мають можливість, заряджати власний НЕЕ від зовнішнього джерела та певний час рухатися лише з його використанням.

Найбільш сучасною та досконалою є конструкція гібридного силового агрегату автомобіля HUMVEE Charge PHEV, яка наведена на рис. 7 [16].



1 – двигун транспортного засобу; 2 – перетворювачі напруги; 3 – НЕЕ; 4 – розподільний щит; 5 – роздавальна коробка; 6 – електромотор-генератор з коробкою перемикачів передач

Рис. 7. Двовісне АШ (HUMVEE Charge PHEV) з гібридним силовим агрегатом: а – рух з приводом від ДВЗ; б – рух з приводом від ДВЗ та від електромотор-генератора; в – рух з приводом від електромотор-генератора, що живиться від НЕЕ; г – стоянка на місці (забезпечення електроенергією); д – розташування складових гібридного силового агрегату (розроблено авторами за даними [16])

У ньому, на відміну від машин з «звичайним» силовим агрегатом, встановлені: коробка переключення передач, яка передбачає у своєму складі електромотор-генератор 6 з електромагнітною муфтою та додатково: перетворювачі напруги 2, накопичувачі електроенергії 3, розподільний щиток 4 та елементи електронного керування (блок керування, перемикачі, тощо) роботою гібридного силового агрегату. Інші елементи транспортного засобу (двигун, розподільна коробка, кардана, передача, мости, тощо) залишаються незмінними, як на HUMVEE зі «звичайним»

силовим агрегатом. У якості НЕЕ застосовується літій-іонні АКБ. Електромагнітна муфта за командою електронного керування, відповідно до режиму роботи, вмикає-вимикає електромотор-генератор. Це забезпечує у ввімкненому положенні муфти роботу електромотор-генератора як генератора або електродвигуна. У вимкненому положенні електромагнітної муфти генератор не працює – крутний момент силового агрегату проходить крізь нього.

До того ж АШ HUMVEE Charge PHEV під час руху дозволяє рекуперувати до НЕЕ не тільки енергію гальмування автомобіля, а також енергію руху підвіски [16, 21].

Гібридний силовий агрегат з паралельною двохпотоковою схемою передачі потужності автомобілів HUMVEE Charge, eJLTV, eISV, MTRV OBVP, тощо, забезпечує наступні режими руху:

– ДВЗ – рух у режимі часткових навантажень, сталого навантаження на постійній швидкості, тощо (рис. 7, а);

– ДВЗ та тяговим електродвигуном (електродвигунами), що живиться від генератора та від НЕЕ – рух з великими навантаженнями, під час руху вгору, прискорення, тощо (рис. 7, б);

– тяговим електродвигуном (електродвигунами), що живиться від НЕЕ – рух з місця та на малій швидкості, у режимі економії палива, рух у «тихому» режимі під час прихованого переміщення, тощо (рис. 7, в) [13, 14, 16, 21, 23].

Крім визначених режимів руху, надана схема силового агрегату HUMVEE Charge (та інших сучасних PHEV) дозволяє під час стоянки на місці бути джерелом електроенергії (рис. 7, г) за рахунок:

– НЕЕ (АКБ) ємністю 30 кВт/год;

– електромотор-генератора, що має потужність до 30 кВт (208 В змінного струму) при працюючому ДВЗ.

За потребою, НЕЕ HUMVEE Charge може бути заряджений від зовнішніх джерел (у тому числі й від власного мотор-генератора) електроенергії з використанням зарядного пристрою з трьома різними параметрами заряду.

Враховуючи наведене, на теперішній час, застосування накопичувачів електроенергії (АКБ, суперконденсаторів, тощо) та електричних машин типу електромотор-генераторів у АШ ЗАТЗП з гібридним силовим агрегатом типу PHEV дозволяє виконувати завдання за призначенням та одночасно забезпечити переваги, які наведено у таблиці 1 [3, 5, 11, 19, 22, 23].

Таблиця 1. Можливі переваги АШ ЗАТЗП з гібридним силовим агрегатом типу PHEV

№	Переваги	Пояснення
1	2	3
1.	Можливість простого рішення для забезпечення тривалості руху АШ	Підвищенням ємності (кількості) НЕЕ
2.	Забезпечення тривалої роботи додаткових систем АШ (зв'язку, систем що перешкоджають роботі БПЛА або знищують їх, тощо)	Під час руху АШ та на стоянці
3.	Можливість заряду та дозаряду НЕЕ АШ	1. Під час руху АШ через рекуперацію енергії. 2. Електричними зарядними станціями та генераторами (у тому числі власного АШ). 3. Нетрадиційними джерелами електроенергії (сонячні панелі, вітрові електростанції, тощо)
4.	Приховане переміщення АШ: - малошумний «тихий» рух; - зменшення помітності АШ у інфрачервоному діапазоні	Рух з використанням лише електричного приводу
5.	Швидка готовність до видачі електроенергії встановленого обсягу та якості зовнішнім споживачам від НЕЕ (у тому числі у режимі джерела безперебійного живлення та резервування)	Під час руху АШ та на стоянці, незалежно від роботи двигуна АШ
6.	Можливість тривалої видачі електроенергії встановленої якості зовнішнім споживачам від електромотор-генератора АШ	Під час роботи двигуна АШ
7.	Полегшене забезпечення керування АШ	У випадку використання як безпілотного транспортного засобу

Пропозиції щодо функціональної схеми перспективного АШ ЗАТЗП з гібридним силовим агрегатом

Аналізуючи досвід останніх збройних конфліктів [1–5, 26], дослідження [8–13, 18–25], наданий вище матеріал та вимоги щодо пресування ЗАТЗП, забезпечення спеціального обладнання та обладнання аеродрому електроенергією [5, 9, 10] можна дійти до висновку, що безпосереднє застосування будь-якої з сучасних схем, наведених вище, не повною мірою дозволять використати їх потенціал для перспективного АШ ЗАТЗП. Просте «копіювання» з готових складових будь-якої з наданих схем може бути дуже коштовним. Тому, пропонується варіант функціональної схеми перспективного АШ ЗАТЗП з гібридним (дизель-електричним) силовим агрегатом типу PHEV, який дозволить модернізувати (створювати) з мінімальними витратами АШ ЗАТЗП, який має найбільшу кількість необхідних властивостей (рис. 8).

Це завдання може бути вирішено створенням нового або модернізацією (наприклад, під час капітального ремонту) АШ ЗАТЗП встановленням у його трансмісії електричної машини (мотор-генератора), яка під час руху забезпечить швидке пересування, а під час стоянки може бути застосована як джерело автономного електроживлення спеціального обладнання цього засобу [3, 10, 11, 18–24].

Для реалізації даної варіанту може бути обране АШ ЗАТЗП категорії N2G, наприклад, з колісною формулою бхб, що є на озброєнні ЗС України. Під час реалізації даного проекту з серійного автомобіля видаляються наступні елементи:

- роздавальна коробка;
- карданний вал приводу переднього моста;
- головна передача переднього моста.

В той же час, пропонується встановити в АШ інші складові, які розташовуються у визначених на функціональній схемі (рис. 8) місцях. Штриховкою на функціональній схемі позначені складові, які встановлюються, а саме:

- електромотор-генератор;
- дві електромагнітні муфти (ЕММ1, ЕММ2);
- блок керування;
- накопичувач електроенергії (АКБ);
- електромотор приводу переднього моста;
- розподільний щит;
- електричні дроти, перемикачі, тощо.

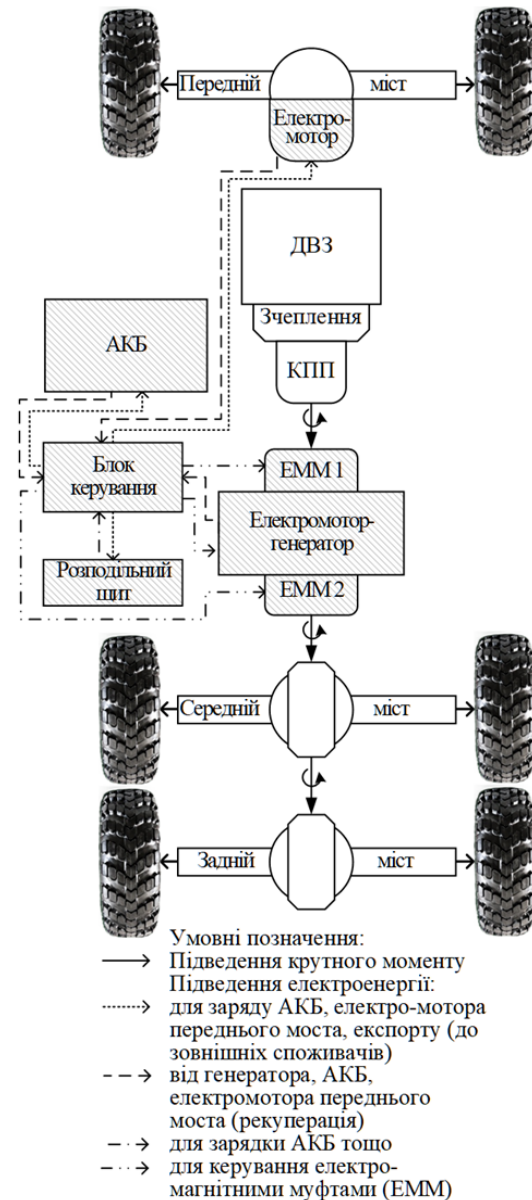


Рис. 8. Функціональна схема базового АШ з гібридним силовим агрегатом перспективного ЗАТЗП

Інші елементи модернізованого АШ з гібридним силовим агрегатом перспективного ЗАТЗП залишаються без змін. Слід звернути увагу, що у випадку модернізації АШ ЗАТЗП з бензиновим ДВЗ, для збільшення економії палива, під час виконання робіт, доцільно замінити його на дизельний [11, 14, 18].

Відповідно до схеми, яка запропонована, на місце розташування роздавальної коробки автомобіля пропонується встановити електромотор-генератор, який має в середині ротора вал, який вільно обертається, отримуючи рух від штатного карданного валу коробки перемикачів передач (КПП). Цей вал, залежно від режиму руху, може бути забло-

ваний (ввімкненням ЕММ1) або розблокований (вимкненням ЕММ1) з ротором електромотор-генератора. ЕММ2 має можливість поєднувати або роз'єднувати вал електромотор-генератора з штатним карданним валом приводів середнього та заднього моста. Блок керування виконує функції обчислення режиму роботи (швидкості руху, обертів ДВЗ, електродвигуна, залишку електроенергії у накопичувачі, тощо), координації та подачі керуючих сигналів (подачі електроживлення) на вмикання та перемикання складових гібридного силового агрегату [3, 10, 11, 19].

Реалізація наданої на рис. 8 схеми може, за рахунок виконання невеликого обсягу робіт, а саме встановленням електромотор-генератора визначеної потужності на місце роздавальної коробки (та інших складових, згідно схеми) модернізувати практично будь-

який автомобіль категорії N2G до рівня АШ ЗАТЗП з гібридним (дизель-електричним) силовим агрегатом. У той же час, надана схема потребує подальшого дослідження щодо визначення параметрів гібридного силового агрегату (електромотор-генератора, блока керування, накопичувача електроенергії, електромотора приводу переднього моста) та узгодження відповідності його характеристик з існуючим АШ ЗАТЗП. Також, з врахуванням специфіки роботи ЗАТЗП, потребується уточнення характеристик (або можливості відмови від встановлення) електромотора приводу переднього моста, що може суттєво спростити модернізацію.

Запропонований варіант АШ ЗАТЗП з гібридним силовим агрегатом (рис. 8) може забезпечити переваги, які були надані у таблиці 1 та режими руху, які надані у таблиці 2.

Таблиця 2. Режими руху АШ ЗАТЗП з гібридним силовим агрегатом типу PHEV

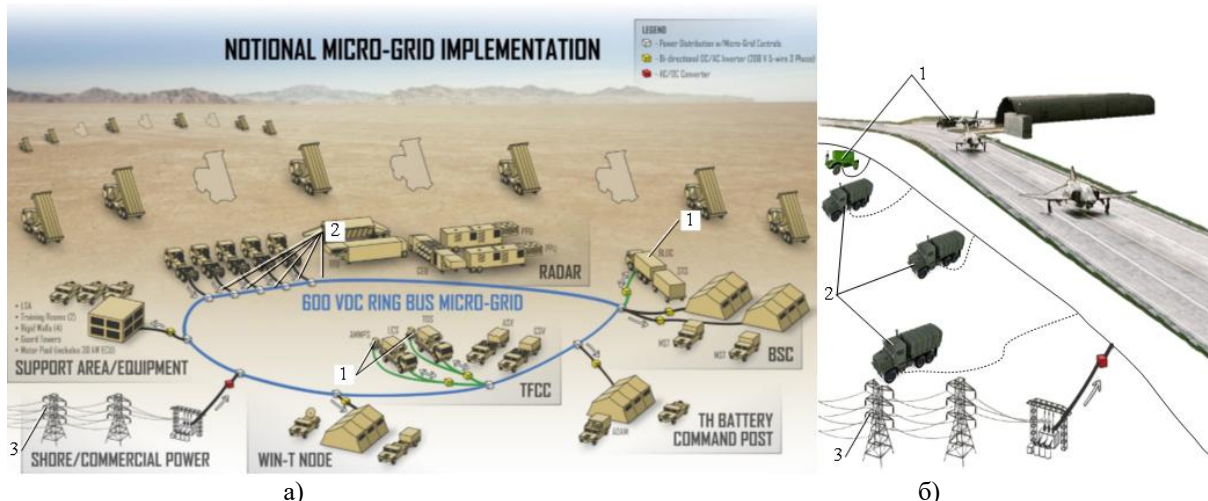
№	Режим руху	Використовується	Витрачається
1.	Часткових та сталих навантажень на постійній швидкості	ДВЗ	Паливо
2.	По дорозі з вдосконаленим покриттям з великими навантаженням (руху угору, прискорення, тощо)	ДВЗ та електромотор-генератор	Паливо та електрична енергія НЕЕ
3.	По бездоріжжю, дорозі зі слизьким покриттям, з великими навантаженнями	ДВЗ, електромотор-генератор та електромотор приводу переднього моста	Паливо та електрична енергія НЕЕ
4.	Початок руху, з малою швидкістю у режимі економії палива	Електромотор-генератор	Електрична енергія НЕЕ
5.	Підчас прихованого переміщення («тихий» режим)	Електромотор-генератор та електромотор приводу переднього моста	Електрична енергія НЕЕ

Розвиток конструкції та поширення використання військових АШ з гібридним силовим агрегатом сприяє наступному кроку – створенню та подальшому розвитку технологій, щодо забезпечення електроенергією тактичних угруповань [3]. Це так звана безпечна передова тактична мобільна енергія (Secure Tactical Advanced Mobile Power (STAMP)) прикладом якої є високомобільна, кіберзахищена та легка мікромережа, яка зараз розробляється у збройних силах США (рис. 9, а). Концепція цієї мікромережі передбачає об'єднання кількох джерел живлення для досягнення оптимальної потужності, покращення розподілу електроенергії, її зберігання, моніторингу та обслуговування [3].

У складі засобів аеродромно-технічного обслуговування є засоби буксирування, рухомі засоби мийки та спеціальної обробки

(рис. 1), які застосовуються за призначенням обмежений час [12]. Тому модернізація встановленням гібридних силових агрегатів в АШ вказаних засобів може дозволити, у час коли вони не використовуються за основним призначенням, облаштувати з їх використанням мікро-мережі типу STAMP для забезпечення потреб у електроенергії для аеродромно-технічного забезпечення польотів в умовах розосередження поза межами обладнаних аеродромів та авіабаз. Варіант можливого облаштування такої мережі наведено на рис. 9, б).

Крім вказаного, слід відзначити, що модернізація всіх АШ ЗАТЗП встановленням гібридного силового агрегату може дозволити облаштовувати єдину систему забезпечення електроенергією для наземного забезпечення польотів, зокрема в умовах використання польових аеродромів.



1 – штатні засоби забезпечення електроенергією; 2 – АШ з гібридним силовим агрегатом; 3 – промислова електромережа

Рис. 9. Приклад облаштування мікромережі STAMP з використанням АШ з гібридним силовим агрегатом: а – забезпечення електроенергією тактичних угруповань за даними [3]; б – забезпечення електроенергією під час робіт аеродромно-технічного забезпечення польотів (розроблено авторами за даними [16])

Висновки

Таким чином, проведено аналіз існуючих конструкцій військових автомобілів з гібридним силовим агрегатом, а також здійснено теоретичне обґрунтування варіанта модернізації автомобільного шасі засобу аеродромно-технічного забезпечення польотів встановленням гібридного силового агрегату за умовою забезпечення електричною енергією роботи власного спеціального обладнання та обладнання аеродрому.

Результати проведених досліджень можуть дозволити з малим обсягом робіт, а саме встановленням електромотор-генератора визначеної потужності на місце роздавальної коробки (та інших складових згідно схеми) модернізувати, з урахуванням раціонального забезпечення виконання завдання за призначенням, практично будь-який автомобіль категорії N2G до рівня АШ ЗАТЗП з гібридним (дизель-електричним) силовим агрегатом.

Отримала подальшого розвитку функціональна схема автомобільного шасі з гібридним силовим агрегатом.

Застосування гібридного дизель-електричного силового агрегату в автомобільному шасі засобу аеродромно-технічного забезпечення польотів надає можливість:

- забезпечити швидке пересування при одночасному збільшенні автономного виробництва електричної енергії;
- зменшити витрати палива та адаптувати режими руху автомобільних шасі до умов

застосування;

– розширити функціональні можливості з забезпечення електричною енергією роботи складових автомобільного шасі, спеціального обладнання та зовнішніх споживачів у місці виконання завдання за призначенням.

Потребує подальшого дослідження:

- визначення параметрів гібридного силового агрегату (електромотор-генератора, блока керування, накопичувача електроенергії, електромотора приводу переднього моста);
- розробка додаткових заходів захисту електричних компонентів гібридного силового агрегату від впливу несприятливих чинників польових умов пересування та кліматичних умов;
- забезпечення найбільш економічних режимів роботи ДВЗ АШ з гібридним силовим агрегатом під час виробництва електроенергії;
- узгодження відповідності характеристик АШ з гібридним силовим агрегатом з існуючим АШ ЗАТЗП, в тому числі за рахунок збільшення об'єму паливних баків;
- розробка додаткових організаційних та технічних заходів відстеження та підтримання технічного стану приводного двигуна внутрішнього згоряння АШ.

Використання наданого варіанта автомобільного шасі ЗАТЗП з гібридним силовим агрегатом надає можливість у подальшому розробити комплекти для модернізації будь-яких автомобілів до рівня PHEV під час проведення капітального або середнього ремонту.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

- Зброя російсько-української війни 2022 – 2023 років: Довідник-каталог основних зразків озброєння та військової техніки які застосовувалися протиборчими сторонами під час відсічі широкомасштабного вторгнення РФ в Україну (24.02.2022 – 30.06.2023) / МО України, Апарат Головнокомандувача ЗС України, ГШ ЗС України, Центр досліджень воєнної історії ЗС України. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2023. – 243 с.
- Воєнно-історичний опис російсько-української війни: Вип. 23: січень 2024 року / МО України, Апарат ГК ЗС України, ГШ ЗС України та Центр досліджень воєнної історії ЗС України. – Київ, 2024. – 205 с.
- Powering the U.S. Army of the Future. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press. web site. URL: <https://doi.org/10.17226/26052/> (accessed 20.03.2025).
- Заблоцький В., Лапаєв Ю. Дрони як зброя: стан і перспективи ударних безпілотників для Збройних Сил України. Defense Express: web site. URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/droni_jak_zbroja_stan_i_perspektivi_udarnih_bezpilotnikov_dlja_zsu-4565.html/ (accessed 20.03.2025).
- Рогозін І.В., Новічонок С.М., Леоненко О.М., Ісаєв А.С. Напрямок сумісного розвитку військових транспортних засобів та пересувних джерел електричної енергії. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2024. № 2(80). С. 144-152. <https://doi.org/10.30748/zhups.2024.80.19>.
- Amos C. Fox. Contested Logistics: A Primer. Association of the United States Army (AUSA). Landpower essay. № 24-1, February 2024. web site. URL: <https://www.ausea.org/file/114395/download?token=BcLoa6dX/> (accessed 20.03.2025).
- By Maj. Jon Michael King. Contested Logistics Environment Defined. Army Sustainment. Winter, 2024. P. 46-49. web site. URL: <https://asu.army.mil/alog/currentissue.pdf>.
- Megan Gully. Army focuses on contested logistics – a threat to enemy. U.S. Army. web site. URL: https://www.army.mil/article/265428/army_focuses_on_contested_logistics_a_threat_to_enemy/ (accessed 20.03.2025).
- Лагунін Г.І., Лисенко В.М. Шляхи забезпечення електромагнітної сумісності споживачів електричної енергії в умовах мирного часу та при веденні бойових дій. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2016. № 2(47). С. 151-154.
- Lahutin H.I., Malysh O.M. Modern problems of energy supply for the combat operations. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2016. № 4 (49). С. 118-121.
- Рогозін І.В., Новічонок С.М., Гнатів А.В., Рогозіна А.І. Спосіб розрахунку основних параметрів гібридного силового агрегату для спеціалізованих автотранспортних засобів. Автомобіль і Електроніка. Сучасні технології. 2018. Вип. 13 С. 5-12. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2018.13.0.5>.
- Про затвердження Правил аеродромно-технічного забезпечення польотів повітряних суден державної авіації України. Наказ МО України від 24.12.2015 р. № 761. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0130-16#Text>.
- Oshkosh Defense Vehicle Platforms. Oshkosh Defense: web site. URL: <https://oshkoshdefense.com/vehicles/> (accessed 20.03.2025).
- Oshkosh Defense unveils eJLTV hybrid-electric Joint Light Tactical Vehicle JLTV. Defense News January 2022 Global Security army industry. Army Recognition Group : web site. URL: https://armyrecognition.com/defense_news_january_2022_global_security_army_industry/oshkosh_defense_unveils_ejltv_hybrid-electric_joint_light_tactical_vehicle_jltv.html/ (accessed 20.03.2025).
- Heavy expanded mobility tactical truck HEMTT A3 diesel-electric. Oshkosh Corporation: web site. URL: https://tanknutdave.com/wp-content/uploads/2015/02/HEMTT_A3_SS_6-13-11.pdf/ (accessed 20.03.2025).
- VEHICLES + CHASSIS. AM General LLC: web site. URL: <https://www.amgeneral.com/what-we-do/vehicles-chassis/> (accessed 20.03.2025).
- Compact, Lightweight, High Efficiency Rotary Engine for Generator, APU, and Range-extended Electric Vehicles, Shkolnik, et al. Proceedings of the 2018 Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium: web site. URL: https://assets-global.website-files.com/5f6086e9bbabd41a20f2984/5f9accc0f3f8f455bebc45f3_94%20Shkolnik%2C%20Alexander_final%20paper.pdf / (accessed 20.03.2025).
- Борових С.І., Новічонок С.М., Рогозін І.В., Терентьєва І.В. Перспективна схема побудови засобу рухомості аеродромного пересувного електроагрегату. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2009. № 2(2). С. 41-44.
- Plug-in Hybrid Electric Vehicles (HED) the HUMVEE example. Defense Update: web site. URL: <https://defense-update.com/20060520-feature-hed-humvee.html/> (accessed 20.03.2025).
- Рогозін І.В., Новічонок С.М. Функціональна схема пересувної майстерні відновлення засо-

- бів транспорту на базі автомобільного шасі з гібридним силовим агрегатом. Автомобіль і електроніка. сучасні технології: IX міжнародна наук.-техн. інтернет-конф. - Х.: ХНАДУ, 2024. - С. 197-199.
21. Смирнов О.П. Науково-технічні основи підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.20. Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Харків, 2016. – 426 с.
 22. Tamir Eshel. RENK Unveils ATREX Hybrid Transmission System. A Pathway for Future Combat Vehicle Propulsion. Defense Update. URL: https://defense-update.com/20240617_atrex-hybrid-transmission.html (accessed 20.03.2025).
 23. Tactical Hybridization. GM Defense: web site. URL: https://www.gmdefensellc.com/content/dam/company/gm-defense/docs/ausa/2022/GMD_Tactical_Hybrid.pdf/ (accessed 20.03.2025).
 24. Бажинов О.В., Смирнов О.П., Сєріков С.А., Гнатов А.В., Колєсніков А.В. Гібридні автомобілі. – Харків, ХНАДУ, 2008. – 327 с.
 25. Podrigalo M., Klets D., Yatsenko K. etc. Probabilistic Method for Assessing the Stability of Multi-Axle Vehicles When Braking. SAE Technical Paper 2019-01-2146, 2019. P. 1–6. doi:10.4271/2019-01-2146.
 26. Dan Flynn, Alexandra Zavis. Red Sea attacks. Reuters. URL: <https://www.reuters.com/graphics/ISRAEL-PALESTINIANS/SHIPPING-ARMS/lgvdmngeyvo/> (accessed 20.03.2025).

Рогозін Ігор Віталійович¹, к.т.н., с.н.с, доцент,
e-mail: iv_r@ukr.net, тел. +38 066-915-91-67,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4126-6705>

Новічонок Сергій Михайлович¹, к.т.н., доцент,
провідний науковий співробітник
e-mail: newhobu4ohok@gmail.com,
тел. +38 067-728-17-61,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1269-5797>

Нечаус Андрій Олександрович², к.т.н., доцент,
доцент кафедри автомобільної електроніки,
e-mail: a.nechaus@gmail.com,
тел. +38 067-777-02-24,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8833-0802>

Ісаєв Антон Сергійович³, магістр, системний
архітектор відділу розробки та впровадження
програмного забезпечення,
e-mail: totoshko88@gmail.com,
тел. +38 098-490-78-10,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6148-5224>

¹Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, 61023, Україна, м. Харків, вул. Сумська, 77/79.

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

³ТОВ "ЕПАМ ДІДЖИТАЛ", 61003, Україна, м. Харків, Слюсарний провулок, 1.

Ways to improve the chassis of an airfield flight support vehicle by installing a hybrid power unit

Abstract. Problem. The constantly changing nature of modern combat operations may create a need to increase the number and intensity of flight support operations. To ensure the reliable execution of assigned tasks, the automobile chassis of airfield flight support vehicles must meet the following requirements: Reduction of the time required for combat support operations (transportation of personnel and cargo, execution of special operations, etc.); Increased movement speed of the automobile chassis to reduce the likelihood of being targeted by precision-guided weapons; Dispersal and camouflage capabilities; Enhanced operational capabilities of airfield flight support vehicles; The ability to continuously supply power to equipment required for flight support operations. One way to address this challenge is to develop new or upgrade existing airfield flight support vehicles during major overhauls by integrating an electric machine (motor-generator) into the transmission of the automobile chassis. This motor-generator would enable rapid movement during operation and serve as an autonomous power source for specialized equipment while stationary. Thus, there is a growing need for the improvement and development of airfield flight support vehicles and their automobile chassis **Goal.** The goal of the article is to develop a rational functional scheme and determine the main characteristics of a promising automobile chassis with a hybrid power unit for an airfield flight support vehicle. **Methodology.** To achieve the goal of the article, the following tasks must be completed: Analyze existing designs of military vehicles with hybrid power units and select the most rational option; Develop a functional scheme for a promising automobile chassis of an airfield flight support vehicle with a hybrid power unit; Determine the main parameters of the hybrid power unit for the prospective automobile chassis of an airfield flight support vehicle. **The results.** The results of the conducted research may allow, with minimal effort, specifically by installing an electromotor-generator of a specified power in place of the distribution box (and other components according to the scheme), to upgrade, taking into account the rational provision for task execution, practically any vehicle of category N₂G to the level of an automobile chassis for an airfield flight support vehicle with a hybrid (diesel-electric) power unit. The functional scheme of the automobile chassis with a hybrid power unit has been further developed. **Originality.** An analysis of existing designs of military vehicles with hybrid power units has been conducted, and a theoretical justification for the option of upgrading the automobile chassis of an airfield flight support vehicle has been carried out. This involves installing a hybrid power unit to ensure the supply of electrical energy for the operation of the vehicle's own specialized equipment and airfield equipment. **Practical value.** The use of

the proposed automobile chassis of an airfield flight support vehicle with a hybrid power unit enables the future development of upgrade kits for converting any vehicle to the PHEV level during major or mid-life repairs.

Key words: automobile chassis, hybrid power unit, power source, electromotor-generator, airfield flight support vehicle, energy storage unit

Rohozin Ihor¹, Ph.D., Senior Researcher, Assoc. Prof., e-mail: iv_r@ukr.net, tel. +38 066-915-91-67, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4126-6705>

Novichonok Serhii¹, Ph.D., Assoc. Prof., Lead Researcher, e-mail: newhobu4ohok@gmail.com, тел. +38 067-728-17-61, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1269-5797>

Nechaus Andrii², Ph.D., Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department, tel. +38 067-777-0224, a.nechaus@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8833-0802>

Isaiev Anton³, Master, Systems Architect of Department of Software Development and Implementation, e-mail: toto88@gmail.com, tel. +38 098-490-78-10, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6148-5224>

¹Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, 77/79 Sumska str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

²Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

³"EPAM DIGITAL" LLC, 1, Slyusarnyy lane, Kharkiv, 61003, Ukraine.

Дослідження методів машинного навчання для оптимізації енергоспоживання в гібридних електромобілях з підзарядкою від мережі

Тараненко Н.В.¹, Трунова І.С.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті проведено огляд сучасних методів оптимізації енергоспоживання в гібридних електромобілях з підзарядкою від мережі із використанням алгоритмів машинного навчання. Розглянуто інтелектуальні стратегії управління енергопотоками, зокрема алгоритми глибинного навчання, навчання з підкріпленням і модельно-прогностичне керування. Визначено ключові параметри системи керування енергією, технічні виклики впровадження машинного навчання та актуальні тенденції розвитку. Особливу увагу приділено адаптації до умов руху, прогнозуванню споживання, моніторингу стану батареї та персоналізованому керуванню. Показано, що машинне навчання дозволяє досягти кращої паливної економії, ніж традиційні методи. Визначено наукові прогалини та перспективні напрями подальших досліджень для підвищення ефективності та надійності системи керування енергією у гібридних електромобілях, що підзаряджаються від мережі.

Ключові слова: гібридний електромобіль з підзарядкою від мережі, система керування енергією, машинне навчання, оптимізація енергоспоживання, розподіл потужності.

Вступ

Дослідження у сфері сталих та енергоефективних транспортних рішень стимулювали активний розвиток гібридних електромобілів з підзарядкою від мережі (Plug-In Hybrid Electric Vehicles – PHEV), які розглядаються як перспективна альтернатива автомобілям із виключно двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). Як правило, конструкція PHEV поєднує електричну та бензинову (або дизельну) силові установки, що забезпечує можливість роботи в повністю електричному режимі, у комбінованому (гібридному) режимі, або лише за рахунок ДВЗ. Така гібридизація дозволяє знизити споживання пального, скоротити викиди парникових газів, зменшити залежність від викопного палива та збільшити запас ходу порівняно з повністю електричними автомобілями.

Ключовим компонентом ефективного використання подвійного джерела енергії в PHEV є система керування енергією (Energy

Management System – EMS). Вона відповідає за розподіл енергоресурсів і потужності між ДВЗ та тяговою акумуляторною батареєю, яка живить електродвигун, керований силовим перетворювачем. Основне завдання EMS – це забезпечення оптимального балансу між енергоефективністю, динамічними характеристиками та рівнем викидів, з урахуванням змінних умов експлуатації. Ефективне керування потоками енергії з урахуванням профілю маршруту, дорожньої ситуації, стилю водіння та технічних обмежень компонентів є визначальним чинником підвищення загальної ефективності та комфорту PHEV.

Розробка досконалої EMS для PHEV є складним завданням, що охоплює питання взаємодії між силовими агрегатами, оптимізації режимів приводу, теплового менеджменту та адаптації до динамічних змін у дорожньому та кліматичному середовищі. Складності посилюються через потребу в інтеграції кількох підсистем із різними джерелами енергії та системами накопичення, що створює

серйозні виклики для забезпечення їх узгодженої роботи в режимі реального часу.

Перші покоління EMS ґрунтувалися переважно на жорстко запрограмованих детермінованих стратегіях, що використовували фіксовані правила перемикання режимів на основі таких критеріїв, як швидкість, рівень заряду батареї або фаза руху. Такі підходи обмежені в гнучкості та не враховують реальні дорожні умови чи поведінкові фактори, що знижує потенціал гібридних силових систем.

Протягом останніх років спостерігається зміщення в парадигмі керування – від формалізованих правил до інтелектуальних стратегій, що використовують алгоритми машинного навчання (Machine Learning – ML), модельно-прогностичне керування (Model Predictive Control – MPC) та методи обробки великих даних. Використовуючи історичну та телеметричну інформацію, ці алгоритми здатні динамічно адаптувати енергетичні стратегії відповідно до поточних умов, покращуючи загальну ефективність і продуктивність системи.

Застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє сучасним EMS досягати високого рівня продуктивності, адаптивності та енергоефективності. Однак реалізація цих можливостей потребує подолання низки технічних та прикладних викликів, зокрема: складності побудови моделей, високих обчислювальних навантажень, потреби в адаптації до невизначеності та необхідності валідації результатів у реальних умовах експлуатації. Подолання цих обмежень відкриває шлях до впровадження EMS нового покоління, орієнтованих на інтелектуальне, ефективне керування енергією в PHEV.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає у комплексній систематизації підходів машинного навчання для оптимізації систем керування енергією в гібридних електромобілях з підзарядкою від мережі, в обґрунтуванні доцільності впровадження модульної архітектури EMS, розробці концепції персоналізованого керування енергоспоживанням на основі стилю водіння користувача, аналізі можливостей залучення альтернативних джерел енергії через ML-моделі, а також у визначенні основних технічних викликів і напрямів розвитку інтелектуальних енергосистем для транспортних засобів нового покоління.

Аналіз публікацій

Останніми роками спостерігається стрімке зростання наукового інтересу до використання методів машинного навчання у системах керування енергоспоживанням у плагін-гібридних транспортних засобах. У публікаціях [1-3] розглянуто застосування алгоритмів навчання з підкріпленням, зокрема глибинного детермінованого градієнта політики (Deep Deterministic Policy Gradient – DDPG) та подвійного уповільненого глибинного детермінованого градієнта політики (Twin Delayed DDPG – TD3), для адаптивного управління енергопотоками в PHEV, що забезпечує зменшення споживання палива та покращення динамічного відгуку силової установки.

Огляд досліджень [4-7] підтверджує ефективність використання прогностичних моделей і методів глибинного навчання для передбачення стилю водіння, моніторингу і прогнозування стану тягової батареї, а також розподілу потужності між ДВЗ та електроприводом у режимі реального часу. Роботи [8, 9] підкреслюють переваги інтеграції нейронних мереж із нечіткою логікою для врахування невизначеностей у дорожніх і кліматичних умовах.

У публікаціях [10-12] наведено практичні приклади побудови системи керування енергоспоживанням на основі симуляційного моделювання та розглянуто структури EMS з позиції архітектурних рішень. З іншого боку, роботи [13, 14] акцентують увагу на необхідності високої обчислювальної продуктивності, а також впровадження хмарних технологій і інтеграції з розподіленими сенсорними системами для забезпечення точного збору й обробки даних.

Отже, попри значний науково-технічний прогрес у застосуванні ML у системах EMS для PHEV, низка викликів залишається відкритими. Серед них обмежена доступність якісних навчальних даних, складність впровадження ML-алгоритмів у режимі реального часу та забезпечення високої надійності функціонування в умовах змінної динаміки дорожнього середовища. Зазначені аспекти визначають ключові вектори майбутніх досліджень у сфері інтелектуального енергокерування плагін-гібридних транспортних засобів.

Мета та постановка задачі

Метою даної роботи є систематизація та аналіз сучасних підходів до реалізації інтелектуальних стратегій керування енергоспоживанням у гібридних електромобілях з підзарядкою від мережі із застосуванням методів машинного навчання, а також виявлення ключових викликів, технічних обмежень і перспектив їх подальшого розвитку для забезпечення ефективності, адаптивності та надійності енергетичного керування в реальних умовах експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити структурно-функціональні особливості та експлуатаційні режими роботи PHEV з акцентом на їх вплив на побудову ефективних стратегій управління енергоспоживанням;
- провести огляд типових конфігурацій систем управління енергією у PHEV, включаючи, логіку роботи та функціональну структуру;
- проаналізувати технічні виклики інтеграції методів ML у EMS, зокрема обмеження щодо обчислювальних ресурсів, необхідність роботи в реальному часі, вплив умов руху та деградації батареї;
- узагальнити сучасні ML-підходи до оптимізації розподілу потужності, прогностичного керування, діагностики акумуляторної батареї та персоналізованих стратегій;
- визначити потенціал використання мо-

дульного підходу до побудови EMS, що підвищує гнучкість, масштабованість і адаптивність систем;

– сформулювати напрямки подальших наукових досліджень і розробок, орієнтованих на вдосконалення систем керування енергоспоживанням в транспортних засобах нового покоління.

Архітектура та функціональні особливості PHEV

Головною особливістю гібридних електромобілів з підзарядкою від мережі, є можливість заряджання високовольтної тягової батареї від зовнішнього джерела живлення. Це дозволяє транспортному засобу певний час рухатися в режимі повністю електричної тяги. Принцип дії PHEV ґрунтується на інтеграції технологій двигуна внутрішнього згоряння та електричного двигуна, живлення якого забезпечується тяговою батареєю. Основна перевага полягає у здатності працювати як на електроенергії, так і на традиційному паливі, що дозволяє комбінувати джерела енергії для підвищення паливної економічності та збільшення запасу ходу.

Гібридні електромобілі з підзарядкою від мережі (рис. 1) обладнані акумуляторною батареєю, електродвигуном і двигуном внутрішнього згоряння, а також трансмісією, що забезпечує керування розподілом енергії [15].

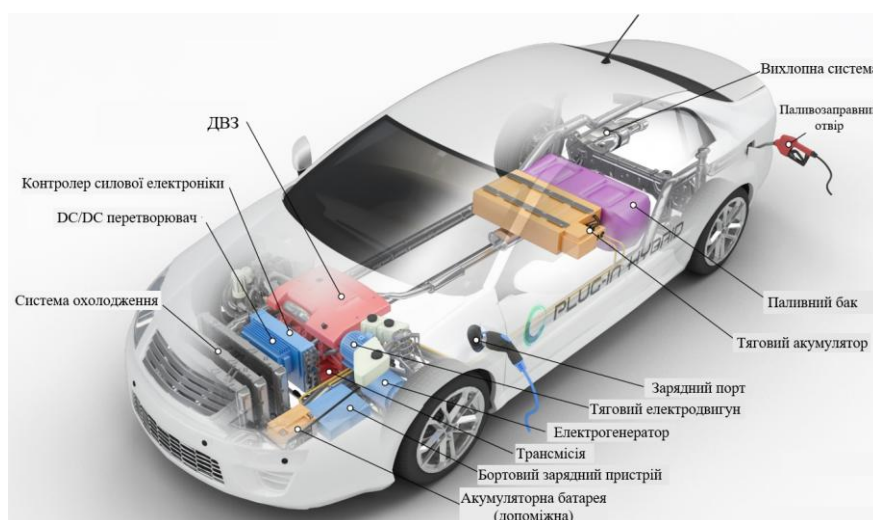


Рис. 1. Основні компоненти PHEV

Електроенергія для функціонування PHEV може надходити безпосередньо з тягової батареї, зарядженої від електромережі,

або генеруватися генератором, який приводиться в дію ДВЗ.

Ключові компоненти гібридного електро-

мобіля, що підзаряджається від мережі, включають:

- допоміжна акумуляторна батарея подає живлення для запуску системи до активації тягової батареї, а також забезпечує роботу допоміжного електрообладнання;
- зарядний порт забезпечує підключення автомобіля до зовнішнього джерела живлення для заряджання тягового акумуляторного блока;
- DC/DC перетворювач перетворює постійний струм високої напруги від тягової батареї в постійний струм нижчої напруги, необхідний для роботи допоміжних систем і підзарядки допоміжної батареї;
- електрогенератор виробляє електроенергію під час рекуперативного гальмування, повертаючи її в тягову батарею. У деяких моделях застосовуються мотор-генератори з функцією тяги й рекуперації;
- тяговий електродвигун використовуючи енергію тягової батареї, приводить у рух колеса автомобіля. Часто об'єднаний із генератором в одному агрегаті;
- двигун внутрішнього згоряння працює на бензині або дизельному пальному та використовується, коли заряд акумулятора недостатній або коли потрібне швидке прискорення;
- бортовий зарядний пристрій приймає змінний струм, що надходить через зарядний порт та перетворює його на постійний для заряджання тягової батареї. Також взаємодіє із зарядною станцією й контролює параметри батареї – напругу, струм, температуру та рівень заряду;
- інвертор (контролер силової електроніки) керує потоками енергії від тягової батареї, регулюючи швидкість обертання та крутний момент тягового електродвигуна;
- система охолодження підтримує робочі температурні умови для двигуна, електродвигуна, силової електроніки та інших систем;
- тяговий акумулятор зберігає електроенергію для живлення тягового електродвигуна;
- трансмісія передає механічну енергію від двигуна внутрішнього згоряння та/або електродвигуна до ведучих коліс;
- система керування енергією є одним із ключових елементів гібридних електромобілів з підзарядкою від мережі. Вона відповідає за оптимальний розподіл енергії між джерелами живлення та регулювання режимів роботи силових агрегатів залежно від умов

експлуатації [16].

Архітектурні конфігурації та режими функціонування PHEV. Архітектура силової установки PHEV визначає принцип взаємодії між джерелами енергії та спосіб передавання потужності до провідних коліс [17, 18]. Саме архітектурне рішення впливає на логіку функціонування системи управління енергією, а також на ефективність і динаміку транспортного засобу в різних умовах руху.

Існують три основні типи архітектур гібридних систем:

- послідовна архітектура. У цій конфігурації ДВЗ не має механічного зв'язку з колесами і працює виключно як генератор електроенергії для живлення електродвигуна або заряджання батареї. Увесь тяговий момент створюється електродвигуном. Основними перевагами є конструктивна простота та висока ефективність у міських умовах;
 - паралельна архітектура. У такій конфігурації як ДВЗ, так і електродвигун мають механічне з'єднання з трансмісією та здатні передавати крутний момент безпосередньо на колеса. Це забезпечує комбіновану тягу, що є ефективною на високих швидкостях і при розгоні. Архітектура вимагає складнішого механічного виконання, однак забезпечує кращу паливну ефективність на міжміських маршрутах (особливо на стабільних швидкісних ділянках або при високих навантаженнях, де ДВЗ працює в оптимальних режимах);
 - комбінована (змішана) архітектура. Поєднує елементи послідовної та паралельної схем, дозволяючи динамічно перемикатися між режимами залежно від дорожніх умов і вимог водія. EMS керує розподілом енергії між ДВЗ, електродвигуном та акумуляторною батареєю з метою досягнення оптимальної ефективності.
- Робота PHEV може здійснюватися в кількох режимах [17, 19], що визначаються як архітектурою, так і стратегіями EMS:
- режим електромобіля. Рух здійснюється виключно за допомогою електродвигуна, який живиться від акумулятора. Застосовується переважно на низьких швидкостях і коротких дистанціях. Використання ДВЗ повністю виключається, що забезпечує нульовий рівень викидів;
 - гібридний режим. Робота електродвигуна і ДВЗ можлива як по черзі, так і одночасно, залежно від навантаження й стану заряду батареї. У паралельній або комбінованій

архітектурі може одночасно подаватися потужність від обох джерел. EMS забезпечує оптимальний розподіл енергії для досягнення балансу між економічністю й динамікою;

- режим утримання заряду. EMS підтримує поточний рівень заряду батареї шляхом пріоритетного використання ДВЗ. Застосовується в ситуаціях, коли необхідно зберегти заряд для подальшого в'їзду в екологічні зони або використання EV-режиму;

- режим заряджання від ДВЗ. Активується вручну або автоматично для підзарядки батареї у разі відсутності зовнішнього джерела живлення. ДВЗ працює з підвищеним навантаженням, направляючи надлишкову енергію на заряджання акумулятора. Ефективність цього режиму нижча, через додаткові втрати на перетворення енергії та менш ефективне використання ДВЗ порівняно із зарядкою від зовнішнього джерела;

- рекуперативний режим. Електродвигун працює як генератор під час гальмування або руху з ухилу, перетворюючи кінетичну енергію на електричну й накопичуючи її в акумуляторі. Це підвищує загальну енергоефективність і зменшує знос гальмівної системи.

Більшість PHEV автоматично перемикаються між зазначеними режимами відповідно до умов руху, заряду акумулятора та інших факторів. Також водій може вручну вибирати режим роботи через інтерфейс бортової системи. Завдяки цьому забезпечується гнучкість і можливість адаптації енергоспоживання до реальних умов експлуатації.

Знання архітектурних особливостей PHEV і специфіки їх функціонування в різних режимах є надзвичайно важливим при розробці та вдосконаленні стратегій EMS. Кожна конфігурація має свої переваги й обмеження, що безпосередньо впливають на алгоритми керування силовою установкою. Комплексне уявлення про функціонування в режимах електромобіля, утримання заряду, рекуперативного гальмування, є основою для формування адаптивних стратегій керування енергоспоживанням в EMS.

Системи управління енергією в гібридних електромобілях з підзарядкою від мережі

Система управління енергією в PHEV, являє собою багаторівневу сукупність апаратних і програмних компонентів, необхідних для ефективного контролю та оптимізації використання енергетичних ресурсів. Основу

EMS становлять сенсори та модулі збору даних, які здійснюють моніторинг ключових параметрів транспортного засобу, таких як швидкість руху, рівень заряду акумуляторної батареї (State of Charge – SoC), навантаження на двигун, а також навколишні умови експлуатації. Ці датчики забезпечують надходження даних у режимі реального часу, що є критично важливим для процесу прийняття рішень в EMS.

У поєднанні зі складними алгоритмами керування EMS обробляє отриману з сенсорів інформацію, приймаючи обґрунтовані рішення щодо розподілу енергії та режимів роботи елементів силової установки. Керуючі алгоритми, що охоплюють як моделі на основі фізичних принципів, так і сучасні ML-підходи, виконують функцію «інтелектуальної складової» EMS, забезпечуючи динамічне налаштування параметрів роботи силового агрегату відповідно до умов руху та індивідуальних переваг користувача.

Виконавчі механізми та силові компоненти приводу відіграють ключову роль у структурі EMS – реалізують керувальні команди, сформовані алгоритмами, регулюючи роботу двигуна внутрішнього згоряння, електродвигуна, трансмісії та системи накопичення енергії. Крім того, EMS включає комунікаційні інтерфейси, які забезпечують безперервну взаємодію з іншими електронними та електромеханічними підсистемами автомобіля, сприяючи інтегрованому обміну даними та координації роботи задля досягнення максимальної ефективності.

У сукупності ці компоненти формують функціональний базис системи EMS, дозволяючи здійснювати ефективне управління потоками енергії та підвищувати загальні показники продуктивності PHEV. З огляду на тісну інтеграцію обчислювальних, апаратних і програмних засобів, EMS у PHEV фактично виступає як інтегрована обчислювально-фізична система (це передбачає взаємодію програмно-алгоритмічних рішень з фізичними компонентами транспортного засобу через сенсори, актуатори та обчислювальні модулі).

Система EMS виступає основною складовою в PHEV, відповідальною за оптимізацію використання енергоресурсів і підвищення ефективності силової установки. Завдяки адаптивному перерозподілу потужності на основі телеметричних даних у реальному часі EMS сприяє зниженню споживання пального та обсягу викидів, що відповідає сучас-

ним вимогам екологічної сталості та економічної доцільності.

EMS також забезпечує точне налаштування параметрів прискорення, крутного моменту та відгуку трансмісії відповідно до дорожніх умов і стилю водіння. Це сприяє підвищенню динаміки та комфорту керування, а також захищає вузли силового агрегату від перевантаження та передчасного зносу, продовжуючи їхній ресурс і знижуючи витрати на обслуговування.

З метою підвищення енергоефективності EMS має використовувати прогностичні алгоритми й дані датчиків у реальному часі для оптимального розподілу енергії між джерелами, забезпечуючи плавні переходи між режимами роботи та мінімізацію втрат [20]. При цьому важливо враховувати стійкість системи до збоїв, зокрема реалізацію функцій діагностики та усунення несправностей у режимі реального часу.

Інтеграція функцій діагностики та прогнозування технічного стану передбачає включення до EMS механізмів збору, попередньої обробки та аналізу даних, навчання моделей виявлення відхилень і прогнозування залишкового ресурсу компонентів. Це дає змогу реалізувати концепцію превентивного технічного обслуговування, запобігати критичним відмовам і підвищувати надійність експлуатації PHEV.

Інтеграція механізмів виявлення й діагностики несправностей в EMS для PHEV охоплює низку етапів і методик, необхідних для забезпечення безперервного функціонування системи. Зокрема, до них належать: збір та попередня обробка даних, вибір інформативних ознак, навчання моделей машинного навчання, виявлення несправностей у реальному часі, діагностика та прогнозування, інтеграція з EMS і постійне вдосконалення алгоритмів [22].

Виявлення несправностей у реальному часі передбачає онлайн-моніторинг, виявлення аномалій і прийняття рішень з подальшою генерацією попереджень та запуском заздалегідь визначених дій для усунення проблем. Розробка адаптивних алгоритмів, здатних навчатися на нових шаблонах, підвищує здатність системи до виявлення несправностей, покращуючи її надійність і безпеку для користувача. Своєчасні сповіщення дозволяють реалізувати концепцію прогнозного технічного обслуговування, оцінювати залишковий ресурс компонентів і забезпечу-

вати їх ремонт або заміну до моменту відмови [23, 24].

Для систематизації основних функціональних характеристик та призначення компонентів системи керування енергією у гібридних транспортних засобах з підзарядкою від мережі, нижче наведено узагальнену таблицю з ключовими параметрами, які визначають ефективність та адаптивність системи управління енергією в умовах змінних режимів експлуатації.

Основні виклики в системах EMS для PHEV. Система управління енергією у гібридних транспортних засобах з підзарядкою від мережі динамічно розподіляє потужність між двигуном внутрішнього згоряння і системою накопичення енергії на основі таких факторів, як швидкість руху, навантаження, рівень заряду акумулятора та дії водія.

Таблиця 1 – Ключові параметри та функції системи керування енергією у PHEV

Параметр/функція	Призначення
Оптимальний розподіл потужності	Забезпечення ефективного балансу між ДВЗ та електродвигуном залежно від умов руху
Керування режимами приводу	Автоматичне перемикання між режимом електроомобіля, гібридним, зарядним та рекуперативним режимами
Інтелектуальна діагностика	Виявлення та класифікація відмов компонентів у режимі реального часу
Прогностичне енергетичне керування	Прогноз навантаження, стилю руху та дорожніх умов для попереджувального планування
Гладкість переходів між режимами	Зниження крутильних коливань при перемиканнях режимів приводу
Адаптація до стилю керування водія	Індивідуалізація EMS відповідно до характеру експлуатації транспортного засобу
Інтеграція з підсистемами транспортного засобу	Обмін даними з системою керування батареєю, трансмісією, системою опалення, вентиляції та кондиціонування повітря та електронною системою стабілізації з метою досягнення системної узгодженості
Підтримка програмних оновлень та масштабованість	Здатність до розширення функціональності EMS з урахуванням нових алгоритмів

EMS реалізує як прогностичні, так і адаптивні стратегії керування, використовуючи прогностичні моделі та дані в реальному часі для випереджального регулювання роботи силової установки відповідно до дорожніх умов.

Крім того, EMS здійснює контроль технічного стану компонентів, виявляє аномалії та впроваджує превентивні заходи, що підвищують надійність і подовжують термін служби систем. Система також сприяє рекуперації енергії шляхом уловлювання й накопичення кінетичної енергії під час гальмування, що підвищує загальну ефективність і продуктивність транспортного засобу.

Проектування та реалізація EMS супроводжується низкою складнощів. Однією з основних є складна інтеграція апаратних і програмних компонентів, між якими існують складні взаємозв'язки. Створення точних прогностичних моделей, які можуть забезпечити надійне передбачення дорожньої ситуації та оптимізацію режимів роботи силової установки, залишається серйозною проблемою. Реалізація алгоритмів EMS у реальному часі вимагає високої обчислювальної ефективності, оскільки система повинна виконувати складні керуючі й оптимізаційні обчислення в умовах обмеженого часу.

Інтеграція даних з датчиків у реальному часі в моделі машинного навчання для EMS також супроводжується низкою викликів. По-перше, гібридна силова установка характеризується високим ступенем нелінійності, що ускладнює побудову точних моделей. По-друге, необхідність одночасного опрацювання як безперервних, так і дискретних змінних підвищує складність алгоритмів. Додатково, невизначеності, пов'язані з помилками моделювання та зміною зовнішніх умов, можуть знижувати ефективність прийнятих рішень [25]. Крім того, деградація акумуляторних систем із часом знижує достовірність вхідних параметрів та потребує динамічного перенавчання моделей.

Подолання цих викликів потребує застосування нових підходів до побудови і реалізації енергетичних стратегій в EMS. Сучасні наукові дослідження пропонують низку методів і концепцій для вирішення зазначених проблем.

Сучасні підходи та формалізація EMS для PHEV. Ефективна побудова системи керування енергоспоживанням у гібридних електромобілях з підзарядкою від мережі вимагає використання сучасних адаптивних стратегій, здатних гнучко реагувати на змінні умо-

ви експлуатації, забезпечувати прогнозування енергетичних потреб і підтримувати оптимальний розподіл ресурсів між джерелами енергії.

Аналіз наукової літератури підтверджує, що ефективна реалізація EMS у PHEV потребує гібридного підходу, який комбінує різні техніки машинного навчання для вирішення спеціалізованих підзадач управління енергоспоживанням у PHEV [26-28].

Найбільш перспективними є:

- використання прогностичних моделей для випереджального планування енергопотоків на основі даних телеметрії і прогнозованих сценаріїв руху;

- впровадження алгоритмів навчання з підкріпленням, які дозволяють формувати стратегії керування через взаємодію із середовищем і постійне вдосконалення рішень за критеріями мінімізації витрат енергії та підтримання зарядного балансу (застосування алгоритму TD3 продемонструвало високу здатність до узагальнення та ефективного самонавчання в EMS [2, 3]);

- застосування глибинного навчання для моделювання складних залежностей між численними змінними транспортного середовища і стану силових установок;

- розвиток модульних архітектур EMS, що забезпечують масштабованість і стійкість системи за рахунок розподілу складного завдання на автономні, спеціалізовані підзадачі.

Одним із напрямів є також персоналізація стратегій керування через аналіз стилю водіння конкретного користувача із залученням методів класифікації й кластеризації телеметричних даних [29]. Це дозволяє враховувати індивідуальні особливості експлуатації та підвищувати енергетичну ефективність у реальних умовах руху. Сучасні підходи активно інтегрують концепцію об'єднання симуляційних і реальних даних для навчання моделей, що забезпечує кращу узгодженість моделей машинного навчання з умовами реальної експлуатації.

Основні вимоги до сучасних EMS для PHEV включають:

- мінімізацію витрати пального;
- ефективне управління зарядом батареї;
- точне прогнозування дорожньої ситуації;
- високу обчислювальну ефективність у реальному часі;
- надійність і стійкість до невизначенос-

ті зовнішнього середовища.

Ці завдання реалізуються з урахуванням численних обмежень – від фізичних характеристик компонентів до вимог безпеки та умов експлуатації.

Формалізація EMS нового покоління ґрунтується на багаторівневому оптимізаційному підході, який враховує цільові функції ефективності, обмеження апаратних ресурсів, особливості динаміки транспортного засобу та мінливість середовища експлуатації.

Машинне навчання в управлінні енергією PHEV

Інтеграція методів машинного навчання в системи управління енергією є стратегічно важливим напрямом підвищення ефективності розподілу енергетичних ресурсів [30]. Застосування ML значно підвищує ефективність прийняття рішень в EMS у режимі реального часу завдяки здатності адаптуватися до складних та динамічних шаблонів енергоспоживання.

Завдяки аналізу великих обсягів історичних і поточних даних, ML дозволяє EMS прогнозувати енергетичні потреби, реагувати на коливання генерації відновлювальних джерел енергії та оптимізувати розподіл ресурсів, сприяючи реалізації випереджальних стратегій енергетичного керування з урахуванням прогнозованих навантажень і коливань генерації.

Серед основних напрямів застосування ML в EMS: прогностична аналітика, прогнозування навантаження, управління попитом, виявлення та діагностика несправностей, оптимізація енергоспоживання й керування мережею. Вони демонструють трансформаційний потенціал ML у вдосконаленні функціональності EMS [31].

Зокрема, управління попитом, діагностика несправностей і прогнозування генерації з відновлювальних джерел енергії підкреслюють універсальність ML у підвищенні ефективності, надійності та гнучкості енергетичних систем.

Застосування ML в PHEV. У сучасній транспортній індустрії інтеграція ML в системи керування енергоспоживанням PHEV набуває дедалі більшого значення.

Застосування ML дозволяє реалізовувати інтелектуальні алгоритми керування, які забезпечують адаптивність до змінних умов руху, підвищують ефективність використання енергії та сприяють покращенню експлуа-

таційних характеристик транспортного засобу. Застосування інтелектуальних стратегій ML є важливим етапом у формуванні високотехнологічних, енергоефективних і екологічно орієнтованих систем керування у сфері електрифікованого транспорту. В таблиці 2 представлено ключові напрями застосування методів ML в EMS для PHEV, які структуровані відповідно до їхньої пріоритетності та актуальності в сучасних наукових дослідженнях [24, 33].

Таблиця 2 – Застосування методів машинного навчання в системах управління енергією для PHEV

Галузь застосування	Опис
Оптимізація розподілу потужності	Ключовий напрям для максимізації енергоефективності та динамічних характеристик PHEV шляхом раціонального розподілу потужності між двигуном внутрішнього згоряння та електродвигуном
Прогностичне керування енергією	Проактивне прогнозування та управління енергоспоживанням є необхідним для підвищення загальної ефективності та продуктивності системи
Моніторинг технічного стану тягової батареї	Прогностичне технічне обслуговування акумулятора є критично важливим для забезпечення надійності, довговічності та ефективності електроприводу
Адаптивні стратегії керування	Динамічне налаштування алгоритмів керування в залежності від умов руху дозволяє знижувати витрати палива й підвищувати загальну ефективність системи
Інтелектуальне керування залученням альтернативної енергії з навколишнього середовища	Залучення енергії навколишнього середовища (наприклад, сонячної) є перспективним, але ефективність залежить від умов доступності ресурсів
Оптимізація рекуперативного гальмування	Хоча технологія рекуперації вже впроваджена, існує потенціал для її подальшої оптимізації з точки зору ефективності енергоповернення
Аналіз стилю водіння	Індивідуалізація стратегій управління енергією відповідно до стилю водіння може покращити досвід керування, хоча потребує врахування аспектів конфіденційності

Від оптимізації розподілу потужності до прогностичного енергетичного керування та моніторингу технічного стану акумулятора – кожен із напрямів розглянуто з огляду на його значущість і теоретичну обґрунтованість. Подальше пояснення деталізує зміст кожного із зазначених напрямів, представлених у таблиці 3, із акцентом на їхню функціональну сутність, інженерну доцільність та потенціал до впровадження в системи EMS сучасних PHEV.

Оптимізація розподілу потужності в EMS для PHEV на основі машинного навчання. У сучасних системах керування енергоспоживанням у PHEV, методи машинного навчання виконують функцію інтелектуального ядра, яке забезпечує гнучкий і адаптивний розподіл потужності між двигуном внутрішнього згоряння та електричним приводом. Основною метою є досягнення високого рівня енергоефективності за умов динамічно змінних параметрів руху. Ключові функціональні можливості ML [33, 34] у цій сфері включають:

- прогнозування енергоспоживання – алгоритми навчаються на великих масивах даних, що охоплюють стиль керування, дорожню ситуацію та стан батареї. Це дає змогу адаптувати розподіл потужності в режимі реального часу не за фіксованими правилами, а з урахуванням поточних умов;

- прогностична оптимізація – ML-моделі можуть враховувати майбутні події (наприклад, ухил дороги, фази світлофора), забезпечуючи проактивне керування – збільшення частки електричного приводу або своєчасну реалізацію рекуперації;

- динамічна адаптація – враховуючи зміну рівня заряду батареї, навантаження та дорожні умови, ML-алгоритми коригують точки роботи ДВЗ і електроприводу з метою зменшення витрат пального та викидів;

- багатокритеріальне керування – система здатна оптимізувати кілька суперечливих параметрів одночасно (паливна економічність, екологічність, динаміка), змінюючи пріоритети залежно від обраного режиму або стилю водіння.

Таким чином, впровадження ML у розподіл потужності в PHEV створює основу для інтелектуальної адаптації силового агрегату, орієнтованої на зменшення втрат енергії, покращення характеристик руху та підтримку оптимального балансу енергоспоживання в умовах реальної експлуатації.

Прогностичне керування енергоспоживанням в системах EMS для PHEV. У контексті гібридних електромобілів, що підключаються до мережі, прогностичне енергетичне керування (Predictive Energy Management – PEM) виконує функцію інтелектуального планування розподілу потужності з урахуванням прогнозованих умов руху [8, 22]. Алгоритми машинного навчання, вбудовані в EMS, забезпечують випереджальну оцінку енергетичних потреб транспортного засобу, що дає змогу оптимізувати його роботу у реальному часі.

Основні функціональні можливості PEM:

- прогнозування сценаріїв руху та навантаження – моделі ML, навчені на основі історичних даних (швидкість, профіль маршруту, трафік, погода), формують оцінки майбутнього споживання енергії та стану дорожньої обстановки;

- прогностична оптимізація розподілу енергії – на основі прогнозів система коригує співвідношення між використанням ДВЗ та електричного приводу, зменшуючи витрати пального й покращуючи ефективність акумуляторної системи;

- адаптація в реальному часі – EMS постійно оновлює стратегії керування відповідно до змін навколишнього середовища, актуального стану батареї та умов руху, забезпечуючи стійку та адаптивну роботу енергетичної системи.

У підсумку, PEM на основі ML перетворює EMS на прогностичну систему з адаптивним керуванням, здатну ефективно реагувати на складні багатофакторні умови експлуатації транспортного засобу.

Моніторинг технічного стану тягової батареї в EMS для PHEV. Стан акумуляторної батареї є одним із критичних факторів, що визначають ефективність, надійність і безпечність експлуатації PHEV. Інтеграція методів машинного навчання у процеси моніторингу стану батареї (Battery State-of-Health Monitoring – BSHM) дозволяє EMS здійснювати глибоку оцінку параметрів деградації та динамічно адаптувати стратегії енергоспоживання.

Основні складові BSHM на основі ML:

- збір даних у реальному часі – система управління батареєю безперервно реєструє показники напруги, струму, температури, а також параметри циклів зарядки/розрядки;

- прогностичне моделювання – ML-моделі оцінюють поточний технічний стан

батареї, прогнозують залишковий ресурс та виявляють потенційні відхилення в її роботі;

- методи аналізу (регресійне моделювання, аналіз часових рядів, моделі виявлення аномалій).

Отже, поєднання системи керування батареєю і ML-алгоритмів забезпечує адаптивне управління ресурсами енергосистеми, продовжуючи термін служби батареї та підвищуючи загальну ефективність PHEV.

Адаптивні стратегії керування на основі машинного навчання в EMS для PHEV. Досягнення енергетичної ефективності в PHEV в умовах динамічного дорожнього середовища та змінного стану тягової батареї потребує впровадження адаптивних стратегій керування [23]. Традиційні підходи виявляються недостатньо гнучкими, особливо в умовах багатофакторного впливу. Застосування машинного навчання дозволяє реалізувати стратегії, що враховують індивідуальні умови руху й адаптують розподіл енергії в реальному часі.

Ключові функціональні елементи адаптивного керування:

- інтелектуальна обробка телеметричних даних – EMS постійно аналізує потік даних про швидкість, прискорення, заряд батареї, рельєф маршруту та метеоумови;

- ML-моделі прогнозування – алгоритми прогнозують майбутні енергетичні навантаження (наприклад, підйоми, затори, розгони) та розраховують оптимальну стратегію керування. Це забезпечує ефективне поєднання електричного приводу та ДВЗ;

- динамічне керування енергією – EMS у реальному часі коригує розподіл потужності, реалізуючи перевагу електричного приводу при низькому навантаженні, залучення ДВЗ при пікових навантаженнях, адаптивні стратегії заряджання/розряджання з урахуванням технічного стану батареї.

Запровадження ML-алгоритмів в EMS дозволяє забезпечити багатокритеріальну оптимізацію: зниження витрат пального, продовження терміну служби батареї та підвищення динамічної ефективності транспортного засобу у змінних умовах експлуатації.

Інтелектуальне керування залученням альтернативної енергії з навколишнього середовища. Окрім рекуперативного гальмування, сучасні PHEV мають потенціал до залучення альтернативної енергії з довкілля – зокрема сонячної або вібраційної. Інтеграція систем збору даних про параметри середо-

вища із алгоритмами ML дозволяє прогнозувати доцільність та ефективність використання таких джерел енергії в режимі реального часу.

Ключові етапи реалізації:

- збір екологічної інформації – датчики фіксують параметри навколишнього середовища, зокрема інтенсивність сонячної радіації та рівень вібрацій від дорожнього покриття (для потенційної генерації енергії за допомогою п'єзоелектричних елементів);

- прогностичний аналіз із застосуванням ML, включає оцінку потенціалу сприятливих умов для перетворення енергії та визначення оптимального механізму перетворення (наприклад, шляхом застосування фотоелектричних панелей);

- розподіл енергії в EMS: доповнення рекуперації; заряджання батареї в умовах низького навантаження (наприклад, затори, спуски); посилення тяги під час інтенсивних навантажень (обгони, підйоми).

Застосування ML у поєднанні з джерелами навколишнього середовища дозволяє підвищити енергетичну автономність PHEV, зменшити споживання пального та підвищити загальну ефективність транспортного засобу без зміни його конструкції.

Оптимізація рекуперативного гальмування в EMS для PHEV із застосуванням ML. Рекуперативне гальмування є ключовим механізмом повернення енергії в електрифікованих транспортних засобах (HEV/PHEV). Проте ефективність цього процесу значною мірою залежить від точності керування розподілом гальмівного зусилля. Застосування алгоритмів ML в системах EMS дозволяє досягти вищого рівня адаптації та відновлення енергії [35].

Ключові елементи реалізації:

- аналіз телеметричних даних в реальному часі – EMS постійно обробляє дані про швидкість, інтенсивність уповільнення, рівень заряду батареї, дорожнє покриття та навантаження;

- прогнозування на основі ML-моделей: оцінка потенціалу рекуперації (визначення обсягу відновлюваної енергії з урахуванням кінетики руху), баланс гальмівних зусиль (адаптивне співвідношення рекуперативного та фрикційного гальмування для досягнення максимальної ефективності без компромісів у безпеці);

- динамічне керування у реальному часі:

- пріоритет електричного гальмування на низьких швидкостях і при плавному уповільненні;
- залучення фрикційних гальм у випадках екстреного гальмування або високої швидкості;
- контроль швидкості заряджання батареї для уникнення перенапруги або деградації елементів.

Отже, ML-підходи до оптимізації рекуперації дозволяють зменшити втрати енергії, продовжити ресурс акумулятора та забезпечити комфортне та безпечне гальмування в режимах реальної експлуатації.

Персоналізоване керування енергоспоживанням у PHEV на основі аналізу стилю во-

діння. Для забезпечення максимальної ефективності роботи EMS у гібридних транспортних засобах важливо враховувати індивідуальні особливості стилю керування [36]. Застосування алгоритмів ML дає змогу адаптувати стратегії керування енергією відповідно до поведінкових шаблонів конкретного водія.

Основні функціональні етапи:

- збір користувацьких даних – EMS фіксує динаміку прискорень, гальмування, середню швидкість, частотність заряджання, маршрути та часові шаблони використання;
- формування індивідуального нижче (рис. 2).



Рис. 2. Основні алгоритми машинного навчання, що застосовуються в EMS для PHEV

Розглянуті передові стратегії машинного навчання демонструють здатність ефективно адаптуватися до змінних та непередбачуваних умов руху використовуючи низку ключових механізмів. Завдяки використанню великих масивів експлуатаційних даних та вхідних сигналів у режимі реального часу ці алгоритми здатні динамічно адаптуватися до зміню-

ваних сценаріїв, забезпечуючи стабільну енергоефективність і динамічні характеристики за різних умов експлуатації транспортного засобу [37]. Зокрема, методи навчання з підкріпленням дозволяють системі безперервно навчатися на основі зворотного зв'язку з реального світу та оптимізувати стратегії управління. У свою чергу, прогностичні моделі пе-

редбачають майбутні енергетичні потреби та забезпечують раціональний розподіл ресурсів. Додатково, модульний підхід, що передбачає поділ складного завдання на взаємопов'язані підзадачі із залученням спеціалізованих контролерів, підвищує гнучкість і стійкість системи [24]. Із розвитком обчислювальних потужностей ефективність таких стратегій зростатиме, що сприятиме підвищенню енергоефективності та надійності PHEV у різноманітних режимах експлуатації.

Прогрес у сфері машинного навчання зумовив істотне зростання енергоефективності, покращення експлуатаційних характеристик і підвищення рівня персоналізації систем керування енергією в PHEV. У центрі цих змін – здатність ML-алгоритмів обробляти великі обсяги даних, включаючи шаблони керування, рівень заряду батареї та параметри транспортного засобу в режимі реального часу. Це дозволяє системам EMS приймати обґрунтовані рішення щодо розподілу потужності, забезпечуючи точну оптимізацію енергоспоживання та досягнення максимальної ефективності.

Висновки

Розглянуті в роботі сучасні стратегії машинного навчання демонструють високу здатність до адаптації в умовах змінних і непередбачуваних сценаріїв експлуатації PHEV, забезпечуючи стійку та ефективну роботу енергетичних підсистем. Завдяки обробці великих обсягів історичних і телеметричних даних у режимі реального часу, ML-алгоритми формують адаптивні моделі керування, які дозволяють системам EMS динамічно реагувати на зміну дорожніх, кліматичних і експлуатаційних умов. Зокрема, методи навчання з підкріпленням забезпечують безперервне вдосконалення політик керування на основі зворотного зв'язку з навколишнім середовищем. Прогностичні моделі дають змогу передбачати майбутні енергетичні потреби та здійснювати випереджальне керування ресурсами. Модульний підхід до реалізації EMS – через поділ завдання на функціональні підзадачі з окремими контролерами – підвищує гнучкість, масштабованість і надійність енергетичної системи. Із розвитком обчислювальних потужностей ефективність таких стратегій зростатиме, що сприятиме підвищенню енергоефективності та надійності PHEV у різноманітних режимах експлуатації.

Результати дослідження підтверджують доцільність інтеграції ML у системи управління енергією PHEV. Водночас залишаються актуальними питання адаптації моделей до реальних умов, зменшення обчислювального навантаження, забезпечення надійності в умовах невизначеності – що окреслює пріоритетні напрями подальших досліджень.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Munsu, M. S., & Chaoui, H. (2024). Energy management systems for electric vehicles: A comprehensive review of technologies and trends. *IEEE Access*, 12, 60385–60403. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3371483>
2. T. Tiong, I. Saad, K. T. K. Teo and H. b. Lago, "Deep Reinforcement Learning with Robust Deep Deterministic Policy Gradient", 2020 2nd International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE), Kuala Lumpur, Malaysia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECIE50279.2020.9309539
3. Khalid, J., Anwari, M., Khan, M., & Hidayat, T. (2022). Efficient load frequency control of renewable integrated power system: A twin delayed DDPG-based deep reinforcement learning approach. *IEEE Access*, 10, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174625>
4. Habib, M., Ahmed, K., Suhan, A., Vadher, A., Arefin, M., Tanvir, M. S., Rizvee, S., & Swapno, M. (2021). Recent progress in energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle. In *Advances in Energy Research*. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4321-7_60
5. Munsu, M., & Joshi, R. (2024). Comprehensive analysis of fuel cell electric vehicles: Challenges, powertrain configurations, and energy management systems. *IEEE Access*, 12, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3472704>
6. Xi, J., Ma, J., Wang, T., & Gao, J. (2023). Research on energy management strategy of a hybrid commercial vehicle based on deep reinforcement learning. *World Electric Vehicle Journal*, 14(10), 294. <https://doi.org/10.3390/wevj14100294>
7. Wang, C., Liu, R., & Tang, A. (2022). Energy management strategy of hybrid energy storage system for electric vehicles based on genetic algorithm optimization and temperature effect. *Journal of Energy Storage*, 51, 104314. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104314>
8. Hajimiri, M. H., & Salmasi, F. R. (2006). A fuzzy energy management strategy for series hybrid

- electric vehicle with predictive control and durability extension of the battery. In 2006 IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles (1–5). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICEHV.2006.352279>
9. Nivolianiti, E., Karnavas, Y. L., & Charpentier, J.-F. (2024). Fuzzy logic-based energy management strategy for hybrid fuel cell electric ship power and propulsion system. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 1813.
<https://doi.org/10.3390/jmse12101813>
10. Cheng, R., & Dong, Z. (2015). Modeling and simulation of plug-in hybrid electric powertrain system for different vehicular application. In *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (pp. 1–7). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/VPPC.2015.7352976>
11. Lechowicz, A., & Augustynowicz, A. (2013). Modeling and simulation of the hybrid powertrain for the use in buggy vehicle. In *International Symposium on Electrodynamics and Mechatronic Systems, SELM 2013 - Proceedings* (pp. 43–44). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/SELM.2013.6562971>
12. Keegan, G., Nelendran, P., & Oluwafemi, O. (2024). Modeling and simulation of hybrid electric vehicles for sustainable transportation: Insights into fuel savings and emissions reduction. *Energies*, 17, 5225.
<https://doi.org/10.3390/en17205225>
13. Chou, J., & Chung, W.-C. (2024). Cloud computing and high performance computing (HPC) advances for next generation internet. *Future Internet*, 16, 465. <https://doi.org/10.3390/fi16120465>
14. Sathupadi, K., Achar, S., Bhaskaran, S. V., Faruqui, N., Abdullah-Al-Wadud, M., & Uddin, J. (2024). Edge-cloud synergy for AI-enhanced sensor network data: A real-time predictive maintenance framework. *Sensors*, 24, 7918.
<https://doi.org/10.3390/s24247918>
15. Alternative Fuels Data Center. (n.d.). How do plug-in hybrid electric cars work?
<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-plug-in-hybrid-electric-cars-work>
16. Munsu, M. S., & Chaoui, H. (2024). Energy management systems for electric vehicles: A comprehensive review of technologies and trends. *IEEE Access*, 12, 60385–60403.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3371483>
17. Zeng, Y., Huang, Z., Cai, Y., Liu, Y., Xiao, Y., & Shang, Y. (2018). A control strategy for driving mode switches of plug-in hybrid electric vehicles. *Sustainability*, 10, 4237.
<https://doi.org/10.3390/su10114237>
18. Wu, G., Zhang, X., & Dong, Z. (2015). Powertrain architectures of electrified vehicles: Review, classification and comparison. *Journal of the Franklin Institute*, 352(2), 425–448.
<https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.04.018>
19. Qi, X., Wu, G., Boriboonsomsin, K., & Barth, M. (2016). Development and evaluation of an evolutionary algorithm-based online energy management system for plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1–11.
<https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2633542>
20. Liu, Y., Wu, Y., Wang, X., Li, L., Zhang, Y., & Chen, Z. (2023). Energy management for hybrid electric vehicles based on imitation reinforcement learning. *Energy*, 263(Part C), 125890.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125890>
21. Mittal, V., & Shah, R. (2024). Energy management strategies for hybrid electric vehicles: A technology roadmap. *World Electric Vehicle Journal*, 15, 424.
<https://doi.org/10.3390/wevj15090424>
22. Sun, X., Fu, J., Yang, H., Xie, M., & Liu, J. (2023). An energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles based on deep learning and improved model predictive control. *Energy*, 269, 126772.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126772>
23. Mechichi, O., Trigui, R., & Ouni, L. (2022). Adaptive λ -control strategy for plug-in HEV energy management using fast initial multiplier estimate. *Applied Sciences*, 12, 10543.
<https://doi.org/10.3390/app122010543>
24. Recalde, A., Cajo, R., Velasquez, W., & Alvarez-Alvarado, M. S. (2024). Machine learning and optimization in energy management systems for plug-in hybrid electric vehicles: A comprehensive review. *Energies*, 17, 3059.
<https://doi.org/10.3390/en17133059>
25. Alyakhni, A., Boulon, L., Vinassa, J.-M., & Briat, O. (2021). A comprehensive review on energy management strategies for electric vehicles considering degradation using aging models. *IEEE Access*, 9, 143922–143940.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120563>
26. Hua, M., Shuai, B., Zhou, Q., Wang, J., He, Y., & Xu, H. (2023). Recent progress in energy management of connected hybrid electric vehicles using reinforcement learning. *arXiv*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.14602>
27. Choi, Y., Guanetti, J., Moura, S., & Borrelli, F. (2020). Data-driven energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles with real-world trip information. *IFAC-PapersOnLine*, 53, 14224–14229.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1070>
28. Gong, C., Xu, J., & Lin, Y. (2024). Plug-in hybrid electric vehicle energy management with clutch engagement control via continuous-discrete reinforcement learning. *Energy Technology*, 12, 2301512.
<https://doi.org/10.1002/ente.202301512>
29. Wu, X., Wedernikow, E., Nitsche, C., & Huber, M. (2023). Towards optimal energy management strategy for hybrid electric vehicle with

- reinforcement learning. arXiv.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.12365>
30. Lee, S., Seon, J., Hwang, B., Kim, S., Sun, Y., & Kim, J. (2024). Recent trends and issues of energy management systems using machine learning. *Energies*, 17(3), 624.
<https://doi.org/10.3390/en17030624>
 31. Singh, R., Utkurovich, K., Alkhayyat, A., Saritha, G., Jayadurga, R., & Waghulde, K. (2024). Machine learning applications in energy management systems for smart buildings. *E3S Web of Conferences*, 540, 08002.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454008002>
 32. Akram, A., Abbas, S., Khan, M., Athar, A., Ghazal, T., & Al Hamadi, H. (2024). Smart energy management system using machine learning. *Computers, Materials & Continua*, 78, 959–973.
<https://doi.org/10.32604/cmc.2023.032216>
 33. Chen, Z., Gu, H., Shen, S., & Shen, J. (2022). Energy management strategy for power-split plug-in hybrid electric vehicle based on MPC and double Q-learning. *Energy*, 245, 123182.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123182>
 34. Nassar, M. Y., Shaltout, M. L., & Hegazi, H. A. (2023). Multi-objective optimum energy management strategies for parallel hybrid electric vehicles: A comparative study. *Energy Conversion and Management*, 277, 116683.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116683>
 35. Nayak, N., & Satpathy, A. (2025). An adaptive energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) utilizing real-time speed profiles and optimized battery discharge levels. *Energy Storage and Saving*.
<https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.11.011>
 36. Ma, Y., Wang, P., & Sun, T. (2021). Research on energy management method of plug-in hybrid electric vehicle based on travel characteristic prediction. *Energies*, 14, 6134.
<https://doi.org/10.3390/en14196134>
 37. Chen, C., Wang, X., Xie, Z., Lei, Z., & Shangguan, C. (2024). Research on plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) energy management strategy with dynamic planning considering engine start/stop. *World Electric Vehicle Journal*, 15, 350.
<https://doi.org/10.3390/wevj15080350>

Трунова Ірина Сергіївна¹, к.т.н., доц. каф. авто-мобільної електроніки, тел. +38 0677240653,
 e-mail: trunova.irinaser@gmail.com,
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0986-4115>

Тараненко Нікіта Валерійович¹, студент авто-мобільного факультету ХНАДУ,
 e-mail: trunova.irinaser@gmail.com
 тел. +38 0990002132.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Research on machine learning methods for energy consumption optimization in plug-in hybrid electric vehicles

Abstract. Problem. The growing demand for sustainable and energy-efficient transportation has intensified interest in plug-in hybrid electric vehicles as an effective alternative to conventional internal combustion engine vehicles. However, the efficiency and flexibility of these systems are significantly constrained by traditional energy management strategies, which lack adaptability to real-world dynamic driving conditions, road scenarios, and individual driving styles. The need for real-time, predictive, and intelligent control algorithms has become critical to optimize energy use, reduce fuel consumption, and ensure the stability of hybrid propulsion systems. **Goal.** The objective of this study is to analyze and systematize state-of-the-art machine learning methods for optimizing energy management systems in plug-in hybrid electric vehicles, to identify the key technical challenges and to outline the prospects for the development of intelligent, adaptive energy management systems capable of real-time decision-making in uncertain and variable environments. **Methodology.** This research is based on a comprehensive review of existing literature and technical implementations, focusing on the use of deep learning, reinforcement learning, and predictive control approaches within energy management systems for plug-in hybrid electric vehicles. The study investigates architectural configurations of plug-in hybrid electric vehicles powertrains, their operational modes, functional requirements of energy management systems, and evaluates machine learning algorithms for power distribution optimization, battery health monitoring, predictive energy control, and personalized driving strategies. **Results.** The analysis confirms that machine learning-enhanced energy management systems can significantly improve fuel economy, adaptability, and operational reliability under varying road and climatic conditions. Reinforcement learning methods enable continuous policy improvement, predictive models allow proactive energy flow planning, and modular energy management systems architectures enhance system scalability and fault tolerance. The integration of machine learning also facilitates fault detection, battery degradation prediction, and utilization of alternative energy sources such as solar or vibrational energy. These solutions collectively contribute to more intelligent and efficient energy management in modern hybrid vehicles. **Originality.** This study offers a structured classification of machine learning applications in energy management systems for plug-in hybrid electric vehicles, substantiates the advantages of modular

control system architectures, and introduces a novel perspective on incorporating behavioral analysis of driver style into energy management systems strategy personalization. It also highlights underexplored areas such as the use of environmental energy inputs (solar, piezoelectric) and outlines methodological considerations for their integration using predictive analytics. **Practical value.** The findings provide a foundation for the design of next-generation energy management systems in hybrid vehicles, contributing to enhanced fuel efficiency, extended battery life, and improved environmental performance. The proposed insights can be used by researchers and developers to implement intelligent control systems, reduce development time, and align plug-in hybrid electric

vehicle design with smart mobility and sustainability goals.

Keywords: plug-in hybrid electric vehicle, energy management system, machine learning, power optimization, predictive control, adaptive strategies.

Trunova Iryna¹, Ph.D., Assoc. Prof. Vehicle Electronics Department, tel. +38 0677240653, e-mail: trunova.irinaserg@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0986-4115>.

Taranenko Nikita¹, student of the Automobile Faculty, tel. +38 0990002132, e-mail: trunova.irinaserg@gmail.com

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

До визначення стійкості автомобіля категорії M1 з причепом категорії O2 у гальмівному режимі

Онищук В.П.¹, Стельмашук С. В.¹, Стельмашук В.В.¹

¹Луцький національний технічний університет

Анотація. Безпечність автопоїздів M1 з причепами O2 залишається критично важливою через зростання їх використання приватними користувачами. Нерівномірний розподіл гальмівних сил та неправильне завантаження можуть призводити до втрати стійкості. Досліджено вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість автопоїзда Mercedes-Benz Sprinter з причепом ПВБФ 15 методом математичного моделювання. Встановлено, що стійкість обмежується тяговим автомобілем, який втрачає стійкість при коефіцієнті нерівномірності 0,7, тоді як причіп залишається стійким у діапазоні 0,53-1,0. Збільшення завантаженості покращує стійкість, а підвищення центру мас понад 0,35 критично знижує безпечність. Вперше комплексно досліджено взаємозв'язок між гальмівними силами, завантаженістю та геометрією в контексті загальної стійкості. Результати використовуються для вдосконалення нормативів та створення систем безпеки.

Ключові слова: автопоїзд, причіп, гальмування, коефіцієнт нерівномірності, коефіцієнт стійкості, шлях гальмування, уповільнення, стійкість.

Вступ

Ефективність використання рухомого складу автомобільного транспорту та його продуктивність залежать від вантажопідйомності, середньої швидкості руху, а також комплексу техніко-експлуатаційних характеристик, що проявляються під час експлуатації та визначають його придатність до роботи в конкретних умовах.

Особливо важливим фактором продуктивності, зокрема для автопоїздів, є їхня рухливість. Її підвищення досягається збільшенням швидкості руху, а також покращенням тягово-швидкісних і гальмівних характеристик.

Сучасний розвиток автомобільного транспорту характеризується різноманіттям конструкцій: поряд із традиційними двовісними автомобілями з передніми керованими колесами все більше поширюються моделі з альтернативними компоновальними схемами та системами управління. Очевидно, що нові транспортні засоби мають унікальні особливості, які визначають необхідність надання їм певних експлуатаційних якостей, особливо тих, що впливають на безпеку руху.

Сучасні автомобілі категорії M1 обладнані комплексом електронних систем активної безпеки, які кардинально змінюють підходи до забезпечення стійкості та керованості. До таких систем належать: система курсової стійкості (Electronic Stability Program, ESP), антиблокувальна система (Anti-lock Braking System, ABS), електронний розподіл гальмівних зусиль (Electronic Brakeforce Distribution, EBD), система допомоги при гальмуванні (Brake Assist System, BAS) та превентивні системи гальмування [1, 2]. Ці технології здатні значно покращити стійкість та керованість транспортного засобу, проте їх ефективність у складі автопоїзда з причепом категорії O2, особливо з інерційною гальмівною системою, потребує додаткового дослідження та верифікації [3].

Безпечність руху автомобілів і автопоїздів значною мірою залежить від їхніх динамічних характеристик, зокрема гальмівних властивостей, маневреності, стійкості та керованості. У різних експлуатаційних умовах (транспортних і дорожніх) пріоритетними стають різні

параметри. Наприклад, для автопоїздів з причепами категорій O1 і O2, що використовуються приватними підприємцями та аматорами, особливо важливим є забезпечення стійкості під час гальмування [4].

Дослідження показують, що стійкість артикульованих транспортних засобів залежить від складної взаємодії між статичними та динамічними факторами [4], а несиметричне завантаження причепа може призводити до нерівномірного розподілу навантаження на осі та колеса, що, у свою чергу, впливає на керованість і стабільність руху [5]. Особливої уваги потребує інтеграція сучасних електронних систем стійкості з традиційними інерційними гальмівними системами причепів, оскільки ця взаємодія може як покращити, так і ускладнити забезпечення загальної стійкості автопоїзда [1].

Саме ці аспекти визначають актуальність подальших досліджень у цій сфері, особливо в контексті зростання популярності використання автопоїздів категорії M1+O2 у приватному секторі та необхідності адаптації існуючих нормативних вимог до сучасних технологічних реалій.

Аналіз публікацій

Проведеними раніше дослідженнями встановлено, що практично всі параметри автомобіля і причіпних ланок впливають на керованість і стійкість руху автопоїзда. Цей вплив пов'язаний з геометричними параметрами й положенням центру мас автомобіля, характеристиками шин, числом осей і розміщенням їх по базі, прийнятою схемою системи управління автопоїзда [6]. Сучасні дослідження підтверджують складність взаємозв'язків між статичною та динамічною стійкістю артикульованих транспортних засобів, демонструючи необхідність комплексного підходу до їх аналізу [4].

Характер руху автопоїзда принципово відрізняється від руху одиничного автомобіля. Відмінність можна пояснити наявністю додаткових зусиль, що виникають у шарнірному з'єднанні ланок транспортного засобу, а також сил і моментів, які діють на його окремі ланки та рух транспортного засобу в цілому. Особливо помітним є їх вплив при гальмуванні автопоїзда, яке може супроводжуватися складанням ланок та втратою стійкості транспортного засобу [7]. Це пояснюється тим, що у процесі гальмування на автомобіль діють

сили та моменти в різних площинах та напрямках. Під їх впливом змінюється навантаження окремих коліс. Вплив бічних сил призводить до перевантаження коліс одного борту транспортного засобу, а також може спричинити відведення або ковзання його коліс. Це може призвести до появи обертового моменту у горизонтальній площині. Поява такого моменту може спричинити занос транспортного засобу, а при гальмуванні автопоїзда – складання його ланок [7-10].

Останні дослідження значно розширили розуміння методів оцінки динамічної стійкості автопоїздів. Zhu et al. [11] представили комплексний аналіз методів оцінки динамічної стійкості довгих автопоїздів, підкресливши важливість використання як частотних, так і часових характеристик для точної оцінки стійкості. Vempaty et al. [3] надали всебічний огляд схем контролю для покращення бічної стійкості комбінацій автомобіль-причіп, систематизувавши підходи від пасивних до активних систем управління.

Це обумовило, що в якості критеріїв стійкості руху автомобілів та автопоїздів у різних режимах руху використовують кутові та лінійні відхилення транспортних засобів від заданої траєкторії руху; бічні відхилення траєкторії причіпної ланки від траєкторії автомобіля-тягача, максимальне значення яких не повинно перевищувати $\pm 3\%B_g$ (B_g – габаритна ширина ланки); кут складання автопоїзда. Крім того, ще одним показником стійкості автопоїзда у гальмівному режимі може бути обрано значення граничної швидкості, з якою автомобіль може рухатися в заданих умовах.

Розвиток електронних систем управління привів до появи нових підходів до забезпечення стійкості автопоїздів. De Bernardis et al. [12] розробили систему нелінійного модельного прогностичного контролю прямого моменту рискання для пом'якшення коливань причепа, демонструючи ефективність превентивних алгоритмів управління. Parra et al. [2] запропонували концепцію превентивного контролю стійкості транспортного засобу, що дозволяє прогнозувати критичні ситуації та втручатися до їх виникнення.

Abroshan et al. [13] представили модельний прогностичний підхід до стабілізації тягач-причіп із використанням диференційного гальмування з експериментальною верифікацією, підтвердивши практичну ефективність таких систем. Guo et al. [14] розробили інтегровану систему контролю гальмування-керування для комбінацій тягач-напівпричіп в

екстрених маневрах зміни смуги, що демонструє потенціал координованого управління різними підсистемами транспортного засобу.

Сучасні дослідження також звертають увагу на вплив зовнішніх факторів на стійкість автопоїздів. Zhou et al. [15] дослідили управління бічною стійкістю комбінацій вантажівка з центральноосьовим причепом під дією бічних вітрових збурень, що особливо актуально для високошвидкісного руху на відкритих ділянках доріг. Synák та Jakubovičová [5] провели комплексну оцінку ризиків, що виникають від причепа, під'єднаного до легкового автомобіля, підкреслюючи специфічні проблеми категорії M1+O2.

Heißing та Ersoy [1] представили детальний огляд систем електронного контролю стійкості для легких комбінацій транспортний засіб-причіп, акцентуючи увагу на особливостях інтеграції ESP систем з інерційними гальмівними системами причепів. Amoroso та Sebon [16] розробили стратегію керування поворотом артикульованих транспортних засобів за допомогою гальмового приводу, що відкриває нові можливості для покращення маневреності важких автопоїздів.

Окрім згаданих факторів, не менш вагомим на стійкість автопоїзда у гальмівному режимі є вплив бортової нерівномірності гальмівних сил. Нерівномірність може виникнути внаслідок порушень регулювання гальмівних механізмів або через вплив зовнішніх факторів (потрапляння вологи, пилу, бруду на робочі поверхні гальмівних механізмів; дефекти у виготовленні гальмівних накладок та ін.). У роботах [17-23] автори акцентують увагу на негативному впливі бортової нерівномірності гальмівних сил на стійкість автомобіля через появу обертового моменту в горизонтальній площині. Автори роботи [22] стверджують, що обертовий момент, спричинений бортовою нерівномірністю гальмівних сил, призводить до бокового відхилення автомобіля навіть при незаблокованих колесах будь-якої осі. На думку дослідників, небезпечною є втрата стійкості автомобіля при гальмуванні без блокування коліс через виникнення бічного відведення транспортного засобу, спричиненого бортовою нерівномірністю гальмівних сил. Науковці стверджують, що в даному випадку навіть антиблокувальна система не в змозі запобігти боковому зміщенню автомобіля та зміні його курсового кута.

В процесі експлуатації автопоїздів особливо небезпечними є екстрені гальмування,

оскільки вони, в більшості випадків, супроводжуються блокуванням коліс. В роботах [21-23] доведено, що навіть для одиничних автомобілів при гальмуванні із заблокованими задніми колесами нерівномірність на передній осі не допустима, оскільки вона спричиняє занос транспортного засобу. Автори роботи [24] стверджують про небезпечність з точки зору стійкості екстреного гальмування транспортного засобу з бортовою нерівномірністю гальмівних сил. Дослідники наголошують, що зі збільшенням початкової швидкості гальмування та нерівномірності дії гальмівних механізмів коліс однойменних осей автомобілів та автопоїздів, значно зростають величина гальмівного шляху, а також поперечні та кутові відхилення транспортних засобів.

Проведений аналіз дозволив з'ясувати, що проблема стійкості руху автомобільних поїздів у гальмівному режимі досліджена достатньо повно на рівні фундаментальних принципів. Проте, меншою мірою досліджені питання стійкості гальмування автопоїзда з урахуванням розподілу гальмівних сил по осях та бортах автопоїзда та розташування вантажу в кузові причепа. Особливої уваги потребує вивчення спільного впливу даних факторів в контексті інтеграції з сучасними електронними системами безпеки.

Сучасні дослідження показують тенденцію до розробки інтелектуальних та адаптивних систем управління стійкістю, які здатні в реальному часі адаптуватися до змінних умов експлуатації та характеристик навантаження. Однак залишається недостатньо вивченим питання оптимальної інтеграції таких систем з традиційними інерційними гальмівними системами причепів категорії O2, що становить актуальний напрям для подальших досліджень.

Згідно із нормативним документом [22] основними критеріями стійкості та ефективності гальмування транспортних засобів є: лінійне відхилення від коридору руху, шириною 3,5 м; загальна питома гальмівна сила γ_z ; коефіцієнт нерівномірності гальмівних сил осі; тривалість спрацювання гальмівної системи; усталене сповільнення $j_{уст}$; гальмівний шлях S_z ; початкова швидкість гальмування V_0 . Водночас, чинні Вимоги до перевірки конструкції та технічного стану колісного транспортного засобу [25] встановлюють, що коефіцієнт нерівномірності гальмівних сил коліс осі для категорії M1 повинен бути не більше

30%. На визначення цих показників і спрямована робота.

Результати дослідження

Оцінено ефективність гальмівної системи автопоїзда за величиною гальмівного шляху S_z при заданій початковій швидкості V_0 та/або середнім значенням уповільнення j_x в ході випробувань, а також показником η_{yi} стійкості, що є відношенням необхідної для гальмування ширини проїжджої частини до мінімально допустимої за умовами безпеки руху [23].

Для автопоїздів у складі тягового автомобіля категорії М1 і двовісного причепа категорії О2 при випробуваннях типу «0» з від'єднаним двигуном нормативи ефективності становлять: $V_0=60$ км/год і $j_x = 6,0$ м/с², причому ця ефективність повинна досягатися за умови, що автопоїзд залишається у смузі руху шириною $B_0 = 3,5$ м за курсового кута $\gamma \leq 15^\circ$, а задні колеса автомобіля не повинні блокуватися раніше передніх коліс при коефіцієнті гальмування $k_z = j_x/g$ від 0,15 до 0,8 [23].

Водночас, згідно з чинними вимогами до перевірки конструкції та технічного стану колісного транспортного засобу [25], коефіцієнт нерівномірності гальмівних сил коліс осі для категорії М1 повинен бути не більше 30%. У цій же роботі [23] показники ефективності гальмування визначені як:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{yai} = 1 - \frac{2|y_a + a_z(b_z)\sin\gamma_a|}{|B_d - B_{az}|} \\ \eta_{yni} = 1 - \frac{2|y_n - d_z\sin\gamma_n|}{|B_0 - B_{nz}|} \\ \eta_{yan} = \min(\eta_{yai}, \eta_{yn}), \end{array} \right. \quad (1)$$

де B_{ag} , B_{nt} – габаритна ширина ланок; a_r , b_r , d_r – відстані від центрів мас до крайніх точок кузова тягового автомобіля і причепа; y_a , y_n – зміщення траєкторії центру мас автомобіля і причепа; γ_a , γ_n – курсові кути автомобіля і причепа.

Аналіз окремих рівнянь системи (2) показав, що показник стійкості може приймати як позитивні, і негативні значення, причому позитивні значення η_y обумовлюють область стійкого, а негативні – нестійкого руху [23].

Порушення стійкості автопоїзда при галь-

муванні може бути викликано появою повертаючих моментів M_{ni} , що виникають внаслідок неоднакової ефективності дії гальмівних механізмів на колесах однойменних осей, яка характеризується коефіцієнтами початкової нерівномірності k_{ni} . Назвемо колесо з більшою ефективністю гальмування "відстаючим", а з меншою – "забігаючим". Тоді:

$$k_{ni} = 1 - R_{xz} / R_{xo}, \quad (2)$$

де R_{xz} , R_{xo} – дотичні реакції на «забігаючому» і «відстаючому» колесах.

Дотичні реакції на колесах осей автопоїзда визначаються як:

$$R_{xi} = Z_i \cdot \varphi_i, \quad (3)$$

де Z_i – нормальна реакція опорної поверхні на колесо і-ої осі; φ_i – коефіцієнт зчеплення і-ого колеса з опорною поверхнею.

Подальші розрахунки виконаємо для автопоїзда у складі тягового автомобіля Mercedes-Benz T1N "Sprinter" і двовісного причепа ПВБФ 15 [16].

Визначено уповільнення і гальмівний шлях автопоїзда за нерівномірності гальмівних сил на осях причепа. Прийнято навантаження на осі автопоїзда з роботи [16], а навантаження на колеса одного борту визначимо, поділивши навантаження на вісь на два колеса.

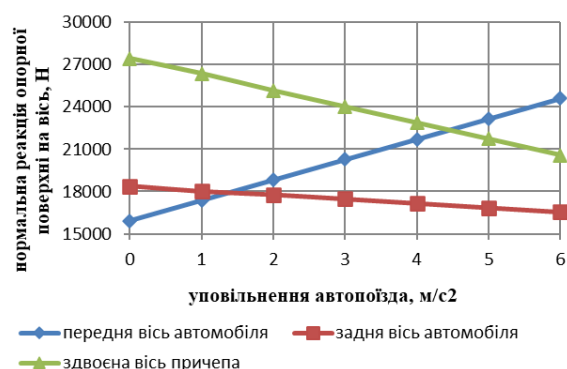


Рис. 1. Зміна навантаження на осі автопоїзда у функції уповільнення [26]

Вважаючи, що нерівномірність гальмівних сил на колесах однієї осі обумовлена зміною навантаження на кожне колесо, отримано:

$$\begin{aligned} P_{zn} &= 0,5G_n \times \varphi + 0,5G_n k_{nn} \times \varphi = \\ &= 0,5G_n \times \varphi(1 + k_{nz}); \end{aligned} \quad (4)$$

$$P_{zan} = G_a \times \varphi + 0,5G_n \times \varphi(1 + \kappa_{nn}), \quad (5)$$

де G_n – навантаження на здвоєну вісь причепа; G_a – навантаження на осі автомобіля; κ_{nn} – коефіцієнт нерівномірності гальмівних сил на осі причепа.

Прирівнявши гальмівні сили причепа і автопоїзда отримано:

$$j_n = \frac{g \times \varphi(1 + \kappa_{nz})}{2}; \quad (6)$$

$$j_{an} = \frac{G_a \times g \times \varphi(1 + \kappa_{nz})}{G_a + G_n}.$$

Гальмівний шлях автопоїзда визначиться як:

$$S_{zan} = \frac{G_{an} \times v^2}{2 \times g \times P_{zan}} = \frac{v^2}{2 \times j_{an}}. \quad (7)$$

Результати розрахунків уповільнення і шляху гальмування представимо на рис. 2, 3.

Аналіз розрахунків, рис. 2, показує, що тільки за коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на осях причепа $\kappa_{nn} = 0,82$ автопоїзд відповідає вимогам нормативних документів ($V_0 = 60$ км/год, $j_{an} = 6,0$ м/с²). Разом з тим, за величиною гальмівного шляху навіть за коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на осях причепа $\kappa_{nn} = 0,5$ автопоїзд відповідає вимогам нормативних документів ($V_0 = 60$ км/год, $S_r = 33,9$ м). Із цього слідує, що для забезпечення вимог нормативних документів щодо ефективності гальмування автопоїзда нерівномірність гальмівних сил на осях причепа не повинна перевищувати $\kappa_{nn} = 0,82$.

Стійкість автопоїзда будемо оцінювати коефіцієнтами ефективності гальмування (1), для визначення яких необхідно знати зміщення траєкторії автомобіля і причепа (відносно прямолінійного руху автопоїзда), а також їх курсового кута в процесі гальмування. Ці параметри були отримані шляхом розв'язку системи диференціальних рівнянь руху автопоїзда в режимі гальмування [27], рис. 3 і 4.

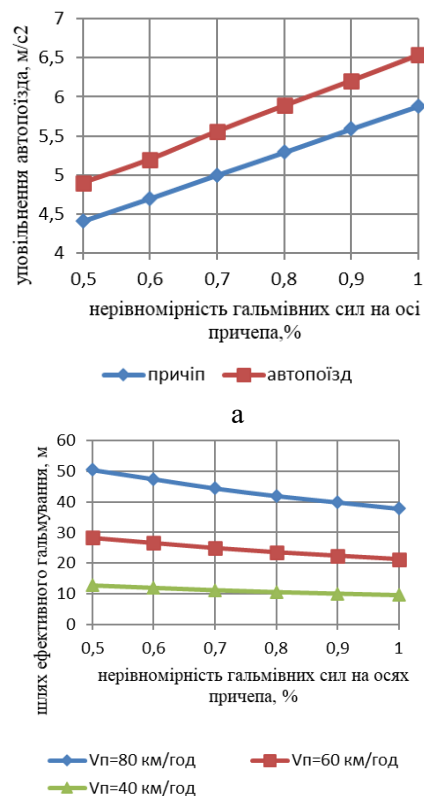


Рис. 2. Зміна уповільнення причепа і автопоїзда: а – і гальмівного шляху автопоїзда; б – в залежності від нерівномірності гальмівних сил на осях причепа

Стійкість автопоїзда будемо оцінювати коефіцієнтами ефективності гальмування (1), для визначення яких необхідно знати зміщення траєкторії автомобіля і причепа (відносно прямолінійного руху автопоїзда), а також їх курсового кута в процесі гальмування. Ці параметри були отримані шляхом розв'язку системи диференціальних рівнянь руху автопоїзда в режимі гальмування [27], рис. 3, 4.

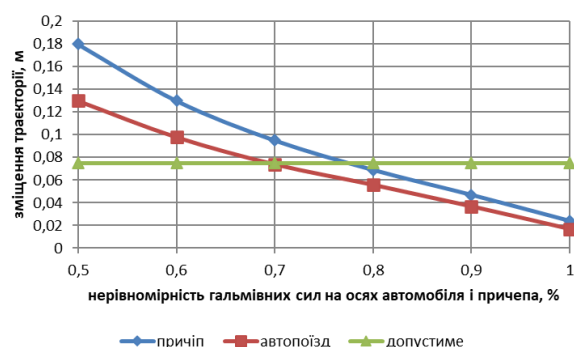


Рис. 3. Зміщення траєкторії автомобіля і причепа від коефіцієнта нерівномірності гальмування

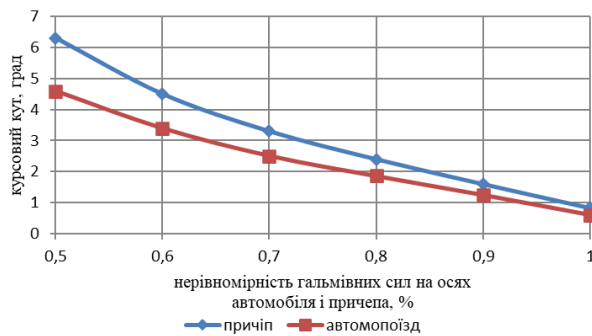


Рис. 4. Зміщення курсового кута автомобіля і причепа від коефіцієнта нерівномірності гальмування

Ці параметри були використані для визначення коефіцієнта стійкості автомобіля, причепа і автопоїзда в гальмівному режимі в залежності від нерівномірності гальмівних сил на осях автомобіля і причепа, рис. 5. Як слідує з наведеного рисунка, автопоїзд втрачає стійкість із-за нестійкості тягового автомобіля за коефіцієнта нерівномірності гальмівних зусиль на його колесах на рівні 0,7. У той же час причіп залишається стійким майже у всьому діапазоні нерівномірності гальмівних зусиль від 0,53 до 1,0, тобто обмежуючим фактором при гальмуванні автопоїзда за стійкістю руху є тяговий автомобіль.

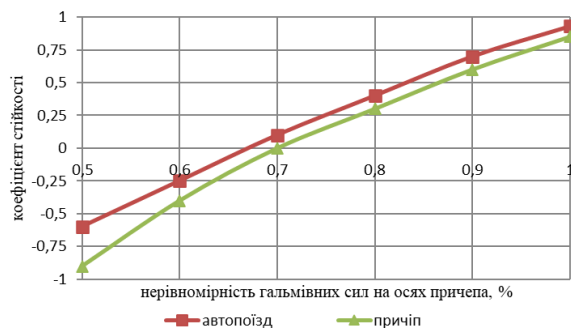


Рис. 5. Зміна коефіцієнта стійкості автомобіля, причепа і автопоїзда в залежності від коефіцієнта нерівномірності гальмівних зусиль на осях

Розглянуто далі вплив конструктивних параметрів причепа на стійкість автопоїзда в процесі гальмування. Змінювалися такі параметри:

- завантаженість в межах від 0 до 2800 кг,
- відносну висоту центру мас причепа в межах від 0,2 до 0,5.

Результати розрахунків наведені на рис. 6 і 7.

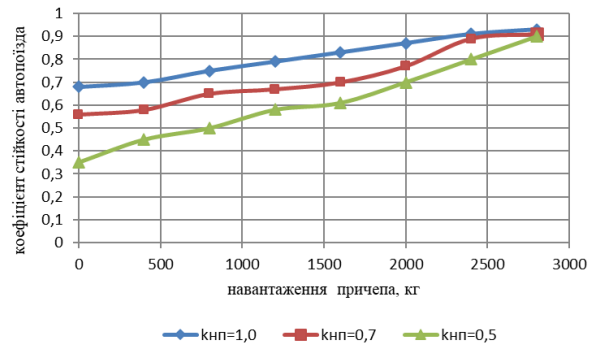


Рис. 6. Зміна коефіцієнта стійкості автопоїзда від завантаженості причепа

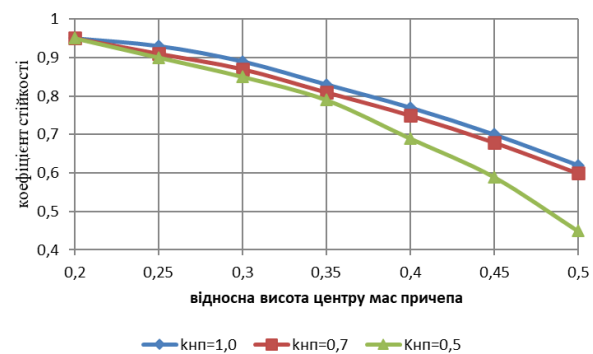


Рис. 7. Зміна коефіцієнта стійкості автопоїзда від відносної висоти центру мас причепа

Як слідує з даних рис. 6, збільшення завантаженості причепа призводить до збільшення коефіцієнта стійкості причепа за різних значень коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на колесах його осей. Це свідчить про те, що найгірші показники стійкості притаманні автопоїзду з причепом без вантажу. Це необхідно враховувати при експлуатації автопоїзда.

Аналіз даних, рис. 7, показує на суттєву залежність коефіцієнта стійкості причепа від висоти його центру мас. Так, якщо за відносної висоти центру мас причепа в межах 0,2 коефіцієнт стійкості незалежно від коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на його осях наближається до 1,0, тобто стійкість такого причепа повністю забезпечується. Поряд з цим, важливо відмітити ще два такі фактори. Перший полягає в тому, що за відносної висоти центру мас в межах 0,2...0,35 коефіцієнт стійкості автопоїзда майже не залежить від нерівномірності гальмівних сил на його колесах. Пояснюється це тим, що за незначної висоти центру мас довантаження і розвантаження коліс бортів є несуттєвим, внаслідок чого зменшуються зміщення траєкторії причепа і курсовий кут, що призводить до підвищення коефіцієнта стійкості. Цей ефект вра-

часться по мірі подальшого підвищення висоти центру мас причепа і за відносної її значення $k_{nn}=0,5$ коефіцієнт стійкості автопоїзда майже у двічі зменшується.

Обговорення результатів

Безпечний рух автомобіля і автопоїзда багато в чому визначається його динамічними властивостями і, значною мірою гальмівними властивостями, які суттєво залежать від завантаженості причепа і розташуванні вантажу в його кузові. Так, несиметричне завантаження причепа призводить до зміни навантажень як на колеса однієї осі, так і одного борту. У роботі ефективність гальмівної системи автопоїзда була оцінена за величиною гальмівного шляху S_m при заданій початковій швидкості V_0 та/або середнім значенням уповільнення j_x , а також показником η_{yi} стійкості. Ці показники визначені для автопоїзда у складі тягового автомобіля Mercedes-Benz T1N "Sprinter" і двовісного причепа ПВБФ 15. Аналіз розрахунків показав різницю між експериментальними вимогами Правил ЄЕК ООН № 13 [22] та чинними нормативами України [25]. Якщо за експериментальними критеріями ($V_0=60$ км/год, $j_{an}=6,0$ м/с²) автопоїзд відповідає вимогам при коефіцієнті нерівномірності $k_n=0,82$, то згідно з українським законодавством [25] коефіцієнт нерівномірності для категорії М1 не повинен перевищувати 30% (0,30). Це свідчить про необхідність гармонізації національних та міжнародних стандартів. Встановлено, що автопоїзд втрачає стійкість із-за нестійкості тягового автомобіля за коефіцієнта нерівномірності гальмівних зусиль на його колесах на рівні 0,7. У той же час причіп залишається стійким майже у всьому діапазоні нерівномірності гальмівних зусиль від 0,53 до 1,0, тобто обмежуючим фактором при гальмуванні автопоїзда за стійкістю руху є тяговий автомобіль.

Отримані результати узгоджуються з дослідженнями Sharma та He [4], які підтвердили складність взаємозв'язків між статичною та динамічною стійкістю артикульованих транспортних засобів. Abroshan et al. [13] також продемонстрували, що диференційне гальмування може ефективно компенсувати недоліки тягового автомобіля в забезпеченні загальної стійкості автопоїзда.

На показники ефективності гальмування автопоїзда суттєво впливають завантаженість

причепа і висота його центру мас. Встановлено, що найгірші показники стійкості притаманні автопоїзду з причепом без вантажу. Коефіцієнт стійкості причепа суттєво залежить від висоти його центру мас. За відносної висоти центру мас в межах 0,2-0,35 коефіцієнт стійкості автопоїзда майже не залежить від нерівномірності гальмівних сил на його колесах. Цей ефект втрачається по мірі подальшого підвищення висоти центру мас причепа і за відносної її значення $k_n=0,5$ коефіцієнт стійкості автопоїзда майже у двічі зменшується. Ці висновки корелюють з результатами Synák та Jakubovičová [5], які виявили, що ризики від під'єднання причепа до легкового автомобіля значно залежать від характеристик навантаження. De Bernardis et al. [12] показали, що сучасні системи модельного прогностичного контролю можуть ефективно мітувати негативний вплив змінної завантаженості на стійкість системи.

Практична значущість отриманих результатів полягає в можливості розробки рекомендацій для власників автопоїздів категорії М1+О2. Зокрема, встановлений факт погіршення стійкості порожнього причепа вказує на необхідність особливої обережності при поверненні з розвантаженим причепом. Критичний вплив висоти центру мас понад 0,35 від висоти причепа дозволяє сформулювати чіткі рекомендації щодо розміщення вантажу в кузові.

Сучасний розвиток електронних систем безпеки відкриває нові можливості для компенсації виявлених недоліків. Heißing та Ersoy [1] показали, що інтеграція ESP систем тягача з електронними системами причепа може значно розширити діапазон стійкої роботи автопоїзда. Превентивні системи контролю, розроблені Parra et al. [2], дозволяють прогнозувати критичні ситуації та втручатися до їх виникнення, що особливо актуально для некерованих причепів категорії О2.

Слід зазначити обмеження проведеного дослідження. Моделювання виконано для конкретної конфігурації автопоїзда Mercedes-Benz Sprinter з причепом ПВБФ 15, що потребує верифікації результатів для інших моделей. Крім того, не враховувався вплив сучасних електронних систем стабілізації, що може бути предметом подальших досліджень. Zhou et al. [15] показали важливість урахування зовнішніх факторів, таких як бічний вітер, що також не розглядалося в рамках даної роботи.

Висновки

Показано, що ефективність гальмівної системи автопоїзда слід оцінювати за величиною гальмівного шляху S_2 при заданій початковій швидкості, уповільнення j_x , а також показником η_{st} стійкості, що є відношенням необхідної для гальмування ширини проїжджої частини до мінімально допустимої за умовами безпеки руху.

Встановлено розбіжність між експериментальними вимогами міжнародних стандартів та національними нормативами України. Згідно з чинними Вимогами до перевірки конструкції та технічного стану колісного транспортного засобу, коефіцієнт нерівномірності гальмівних сил коліс осі для категорії M1 повинен бути не більше 30% (0,30). Водночас, експериментальні випробування за Правилами СЕК ООН № 13 показали, що автопоїзд досягає нормативного уповільнення ($6,0 \text{ м/с}^2$) при швидкості 60 км/год за коефіцієнта нерівномірності на осях причепа до 0,82. Це свідчить про необхідність гармонізації національних та міжнародних стандартів безпеки.

Встановлено, що автопоїзд втрачає стійкість із-за нестійкості тягового автомобіля за коефіцієнта нерівномірності гальмівних зусиль на його колесах на рівні 0,7. У той же час причіп залишається стійким майже у всьому діапазоні нерівномірності гальмівних зусиль від 0,53 до 1,0, тобто обмежуючим фактором при гальмуванні автопоїзда за стійкістю руху є тяговий автомобіль. Цей висновок узгоджується з сучасними дослідженнями динамічної стійкості артикульованих транспортних засобів.

Показано, що збільшення завантаженості причепа призводить до збільшення коефіцієнта його стійкості за різних значень коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на колесах його осей. Це свідчить про те, що найгірші показники стійкості притаманні автопоїзду з причепом без вантажу, що підтверджується сучасними дослідженнями ризиків експлуатації легких причепів [5]. Отримані результати слід враховувати при розробці рекомендацій для експлуатації автопоїздів категорії M1+O2.

Показано суттєву залежність коефіцієнта стійкості причепа від висоти його центру мас. За відносної висоти центру мас причепа в межах 0,2...0,35 коефіцієнт стійкості незалежно від коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на його осях наближається до 1,0, що забезпечує стійкість системи. Цей ефект втрачається при подальшому підвищенні висоти центру мас, і за відносного значення 0,5 коефіцієнт стійкості автопоїзда зменшується

майже удвічі. Ці результати корелюють з сучасними дослідженнями впливу розташування вантажу на стійкість автопоїздів [5, 12].

Дослідження показало актуальність інтеграції отриманих результатів з сучасними електронними системами безпеки (ESP, ABS, EBD), які можуть компенсувати виявлені недоліки та розширити діапазон безпечної експлуатації автопоїздів [1, 2]. Превентивні системи контролю стійкості можуть стати ефективним засобом підвищення безпеки автопоїздів категорії M1+O2.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Heißing, B., & Ersoy, M. (2022). Electronic stability control of light vehicle-trailer combinations: A review. *Vehicle System Dynamics*, 60(5), 1081–1119. <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1936610>
2. Parra, A., Tavernini, D., Gruber, P., Sornioti, A., Zubizarreta, A., & Pérez, J. (2022). On preemptive vehicle stability control. *Vehicle System Dynamics*, 60(6), 2098–2123. <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1983181>
3. Vempaty, S., He, Y., & Zhao, L. (2020). An overview of control schemes for improving the lateral stability of car-trailer combinations. *International Journal of Vehicle Performance*, 6(2), 151–199. <https://doi.org/10.1504/IJVP.2020.106985>
4. Sharma, T., & He, Y. (2024). On trade-off relationship between static and dynamic lateral stabilities of articulated heavy vehicles. *Designs*, 8(5), 103. <https://doi.org/10.3390/designs8050103>
5. Synák, F., & Jakubovičová, L. (2024). Assessing the risks arising from a trailer connected behind a passenger car. *Scientific Reports*, 14, 21937. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73107-2>
6. Прогній, П. Б. (2014). До аналізу процесу гальмування сідельного автопоїзда без блокування коліс. *Вісник Національного транспортного університету*, 29, 18–25. Progniy, P. B. (2014). Do analizu protsesu hal'muvannia sidel'noho avtopoizda bez blokuvannia kolis [On the analysis of semi-trailer road-train braking without wheel lock-up]. *Visnyk Natsionalnoho Transportnoho Universytetu*, 29, 18–25. [in Ukrainian]
7. Marchuk, R., Marchuk, N., Sakhno, V., & Poliakov, V. (2021). Mobility of the metrobus: Ways of improvement. *Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, 91(1), 63–79. <https://doi.org/10.14669/AM.VOL91.ART5>
8. Поляков, В. М., Приходченко, Д. Ю., & Абрамов, Д. А. (2007). Математичне моделювання гальмівних процесів автопоїзда. *Вісник СНУ*

- ім. В. Даля, 6(112), 59–62. Polyakov, V. M., Prykhodchenko, D. Yu., & Abramov, D. A. (2007). Matematychnе modeliuвання hal'mivnykh protsesiv avtopoizda [Mathematical modelling of road-train braking processes]. Visnyk SNU im. V. Dalia, 6(112), 59–62. [in Ukrainian]
9. Подригало, М. А., & Коробко, А. І. (2009). Вплив бортової нерівномірності навантаження на гальмові відхилення. Автомобільний транспорт, 24, 33–36. Podryhalo, M. A., & Korobko, A. I. (2009). Vplyv bortovoi nerivnomirnosti navantazhennia na hal'movi vidkhylennia [Influence of lateral load imbalance on brake deviations]. Avtomobilnyi Transport, 24, 33–36. [in Ukrainian]
10. Кузнецов, Р. М., & Данилюк, Р. Л. (2011). До питання стійкості руху триланкового автопоїзда при гальмуванні. Наукові нотатки, 32, 197–199. Kuznetsov, R. M., & Danylyuk, R. L. (2011). Do pytannia stiikosti rukhu trylankovoho avtopoizda pry hal'muvanni [On the stability of a three-unit road-train during braking]. Naukovi Notatky, 32, 197–199. [in Ukrainian]
11. Zhu, S., Ni, Z., Rahimi, A., & He, Y. (2022). On dynamic stability evaluation methods for long combination vehicles. Vehicle System Dynamics, 60(12), 3999–4034. <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1986223>
12. De Bernardis, M., Rini, G., Bottiglione, F., Hartavi, A. E., & Sorniotti, A. (2023). On nonlinear model predictive direct yaw-moment control for trailer sway mitigation. Vehicle System Dynamics, 61(2), 445–471. <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2054352>
13. Abroshan, M., Hajiloo, R., Hashemi, E., & Khajepour, A. (2021). Model predictive-based tractor-trailer stabilisation using differential braking with experimental verification. Vehicle System Dynamics, 59(8), 1190–1213. <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1831591>
14. Guo, K., Yu, Z., & He, Y. (2023). Integrated braking–steering control for tractor–semitrailer combinations in emergency lane-change manoeuvres. Vehicle System Dynamics, 61(10), 1734–1758. <https://doi.org/10.1080/00423114.2023.2200380>
15. Zhou, Q., Qiu, Y., & He, Y. (2024). Lateral stability control of truck and centre-axle-trailer combinations under crosswind disturbances. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 31(3), 348–370. <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2024.138396>
16. Amoroso, F., & Cebon, D. (2024). Brake-actuated steering control strategy for turning of articulated vehicles. Vehicle System Dynamics, 62(8), 2145–2167. <https://doi.org/10.1080/00423114.2023.2242535>
17. Кузнецов, Р. М. (2007). Підвищення стійкості триланкових автопоїздів у граничних режимах руху. Монографія. Київ: НТУ. Kuznetsov, R. M. (2007). Pidvyshchennia stiikosti trylankovykh avtopoizdiv u hranychnykh rezhymakh rukhu [Improvement of stability of three-unit road trains in critical driving modes]. Monograph. Kyiv: NTU. [in Ukrainian]
18. Кузнецов, Р. М., Лотиш, В. В., Мурований, І. С., & Оніщук, В. П. (2012). Порівняння стійкості триланкових автопоїздів. Вісник СХУ ім. В. Даля, 7(125), 84–87. Kuznetsov, R. M., Lotysh, V. V., Murovanyi, I. S., & Onyshchuk, V. P. (2012). Porivniannia stiikosti trylankovykh avtopoizdiv [Comparison of three-unit road train stability]. Visnyk SNU im. V. Dalia, 7(125), 84–87. [in Ukrainian]
19. Сахно, В. П., Поляков, В. М., Стельмашук, В. В., & Попелиш, Д. М. (2019). Показники стійкості триланкових автопоїздів. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 1(18), 143–154. Sakhno, V. P., Poliakov, V. M., Stelmashchuk, V. V., & Popelysh, D. M. (2019). Pokaznyky stiikosti trylankovykh avtopoizdiv [Stability indicators of three-unit road-trains]. Suchasni Tekhnolohii v Mashynobuduvanni ta Transporti, 1(18), 143–154. [in Ukrainian]
20. Поляков, В. М., Приходченко, Д. Ю., & Шарай, С. М. (2011). Вплив експлуатаційних факторів на стійкість руху триланкового автопоїзда при гальмуванні. Вісник СевНТУ, 121, 61–64. Polyakov, V. M., Prykhodchenko, D. Yu., & Sharaj, S. M. (2011). Vplyv ekspluatatsiynykh faktoriv na stiikist' rukhu trylankovoho avtopoizda pry hal'muvanni [Influence of operational factors on the stability of a three-unit road train during braking]. Visnyk SevNTU, 121, 61–64. [in Ukrainian]
21. Sakhno, V. P., Kuznetsov, R. M., Marchuk, R. M., & Onyshchuk, V. P. (2022). Method for determining stability of three-section trailer-bus train. Problemy Avtomobil'noho Transportu, 8, 157–165.
22. United Nations Economic Commission for Europe. (2023). UN Regulation No 13, Revision 9 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking (ECE/TRANS/WP.29/2023/45). <https://unece.org/transport/documents/2023/05/standards/un-regulation-no-13-revision-9>
23. Steinginga, L., Huang, W., & Croken, M. (2020). Handling and stability analysis of vehicles towing a trailer with no brakes or suspension. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 44(4), 653–668. <https://doi.org/10.32393/csme.2020.125>
24. Сахно, В. П., Мурований, І. С., Оніщук, В. П., & Стельмашук, С. В. (2023). Методи підвищення стійкості триланкових автопоїздів. Сучасні технології в машинобудуванні і транспорті, 2(14), 296–306. Sakhno, V. P., Murovanyi, I. S., Onyshchuk, V. P., & Stelmashchuk, S. V.

- (2023). Metody pidvyshchennia stiikosti trylankovykh avtopoizdiv [Methods of improving three-unit road-train stability]. Suchasni Tekhnologii v Mashynobuduvanni i Transporti, 2(14), 296–306. [in Ukrainian]
25. Вимоги до перевірки конструкції та технічного стану колісного транспортного засобу та методи такої перевірки. (2012). Наказ МВС України від 7 грудня 2012 р. № 1283. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2169-12>. Vymohy do perevirky konstrukttsii ta tekhnichnoho stanu kolisnoho transportnoho zasobu ta metody takoi perevirky [Requirements for checking the design and technical condition of wheeled vehicles and methods of such checking]. (2012). Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated December 7, 2012 No. 1283. [in Ukrainian]
26. Sakhno, V. P., Onyshchuk, V. P., & Stelmashchuk, S. V. (2024). Vplyv nerivnomirnosti hal'mivnykh syl na stiikist' avtopoizda. Avtoshliakhovyk Ukrainy, 2(279), 74–85. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2024-2-279-74-85>

Онищук Василь Петрович¹, к.т.н., доц. каф. автомобілів і транспортних технологій,
e-mail: v.onyshchuk@lntu.edu.ua,
тел. +38 095-390-54-39,
ORCID: 0000-0002-5316-408X

Стельмашук Станіслав Валерійович¹, аспірант, кафедра автомобілів і транспортних технологій,
тел. +38 050-633-00-38, stanislav0077@ukr.net,
ORCID: 0009-0009-6981-1040

Стельмашук Валерій Віталійович¹, к.т.н., доц. каф. автомобілів і транспортних технологій,
тел. +38 099-731-78-91,
e-mail: val.stelmashchuk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3813-3143

¹Луцький національний університет, 43018, Україна, м. Луцьк, вул. Львівська, 75.

On Determining the Stability of an M1 Category Vehicle with an O2 Category Trailer in Braking Mode

Annotation. Problem. The safety and stability of M1 category vehicles with O2 category trailers remain critically important, particularly with their growing popularity among private entrepreneurs and enthusiasts. Modern vehicles equipped with electronic stability systems (ESP, ABS, EBD) require investigation of their integration with traditional inertial trailer braking systems. Uneven braking force distribution, asymmetric loading, and improper cargo placement can compromise stability during braking, while regulatory discrepancies between national and international standards create additional safety concerns. **Goal.** This study aims to investigate the influence of structural and operational factors on stability indicators of M1 vehicles with O2 trailers

during braking, determine critical parameters for safe operation, and analyze compatibility between experimental requirements and current regulatory standards. **Methodology.** Mathematical modeling of vehicle-trailer dynamics was employed using differential equation systems. The research was conducted using a Mercedes-Benz Sprinter with PVBФ 15 two-axle trailer. The analysis focused on braking force unevenness coefficient, trailer loading, center of mass height effects, and comparison between international experimental criteria and national regulatory requirements. **Results.** The study revealed that vehicle-trailer stability is primarily limited by the towing vehicle characteristics, which loses stability at an unevenness coefficient of 0.7, while the trailer remains stable within the 0.53–1.0 range. A regulatory discrepancy was identified: while experimental trials per UN ECE Regulation 13 achieve required deceleration (6.0 m/s²) at unevenness coefficients up to 0.82, Ukrainian legislation limits M1 category vehicles to 30% (0.30), indicating need for standards harmonization. Increased trailer loading improves stability, with empty trailers showing worst performance. Center of mass height above 0.35 critically reduces safety. **Originality.** This research provides the first comprehensive investigation integrating braking force distribution, loading conditions, and trailer geometry with regulatory compliance analysis, highlighting the need for harmonizing national and international safety standards for vehicle-trailer combinations. **Practical Value.** Results enable development of improved regulatory frameworks, operational recommendations for M1+O2 combinations, and integration strategies for modern electronic safety systems with traditional trailer braking systems.

Keywords: vehicle-trailer combination, braking stability, regulatory harmonization, stability coefficient, electronic safety systems, center of mass.

Onyshchuk Vasyi¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles and Transport Technologies,
e-mail: v.onyshchuk@lntu.edu.ua,
tel. +38 095-390-54-39,
ORCID: 0000-0002-5316-408X

Stelmashchuk Stanislav¹, postgraduate student of the Department of Automobiles and Transport Technologies, tel. +38 050-633-00-38,
e-mail: stanislav0077@ukr.net,
ORCID: 0009-0009-6981-1040

Stelmashchuk Valerii¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles and Transport Technologies,
tel. +38 099-731-78-91,
e-mail: val.stelmashchuk@gmail.com,
ORCID: 0000-0003-3813-3143

¹Lutsk National Technical University, 43000, str. Lvivska, 75, Lutsk, Ukraine