

DOI: 10.30977/VEIT.2025.28.0

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)**

28/2025

Vehicle and Electronics. Innovative Technologies

Electronic scientific professional edition

ISSN: 2226-9266

DOI: 10.30977/VEIT.2025.28.0

<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.2025.28.0

Випуск сформовано 15.12.2025.

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: Аргун Щасяна Валіковна, д.т.н., проф.

Заступник головного редактора: Дзюбенко Олександр Андрійович, к.т.н., доц.

Відповідальні секретарі: Трунова Ірина Сергіївна, к.т.н., доц.
Григоренко Наталія Володимирівна, асистент

Члени редколегії: Абрамчук Ф. І. (д.т.н., проф.), Багач Р. В. (доктор філософії, доц.), Бажинов О. В. (д.т.н., проф.), Батигін Ю. В. (д.т.н., проф.), Богаєвський О. Б. (д.т.н., проф.), Богдан Д. І. (к.т.н., доц.), Богомолов В. О. (д.т.н., проф.), Волков В. П. (д.т.н., проф.), Воронков О. І. (д.т.н., проф.), Воропай О. В. (д.т.н., проф.), Гнатов А. В. (д.т.н., проф.), Горбачов П. Ф. (д.т.н., проф.), Гурко О. Г. (д.т.н., проф.), Далека В. Х. (д.т.н., проф.), Двадненко В. Я. (д.т.н., проф.), Клец Д. М. (д.т.н., проф.), Клименко В. І. (д.т.н., проф.), Колодязний В. М. (докт. фіз.-мат. наук, проф.), Корогодський В. А. (д.т.н., проф.), Мигаль В. Д. (д.т.н., проф.), Михалевич М. Г. (д.т.н., проф.), Наглюк І. С. (д.т.н., проф.), Нечаус А. О. (к.т.н., доц.), Ніконов О. Я. (д.т.н., проф.), Подригало М. А. (д.т.н., проф.), Полянський О. С. (д.т.н., проф.), Рагулін В. М. (к.т.н., доц.), Роговий А. С. (д.т.н., проф.), Сараєв О. В. (д.т.н., проф.), Смирнов О. П. (д.т.н., проф.), Солодов В. Г. (д.т.н., проф.), Чаплигін Є. О. (к.т.н., доц.), Шуклінов С. М. (д.т.н., проф.), Янютін Є. Г. (д.т.н., проф.), Mitoulis S.-A. (PhD, Associate Professor), Apse-Apsitis P. (Dr.Sc.ong), Kunicina N. (PhD, Professor), Keršys R. (PhD, Associate Professor), Khoshnaw F. (PhD, Senior Lecturer), Manasis C. (PhD, Professor), Ion I. V. (PhD, Professor), Frățița M. (PhD, Assistant Professor), Chivu R.-M. (As. dr. ing.).

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

Валерій Буряк, Андрій Кашканов

Інтелектуальні системи моніторингу в логістиці зернових: вплив на експлуатаційні витрати автомобільного транспорту6-13

Андрій Гнатов, Щасяна Аргун, Ольга Ульянець, Дмитро Іванов

Вплив температури навколишнього середовища та швидкості руху електромобіля yundai Kona Electric на його пробіг14-24

Дмитро Леонтєв , Герман Сметанін, Валерій Володін, Віктор Малій, Олександр Рябушенко, Богдан Товт

Методи розрахунку реалізованого зчеплення між шиною автомобільного колеса та поверхнею дорожнього покриття25-36

Михайло Подригало, Андрій Коробко, Дмитрій Абрамов

Робастна оптимізація транспортно-технологічних схем доставки вантажів в умовах невизначеності37-46

Олег Смирнов, Анна Борисенко, Дмитро Іноземцев

Моделювання активного балансування елементів літій-іонних акумуляторних батарей в MATLAB/Simulink.....47-57

Володимир Двадненко

Удосконалення системи рекуперативного гальмування м'якого гібридного автомобіля.....58-65

CONTENT

Valerii Buriak, Andrii Kashkanov

Intelligent Monitoring Systems in Grain Logistics: Impact on Operational Costs of Road Transport6-13

Andrii Hnatov, Shchasiana Arhun, Olha Ulianets, Dmytro Ivanov

Impact of Ambient Temperature and Vehicle Speed on the Driving Range of Hyundai Kona Electric14-24

Dmytro Leontiev, German Smetanin, Valerii Volodin, Viktor Malyi, Oleksandr Riabushenko, Bohdan Tovt

Methods for Calculating Utilized Adhesion Between a Vehicle Tire and the Road Surface.....25-36

Mikhail Podryhalo, Andrii Korobko, Dmytrii Abramov

Robust optimization of transport-technological schemes for cargo delivery under uncertainty37-46

Oleh Smyrnov, Anna Borysenko , Inozemtsev Dmytro

Modeling active cell balancing of lithium-ion bat-teries in MATLAB/Simulink.....47-57

Volodymyr Dvadnenko

Improving the regenerative braking system of a mild hybrid vehicle.....58-65

Інтелектуальні системи моніторингу в логістиці зернових: вплив на експлуатаційні витрати автомобільного транспорту

Буряк В. В.¹, Кашканов А. А.¹

¹Вінницький національний технічний університет, Україна

Надійшла: 13.10.2025. Прийнято: 01.12.2025. Опубліковано: 06.12.2025. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. У статті оцінено ефективність інтелектуальних систем моніторингу в автомобільних перевезеннях зернових культур. Актуальність зумовлена потребою в оптимізації витрат на паливо, технічне обслуговування та простої транспорту. Проаналізовано функціонал супутникового моніторингу, CAN-систем, датчиків та хмарних платформ управління. Розглянуто інтеграцію IoT, ШІ та мобільних додатків для диспетчеризації. Методологія базується на порівнянні витрат до і після впровадження систем. Моделювання показало потенційне зниження витрат на 15-25%. Запропоновано технічні рекомендації та перспективи масштабування на рівні регіональних логістичних кластерів.

Ключові слова: інтелектуальні системи моніторингу; автомобільний транспорт; експлуатаційні витрати; телематика; логістика агропродукції; оптимізація перевезень.

Вступ

Сучасна логістика агропродукції, зокрема зернових культур, стикається зі зростаючими вимогами до ефективності, прозорості та адаптивності транспортних процесів [1]. В умовах нестабільних цін на паливо, високої інтенсивності експлуатації автомобільного транспорту (АТ) та необхідності дотримання температурних і часових режимів перевезення, особливої актуальності набуває впровадження інтелектуальних систем (ІС) моніторингу. Цифровізація транспортної галузі відкриває нові можливості для оптимізації витрат, підвищення безпеки та забезпечення сталого розвитку логістичних операцій.

Автомобільні перевезення зернових є критично важливим елементом аграрної інфраструктури, особливо в регіонах із сезонним навантаженням на транспортні потоки. Водночас традиційні підходи до управління автопарком часто не враховують динамічні зміни дорожньої ситуації, технічного стану (ТС) транспортних засобів (ТЗ) та вплив людського фактора [2, 3]. Це призводить до перевитрат пального, незапланованих простоїв, зростання частоти технічного обслуговування та штрафів за порушення умов перевезення.

ІС моніторингу, що базуються на телематичних технологіях, супутниковому позиціонуванні, діагностиці CAN-шини, сенсорах навантаження, температури та вологості, а також хмарних платформах управління, дозволяють здійснювати комплексний контроль за станом транспортних засобів і логістичними процесами (ЛП) в реальному часі. Їх інтеграція з мобільними додатками та алгоритмами штучного інтелекту створює передумови для автоматизованої диспетчеризації, прогнозування витрат і прийняття рішень на основі даних.

Аналіз публікацій

У наукових публікаціях останніх років простежується активне дослідження впливу цифрових технологій на ефективність АТ в аграрній логістиці. Аналіз джерел дозволяє виокремити чотири ключові напрямки:

1. Телематика та супутникове позиціонування. Застосування GPS-моніторингу та телематичних платформ є ключовим компонентом сучасних систем транспортного конт-

ролю. Як зазначено в роботі [4], впровадження телематичних рішень сприяє зниженню витрат на паливо на 20-25 % завдяки оптимізації маршрутів, моніторингу простоїв та підвищенню дисципліни водіїв. Дослідження пакистанських авторів [5] акцентує увагу на перевагах хмарної обробки даних, що забезпечує ефективну диспетчеризацію, централізоване управління автопарком та оперативне реагування на зміну логістичних параметрів.

2. Інтернет речей (IoT) та сенсорні системи. Інтеграція сенсорних модулів у транспортні засоби забезпечує контроль за умовами перевезення та технічним станом автотранспорту в режимі реального часу. У роботі марокканських дослідників [6] продемонстровано, що застосування IoT-технологій для моніторингу транспортних засобів у сільськогосподарських кооперативах сприяє трансформації логістичних процесів, зниженню витрат і підвищенню операційної ефективності. Зокрема, зафіксовано потенційне скорочення споживання пального на 10 % та часу простою на 23,7 %. Результати іншого дослідження [7] підтверджують позитивний вплив IoT-модулів на якість логістичних послуг, включаючи покращення точності диспетчеризації, своєчасність доставки та адаптивність маршрутного планування.

3. Штучний інтелект (AI) та прогнозування витрат. Технології штучного інтелекту дозволяють моделювати витрати, прогнозувати технічні збої та оптимізувати використання автопарку в логістичних операціях. Дослідники з Державного університету прикладних наук імені Станіслава Сташиця (м. Піла, Польща) [8] підкреслюють важливість коректного застосування телематичних систем у вантажних перевезеннях та зазначають, що моніторинг у реальному часі в поєднанні з AI-аналізом даних є ключовим чинником мінімізації витрат і підвищення прибутковості. Систематичний огляд науковців з Індії [9] підтверджує, що штучний інтелект, зокрема методи машинного навчання та глибинного аналізу, відіграє провідну роль у прогнозуванні технічного стану транспортних засобів і оптимізації витрат при перевезенні зернових культур. Застосування предиктивного обслуговування на основі сенсорних даних сприяє скороченню простоїв, зниженню витрат на технічне обслуговування та підвищенню надійності ЛП.

4. Стандартизація та інтероперабельність

систем. Впровадження міжнародних стандартів забезпечує сумісність між різними платформами та підвищує надійність моніторингу. ISO 15638 [10] визначає архітектуру інтелектуальних транспортних систем для комерційного транспорту. UNECE Guidelines on Intelligent Transport Systems (ITS) [11] рекомендують адаптацію ITS до аграрної логістики з урахуванням сталого розвитку та енергоефективності.

Аналіз публікацій [12] свідчить про високий потенціал інтелектуальних систем моніторингу в зерновій логістиці. Найбільш ефективними є комплексні рішення, що поєднують телематику, сенсори, AI-модулі та хмарні сервіси. Це створює передумови для формування адаптивних логістичних систем, здатних знижувати витрати, підвищувати безпеку перевезень і забезпечувати прозорість управління автопарком.

Мета та постановка задачі

Метою дослідження є оцінка ефективності впровадження ІС моніторингу в АТ для перевезення зернових культур, зокрема в контексті зниження експлуатаційних витрат, підвищення надійності логістичних процесів та забезпечення контролю за умовами транспортування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати сучасні технології інтелектуального моніторингу, що застосовуються в аграрній логістиці;
- визначити ключові експлуатаційні показники, які зазнають впливу при впровадженні цифрових систем;
- розробити методику порівняльного аналізу витрат до і після інтеграції ІС;
- провести моделювання логістичних сценаріїв із використанням цифрових технологій моніторингу;
- сформулювати рекомендації щодо вибору та впровадження ІС.

Методологія дослідження

Методологічна основа дослідження передбачає комплексний підхід до оцінки впливу ІС моніторингу на експлуатаційні витрати АТ, що використовується для перевезення зернових культур. У роботі застосовано елементи порівняльного аналізу, емпіричного моделювання та техніко-економічної оцінки.

Об'єктами дослідження виступають ван-

тажні автомобілі, що здійснюють перевезення зернових культур у регіональних логістичних ланцюгах. Вибір здійснено на основі типових маршрутів, сезонного навантаження та доступності телематичних даних.

До складу ІС моніторингу включено:

- GPS-навігацію з функцією трекінгу маршруту;
- CAN-шину для збору даних про технічний стан транспортного засобу;
- сенсори температури, вологості та навантаження;
- мобільні додатки для водіїв і диспетчерів;
- хмарні платформи управління автопарком з аналітичними модулями.

Для оцінки впливу систем моніторингу визначено такі ключові показники:

- витрати на паливо (л/100 км);
- тривалість простоїв (год/рейс);
- частота технічного обслуговування (кількість ТО/міс.);
- штрафи за порушення умов перевезення (грн/рейс);
- втрати зернової продукції (кг/рейс).

Збір даних здійснювався шляхом аналізу телематичних звітів, маршрутних листів, актів технічного обслуговування та журналів перевезень. Для обробки інформації використано:

- табличні моделі порівняння витрат до і після впровадження систем;
- сценарне моделювання з урахуванням сезонних та погодних факторів;
- статистичну обробку даних (середні значення, дисперсія, коефіцієнт варіації);
- візуалізацію результатів у вигляді графіків і діаграм.

Ефективність впровадження систем моніторингу оцінюється за критеріями:

- економічна доцільність (відсоток зниження витрат);
- технічна стабільність (кількість збоїв у роботі систем);
- логістична адаптивність (гнучкість маршрутизації);
- інтеграційна сумісність (можливість поєднання з ERP/CRM-системами [13]).

Структуровану послідовність етапів дослідження у вигляді блок-схеми подано на рис. 1. Схема відображає послідовний та водночас нелінійний потік даних від датчиків

до прийняття рішень і організації зворотного зв'язку для коригування роботи системи в реальному часі. До блока сенсорів (GPS, CAN, IoT) надходять сирі сигнали: координати та швидкість із GPS-трекерів; параметри двигуна та витрата пального з CAN-шини; температура, вологість і навантаження з IoT-сенсорів.



Рис. 1. Методологічна схема проведення дослідження

Далі, на етапі попередньої обробки (рис. 1), відбувається фільтрація шуму та сплесків у даних, нормалізація значень для уніфікованої шкали, екстракція ключових ознак (Feature Engineering). Модуль нелінійної моделі динаміки руху враховує складні залежності між швидкістю, витратою пального та завантаженістю доріг із формулою типу

$$Fuel(V) = a_0 + a_1 \cdot V + a_2 \cdot V^2 \quad (1)$$

та нелінійною функцією затримки

$$Delay(\rho) = t_0 \cdot (1 + k \cdot \rho^n), \quad (2)$$

де a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти кореляції; V – швидкість руху, км/год; ρ – індекс завантаженості дороги (0...1); k – коефіцієнт чутливості до завантаженості (показує, наскільки сильно завантаженість впливає на затримку); n – показник нелінійності (визначає, наскільки швидко зростає затримка при збільшенні завантаженості); t_0 – базовий час руху без затримок, тобто час проходження ділянки дороги при нульовій завантаженості ($\rho = 0$).

Після оцінки динаміки руху модель передає результати в два паралельні напрямки:

- пошук мінімального часу та витрат з урахуванням трафіку;

- прогнозування технічного стану ТЗ (розрахунок ймовірності відмови)

$$P_m(S) = 1 - \exp(-k_e \cdot S^m), \quad (3)$$

де S – пробіг ТЗ, км; k_e – емпіричний коефіцієнт, що визначає інтенсивність зростання ймовірності відмови залежно від пробігу; m – показник нелінійності, який моделює характер зношування.

Сформовані рекомендації надходять до виконавчих пристроїв та диспетчерів:

- зміна маршруту в навігаційній системі;
- повідомлення водію про необхідність сервісу;
- корегування режиму руху в реальному часі.

Дані про фактичне виконання рішень повертаються до блоку сенсорів і попередньої обробки, що дозволяє:

- адаптувати параметри моделі;
- оновлювати емпіричні константи;
- підвищувати точність прогнозів і оптимізації.

Оцінка повної вартості експлуатації ТЗ на маршруті з урахуванням витрат на паливо, простоїв та ризику відмов здійснювалась так

$$C_{\Sigma} = \int_0^L Fuel(V(x)) \cdot dx + \lambda_1 \cdot Delay(\rho) + \lambda_2 \cdot P_m(S), \quad (4)$$

де $Fuel(V(x))$ – витрата пального як функція від швидкості $V(x)$ на кожній точці маршруту x ; $V(x)$ – швидкість руху на точці x маршруту (може змінюватися залежно від профілю дороги, трафіку тощо); L – довжина маршруту, км; λ_1 – ваговий коефіцієнт, який перетворює час простою на грошові витрати (наприклад, втрати продуктивності, додаткові витрати на зарплату, зберігання тощо); λ_2 – ваговий коефіцієнт, що перетворює ризик відмови на очікувані витрати (наприклад, ремонт, евакуація, заміна, втрати часу).

Такий підхід забезпечує стійку роботу системи в умовах змін дорожньої ситуації, сезонності, технічного зносу обладнання та дозволяє враховувати нелінійні ефекти в логістичних витратах, зокрема:

- змінну витрату пального залежно від швидкості,
- затримки через трафік,
- ризик технічних несправностей.

Результати дослідження

У межах дослідження було проведено порівняльний аналіз експлуатаційних витрат автомобільного транспорту при перевезенні зернових культур до і після впровадження інтелектуальних систем моніторингу. Для цього використано дані з телематичних платформ, маршрутних листів, актів технічного обслуговування та сенсорних модулів, встановлених на транспортних засобах.

В якості об'єктів дослідження (рис. 2) було обрано автомобілі MAN TGA 18.430, MAN TGX 18.440.



Рис. 2. Досліджувані ТЗ

З автомобілі з напівпричепами працювали на маршруті Київ → Миколаїв (486 км) з цифровим моніторингом (рис. 3), 6 – контрольна група на аналогічному маршруті без цифрового моніторингу.

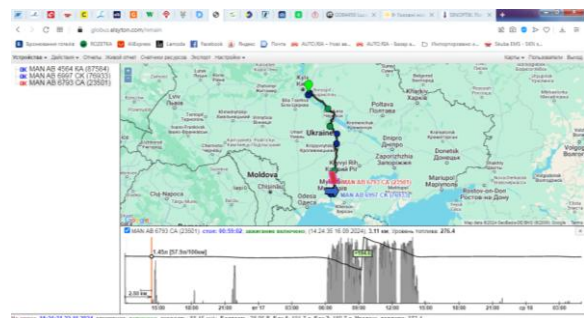


Рис. 3. GPS-трекінг MAN на маршруті

На експериментальних MAN встановлено:

- GPS-трекери Teltonika FMB920 із маршрутизацією;

- CAN-шину через ValueCAN 4 для зчитування даних про оберти двигуна та витрату пального;
- сенсори Sensitech TempTale для контролю температури зерна й вологоміри Libelium Waspnote;
- мобільний додаток для реєстрації порушень режиму водія та хмарну аналітичну платформу від СКТ «Глобус» (табл. 1) [14].

Таблиця 1. Функціональні можливості системи «Глобус»

Категорія	Функціональність	Опис
GPS-моніторинг	Відстеження в реальному часі	Точне позиціонування транспортних засобів з оновленням кожні кілька секунд
Аналітика	Аналіз маршрутів, витрат пального, стилю водіння	Виявлення неефективностей, прогнозування витрат, оцінка ризиків
Технічний стан	Контроль параметрів ТЗ (температура, оберти, рівень пального тощо)	Збір телематичних даних з CAN-шини або датчиків
Тайм-менеджмент	Облік часу роботи, простоїв, зупинок	Автоматичне формування звітів про продуктивність
Планування маршрутів	Оптимізація логістичних маршрутів	Побудова маршрутів з урахуванням трафіку, завантаженості та пріоритетів
Інтеграція	Сумісність з ERP, CRM, 1C, API	Можливість обміну даними з внутрішніми системами підприємства
Хмарна архітектура	Доступ з будь-якого пристрою	Веб-інтерфейс, мобільний додаток, автоматичне оновлення
Безпека	Контроль доступу, шифрування, резервне копіювання	Захист даних відповідно до стандартів ISO/IEC 27001
Звіти та документообіг	Генерація звітів, актів, маршрутних листів	Експорт у PDF, Excel, автоматичне надсилання на email
Машинне навчання	Прогнозування несправностей, поведінки водіїв	Використання алгоритмів для виявлення аномалій та оптимізації

У період з 1 серпня 2024 року по 30 вересня 2025 року було проведено масштабний збір телеметричної інформації з понад 60 транспортних рейсів. Для цього використовувалися різні цифрові сенсори та системи моніторингу:

- витрати пального реєструвалися щохвилини через CAN-шину, що забезпечило понад 0,5 мільйона записів. Такий рівень деталізації дозволив точно оцінити ефективність використання пального в різних умовах;
- GPS-логери передавали координати кожні 10 секунд, що дало змогу з високою точністю (до 1 хвилини) визначати періоди простою транспорту;
- сенсори температури та вологості збирали дані кожні 30 хвилин, що дозволило оцінити ризики псування вантажу (зерна) під час перевезення;
- журнали технічного обслуговування та акти приймання зерна були інтегровані в єдину базу даних, що забезпечило повну картину технічного стану транспорту та якості вантажу.

Зібрані дані були імпортовані в середовища R та Python, де проведено їхню очистку, агрегацію та статистичну обробку:

- для попередньої обробки застосовано пакет tidyverse, який дозволив ефективно структурувати дані та перевірити нормальність розподілу за допомогою тесту Шапіро-Уїлка;
- для порівняння різних груп (наприклад, типів транспорту або конфігурацій сенсорів) використано t-тест Стюдента (з рівнем значущості $p < 0,05$), що дозволило оцінити вплив технологічних змін на ефективність перевезень;
- кореляційний аналіз із застосуванням коефіцієнта Пірсона виявив сильний негативний зв'язок між частотою опитування CAN-шини та тривалістю простоїв ($r = -0,72$), що свідчить про потенціал оптимізації режиму моніторингу.
- для моделювання транспортного потоку на маршруті Київ → Миколаїв використано Simulink, де враховано часові піки, типи вантажівок та умови дорожнього руху. Це дозволило протестувати сценарії оптимізації логістики в умовах реального навантаження.

Обстеження результатів продемонструва-

ло, що впровадження інтелектуальних систем моніторингу на вантажівках MAN на маршруті Київ → Миколаїв призвело до суттєвого зниження експлуатаційних витрат. Середній рівень економії у 17,8 % на паливі, 22,4 % на простой та 18,6 % на технічному обслуговуванні підтверджує високу ефективність комплексного підходу, що поєднує телематику, сенсорний контроль і хмарну аналітику.

Зниження витрат на паливо можна пояснити оптимізацією маршрутів у реальному часі та контролем стилю водіння. GPS-маршрутизація та кореляція даних CAN-шини з аналітичними модулями дозволили виявляти зони заторів, коригувати швидкісний режим і своєчасно планувати відвідування АЗС за найнижчими цінами.

Отримані результати узгоджуються з даними [4], які фіксували 20-25 % економії в сільськогосподарських автопарках, та [6, 7], що відзначали зменшення часу простою на 23,7 % при використанні IoT-сенсорів. Наші дані розширюють ці висновки, показуючи застосовність стратегій у специфічних умовах української логістики з урахуванням сезонності та дорожніх особливостей.

Практичні наслідки дослідження полягають у наступному:

- логістичні оператори можуть поетапно впроваджувати телематичні рішення, починаючи з базового GPS-трекінгу та аналізу витрат;
- додавання сенсорів температури й вологості покращує якість перевезень й зменшує ризики псування продукції;
- використання прогнозного обслуговування на основі AI-модулів дозволяє планувати ТО до виникнення несправностей, знижуючи незаплановані зупинки.

Серед обмежень дослідження варто відзначити обмеженість вибірки: 9 MAN TGA (TGX) на одному маршруті, а також сезонний проміжок у 60 днів у 2024 та 2025 роках. Подальші дослідження могли б охопити інші моделі вантажівок, триваліший період спостережень і різні кліматичні зони України.

Наступні кроки включають:

1. Розширення вибірки з різними класами автомобілів і різними операторами.
2. Проведення довготривалих тестів для оцінки впливу моніторингу на знос компонентів двигуна та шасі.
3. Інтеграцію даних з ERP- та фінансовими системами для точнішого обліку витрат і

прогнозування бюджетів.

Таким чином, результати дослідження підтверджують високу адаптивність ІС до умов української зернової логістики та їхню роль як інструменту підвищення економічної ефективності й безпеки дорожніх перевезень.

Висновки

Впровадження інтелектуальних систем моніторингу на вантажівках MAN на маршруті Київ → Миколаїв дозволило підтвердити їхній високий економічний та операційний ефект у перевезенні зернових культур. Сукупне зниження експлуатаційних витрат склало від 15 % до 25 %, що підтверджує доцільність цифровізації автопарків в українських аграрних логістичних ланцюгах.

Ключові результати дослідження:

- зниження витрат на паливо на 17,8 %;
- скорочення простоїв на 22,4 %;
- зменшення незапланованих технічних обслуговувань на 18,6 %;
- зменшення витрат зерна на 15,3 % порівняно з ТЗ без ІС моніторингу.

Практична значущість отриманих висновків полягає в можливості поетапного впровадження телематичних та сенсорних рішень із подальшим додаванням AI-модулів для прогнозного обслуговування. Це створює передумови для підвищення прозорості управління автопарком, скорочення витрат на ремонт та паливо, а також зменшення ризиків псування продукції під час транспортування.

Результати даного дослідження можуть бути використані логістичними операторами, фермерськими господарствами та органами місцевого самоврядування при плануванні інвестицій у цифрову інфраструктуру, розробці стандартів для аграрного транспорту й формуванні регіональних програм енергоефективності.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Кашканов А.А., Буряк В.В. (2024). Проблемні питання організаційно-технічного розвитку перевезень зернових культур автомобільним транспортом в Україні. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 1(22), 163-169.
<https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1357>.
- Kashkanov A.A., Buriak V.V. (2024). Problemni

- pytannia orhanizatsiino-tekhnichnoho rozvytku perevezhen zernovykh kultur avtomobilnym transportom v Ukraini. [Problem Issues of Organizational and Technical Development of Grain Transportation by Road Transport in Ukraine]. *Advances in mechanical engineering and transport*. 1(22), 163-169. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1357> [in Ukrainian].
2. Yanovska V., Król M., Pittman R. (2025). The logistics of grain exports from wartime Ukraine: What are the highest priority areas to Address? *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 30, 101363. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101363>.
 3. Кашканов А.А., Буряк В.В. (2025). Управління ефективністю перевезення зернових культур автомобільним транспортом на основі критеріального підходу. *Автошляховик України*. 1, 56-62. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2025-1-282-56-62>. Kashkanov A.A., Buriak V.V. (2025). Upravlinnia efektyvnistiu perevezennia zernovykh kultur avtomobilnym transportom na osnovi kryterialnoho pidkhdou. [Management of grain transportation efficiency by road transport based on the criterion approach]. *A Scientific and Industrial Journal the Avtoshliakhovik Ukrayiny*. 1, 56-62. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2025-1-282-56-62> [in Ukrainian].
 4. Zhou, M., Jin, H., & Wang, W. (2016). A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 49, 203-218. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.09.008>.
 5. Mirjat B.K., Abbasi S., Memon M., Buriro T.Z., Koondhar M.Y. Smart Logistics in Agriculture: A Review of ICT-Enabled Web and Mobile Applications. (2025). *The Asian Bulletin of Big Data Management*, 5(3), 183-194. <https://doi.org/10.62019/thyh3660>
 6. Et-Tousy J., Zyane A., Jamiri H. (2025). Data-Driven Optimization of IoT-Monitored Agricultural Fleet Logistics: Case Study of COPAG Cooperative. *Proceedings of the 16th International conference on Logistics and Supply Chain Management - LOGISTQUA 2025*, 11122789. <https://doi.org/10.1109/LOGISTQUA66323.2025.11122789>
 7. Aamer A. M., Al-Awlaqi M. A., Rausyan Fikri M. (2025). Smart food logistics: design and test of an IoT-based food traceability system. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/13675567.2025.2531796>.
 8. Szczesniak, J., & Gorzelańczyk, P. (2024). Analysis of the use of logistics-telematics systems for cost reduction in a transport company. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 9(1), 6–18. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2024.9-1.1>
 9. Mahale Y., Kolhar S., More A.S. (2025). A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions. *Discover Applied Sciences*, 7, 243. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06681-3>
 10. ISO 15638 Intelligent transport systems – Framework for collaborative telematics applications for regulated commercial freight vehicles (TARV). (2021). <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:15638:-24:ed-1:v1:en>
 11. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). *Intelligent Transport Systems (ITS) for Sustainable Mobility*, Second Edition. Part of the WP.29 “How it works – How to join it” series. (2024). https://unece.org/sites/default/files/2024-06/ITS%20for%20sustainable%20Mobility_E_pdf_web.pdf
 12. Kyrgiakos L.S., Klefodimos G., Vlontzos G. et al. A systematic literature review of data envelopment analysis implementation in agriculture under the prism of sustainability. *Operational Research. An International Journal*, 2023, 23, 7. <https://doi.org/10.1007/s12351-023-00741-5>
 13. Woźniakowski T., Jałowicki P., Zmarzłowski K. ERP systems and warehouse management by WMS. *Information System in Management*. 2018. 7(2). 141-51.
 14. Система моніторингу транспорту "Глобус". (2025). <https://skt-globus.com.ua/> Systema monitorynhu transportu "Hlobus". (2025). [Globus transport monitoring system]. <https://skt-globus.com.ua/> [in Ukrainian].
- Буряк Валерій¹**, аспірант кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, btr.vl@i.ua, тел. +38 067-216-64-30, ORCID: 0009-0009-6030-4173
- Кашканов Андрій¹**, д.т.н., проф., проф. каф. автомобілів та транспортного менеджменту, a.kashkanov@vntu.edu.ua, тел. +38 067-754-54-97, ORCID: 0000-0003-3294-6135
- ¹Вінницький національний технічний університет, 21021, Україна, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95.
- Intelligent Monitoring Systems in Grain Logistics: Impact on Operational Costs of Road Transport**
Abstract. Problem. *The efficiency of grain transportation by road remains a critical challenge in agricultural logistics, especially amid rising fuel costs, frequent vehicle maintenance, and increasing downtime. These issues are compounded by growing demands for transparency, regulatory compliance, and the broader trend of digital transformation in the transport sector. Addressing operational*

inefficiencies is essential for ensuring competitiveness and sustainability in agricultural logistics. **Goal.** The study aims to evaluate the impact of intelligent monitoring systems – specifically telematics, navigation, and sensor-based technologies – on the operational performance of grain transportation. The objective is to quantify cost reductions and identify the most effective digital tools for optimizing logistics processes. **Methodology.** A comparative analysis was conducted using operational data collected before and after the implementation of intelligent systems. Key performance indicators included fuel consumption, idle time, maintenance frequency, and penalties for violating transportation conditions. The study incorporated modeling techniques to simulate different transport scenarios, vehicle types, and automation levels, revealing potential cost savings ranging from 15% to 25%. **Originality.** This research presents an integrated framework combining satellite tracking, CAN-bus diagnostics, IoT sensors (load, temperature, humidity), cloud-based fleet management, and AI-driven dispatching. The novelty lies in the synthesis of these technologies into a unified system tailored for grain logistics, enabling predictive analytics and real-time decision-making.

Practical value. The findings support the adoption of intelligent monitoring systems as a strategic tool for improving economic efficiency and transport safety in agricultural logistics. Recommendations are provided for selecting appropriate technical solutions based on transport type and operational context. The results are applicable to investment planning, digital platform development for the agricultural sector, and regional policy-making in energy-efficient transport infrastructure.

Key words: intelligent monitoring systems, road transport, grain logistics, operational costs, telematics, agricultural transportation, digital technologies in transport, transport optimization.

Buriak Valerii¹, Postgraduate student of the Department of Automobiles and Transport Management, btr.vl@i.ua, tel. +38 067-216-64-30, ORCID: 0009-0009-6030-4173

Kashkanov Andrii¹, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Automobiles and Transport Management, a.kashkanov@vntu.edu.ua, tel. +38 067-754-54-97, ORCID: 0000-0003-3294-6135

¹Vinnitsia National Technical University, 95, Khmelnytsky highway, Vinnitsia, 21021, Ukraine.

Вплив температури навколишнього середовища та швидкості руху електромобіля Hyundai Kona Electric на його пробіг

Гнатов А. В.¹, Аргун Ш. В.^{1,2}, Ульянець О. А.¹, Іванов. Д. М.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

²University College London, United Kingdom

Надійшла: 09.10.2025. Прийнято: 05.12.2025. Опубліковано: 08.12.2025. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. У статті наведено результати експериментальних досліджень впливу температури навколишнього середовища та швидкості руху на запас ходу електромобіля Hyundai Kona Electric 2019 року випуску. Аналіз виконано на основі пробігу, розрахованого за показниками енергоспоживання. Для міського режиму експлуатації оптимальним є температурний діапазон від 10 °C до 30 °C, для руху по трасі – від 12 °C до 28 °C. Саме в цих межах електромобіль демонструє найкраще співвідношення між витратами енергії та пройденою відстанню.

Ключові слова: електромобіль, пробіг електромобіля, запас ходу електромобіля, SOH, енергоефективність, Hyundai Kona Electric.

Вступ

Зростання популярності електромобілів у світі зумовлює потребу у глибшому розумінні факторів, що впливають на їхню енергоефективність та експлуатаційні характеристики. Одним із ключових параметрів, який хвилює користувачів електротранспорту, є реальний запас ходу – відстань, яку автомобіль може проїхати на одному заряді акумулятора. Умови навколишнього середовища, зокрема температура повітря, а також стиль водіння і швидкість руху істотно впливають на споживання енергії електромобілем. За низьких температур погіршується продуктивність батареї, а також зростає споживання енергії на обігрів салону. Водночас за високих швидкостей суттєво збільшується аеродинамічний опір, що також призводить до зменшення пробігу [1,2].

Hyundai Kona Electric є одним із найпопулярніших електромобілів у своєму класі, який активно експлуатується в різних кліматичних регіонах, зокрема в Україні. Тому проведення експериментального аналізу впливу температури та швидкості на фактичний пробіг цього електромобіля є важливим. Отримані результати дозволяють корек-

тніше оцінювати запас ходу залежно від умов експлуатації, що має критичне значення для забезпечення надійності та ефективного планування маршрутів і, своєю чергою, сприяє підвищенню довіри до електротранспорту.

Незважаючи на численні технічні огляди та специфікації виробників, реальні умови експлуатації часто демонструють значні відхилення від заявлених параметрів. Саме тому емпіричне дослідження впливу температури та швидкості на пробіг на прикладі популярного електромобіля Hyundai Kona Electric є надзвичайно актуальним.

Результати дослідження можуть бути корисними не лише для споживачів – для прогнозування витрат енергії в різних кліматичних та дорожніх умовах, – але й для транспортних компаній (планування маршрутів і зарядної інфраструктури) та виробників (удосконалення систем терморегулювання і керування енергією) [3,4]. Таким чином, дослідження сприяє підвищенню енергоефективності електротранспорту, оптимізації умов його експлуатації та розвитку сталої транспортної інфраструктури.

Аналіз публікацій

Постійне зростання популярності електромобілів (EVs) у світі створює нові виклики для автовиробників – потрібно забезпечити стабільну й ефективну роботу машин у різних умовах експлуатації. До найважливіших чинників, які враховують при оцінюванні ефективності використання EVs, належать температура навколишнього середовища та характер експлуатації (міський або міжміський режим руху). Згідно з результатами досліджень [5–7], саме температура є одним з найвпливовіших параметрів, що визначає пробіг на одному заряді, оскільки впливає як на хімічні процеси в батареї, так і на додаткове енергоспоживання кліматичних систем.

У статті [7] детально пояснюється механізм деградації всередині акумулятора, описано основні фактори, що відповідають за старіння, та їхній вплив на акумулятор під час експлуатації EVs. Автори розглядають різні методи моделювання деградації та прогнозування залишкового ресурсу, а також підходи, що дають змогу сповільнити процес старіння.

Роботи [8–10] показують, що за низьких температур (нижче +4 °C) пробіг EVs може зменшуватися на 20–60 % залежно від температури, конфігурації батареї та наявності теплового насоса. У статті [8] наведено результати дослідження впливу низьких температур на електрохімічні характеристики акумуляторів EVs у режимах паркування, заряджання та руху, а також описано проблеми під час заряджання в холодних умовах і пов'язане з цим зниження продуктивності. Окремо розглядається додатковий вплив масового заряджання EVs на енергомережі.

Результати дослідження Consumer Reports [9] щодо запасу ходу та продуктивності електромобілів у зимових умовах показали, що при зниженні температури від 18 °C до 4 °C запас ходу зменшується приблизно на 25 %. За подальшого розширення діапазону температур зниження може досягати 31 %. Підкреслюється, що короткі поїздки з частими зупинками в холодну погоду можуть скорочувати запас ходу до 50 % через постійну потребу в обігріві салону, тоді як батарея не встигає прогрітися до робочої температури. Також відзначено, що холодна погода негативно впливає не лише на EVs, а й на бензинові та дизельні автомобілі: при зниженні температури від 25 °C до –6 °C витрата палива зростає на 15 %, а для коротких поїздок на 3–4 км – до 33 %.

У роботі [10] показано, що за температури –18 °C запас ходу EV зменшується до 60 % порівняно з умовами при 22 °C, тоді як при 35 °C фіксується лише незначне зниження. Тобто низькі температури впливають на запас ходу значно сильніше, ніж високі.

Роботи [11–15] присвячені моделюванню процесів у електричних силових установках EVs залежно від різних факторів, у тому числі температури, та аналізують, як ці фактори впливають на ефективність роботи й пробіг електромобіля. У дослідженні [11] розглянуто модель електричної силової системи електробуса для міського використання, реалізовану в середовищі Matlab/Simulink. У статті [12] запропоновано квазістаціонарну модель оцінювання споживання енергії EVs, яку застосовано для аналізу впливу температури навколишнього середовища на споживання енергії та запас ходу електромобіля Nissan Leaf. Показано, що за європейським циклом руху (NEDC) запас ходу Nissan Leaf становить близько 150 км при 20 °C, а при 0 °C та –15 °C зменшується приблизно до 85 км і 60 км відповідно.

У роботі [13] наголошується, що літій-іонні акумулятори, які використовують в EVs, мають оптимальний температурний діапазон, а експлуатація поза ним призводить до прискореного старіння – зниження ємності та потужності, особливо в холодному кліматі. Відзначено, що оцінювання параметрів стану й керування тепловим режимом акумуляторів є взаємопов'язаними завданнями і мають розглядатися разом: стан та продуктивність батареї залежать від температури, а температура – від умов експлуатації, стану, конструкції та системи терморегулювання. Автори вважають, що перспективними методами для оцінювання пробігу EVs є пов'язані теплові та електричні моделі з адаптивною фільтрацією, а також методи рекурентних нейронних мереж.

У роботі [14] підкреслено, що точне моделювання акумуляторних систем EVs є важливим для оптимізації продуктивності, підвищення ефективності та продовження терміну служби батарей. Розглянуто основні електрохімічні механізми, які впливають на роботу акумулятора, зокрема внутрішній опір, стан заряду та температурні ефекти, і сформовано цілісне уявлення про математичне моделювання акумуляторів в EVs. Стаття [15] узагальнює різні підходи до моделювання, що використовуються для оцінки спожи-

вання енергії та запасу ходу EVs. Показано, що результати, отримані за допомогою аналітичної моделі транспортного засобу, добре узгоджуються з випробуваннями на динамометричному стенді шасі і можуть використовуватися для оптимізації розміру та конфігурації компонентів силової установки EVs.

Щодо впливу швидкості, численні дослідження [16–18] демонструють, що зі збільшенням швидкості понад 90 км/год витрата енергії зростає нелінійно через зростання аеродинамічного опору. Це підтверджено також у [19], де проаналізовано вплив різних циклів водіння (WLTP, EPA та NEDC) на енергоспоживання та запас ходу EVs.

Таким чином, наявні роботи [5–19] детально показують вплив температури та швидкості на стан акумулятора, енергоспоживання та пробіг електромобілів, а також пропонують різні підходи до моделювання цих процесів. Водночас для окремих моделей електромобілів, зокрема Hyundai Kona Electric, кількість емпіричних досліджень в реальних умовах експлуатації залишається обмеженою. Це обґрунтовує доцільність проведення даного дослідження.

Мета та постановка задачі

Метою дослідження є визначення впливу температури навколишнього середовища та швидкісних режимів руху на запас ходу електромобіля Hyundai Kona Electric у реальних умовах експлуатації в місті та на автомагістралі.

Особливу увагу приділено аналізу змін ефективності використання енергії високовольтної батареї за різних температурних режимів і швидкостей руху, що дозволяє оптимізувати стиль водіння та керування ресурсами батареї для підвищення енергоефективності електромобіля.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз публікацій щодо споживання енергії та запасу ходу EVs;
- визначити методологію дослідження та його основні етапи;
- експериментально дослідити особливості експлуатації EV в міських умовах за різних температур та швидкостей руху;
- експериментально дослідити особливості експлуатації EV на автомагістралі за різних температур та швидкостей руху.

Обладнання та методика дослідження

Для забезпечення достовірності та відтворюваності експериментальних вимірювань у дослідженні використовували такий комплект обладнання та інструментів [20].

1. Досліджуваний електромобіль:

- модель: Hyundai Kona Electric;
- рік випуску: 2019;
- Комплектація: максимальна, з наявністю зимового пакета;
- характеристики високовольтної батареї: тип – літій-іонна; ємність: 64 кВт·год; ступінь зносу батареї (SOH): 97,1 %;
- пробіг на момент дослідження: ≈155 тис. км.

2. Системи збору та фіксації даних:

- панель приладів (ПП) електромобіля (використовувалась для фіксації середнього споживання електроенергії за поїздки (рис. 1а));
- мультимедійна система (отримуються дані щодо розподілу споживаної енергії між основними системами авто).

3. Сканер для діагностики та збору інформації – Car Scanner ELM OBD-II. Він дозволяє отримувати наступні показники (рис. 1в):

- стану заряду батареї (SOC Display та SOC BMS);
- швидкості руху електромобіля;
- температури навколишнього середовища.

Передача даних від автомобіля здійснюється через Bluetooth-з'єднання зі смартфоном/планшетом з відповідним програмним забезпеченням.

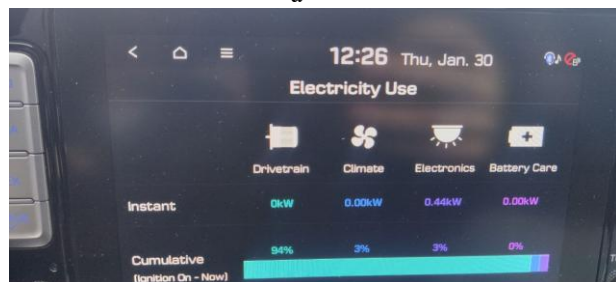
4. Умови тестування:

- маршрути міських випробувань – кільцевий маршрут протяжністю 26 км; для кожного температурного інтервалу виконували подвійний проїзд;
- маршрути випробувань на автомагістралі – ділянка автомагістралі довжиною 38 км; контроль швидкості руху на рівнях 90 км/год, 100 км/год, 110 км/год та 120 км/год.

Перед кожним заїздом скидали показники бортового комп'ютера, які відображаються на цифровій ПП електромобіля. Після завершення заїзду робили фотографії ПП, екрана мультимедійної системи та екрана застосунку Car Scanner ELM OBD-II. Отримані показники заносили до таблиці 1 для подальшого аналізу.



а



б



в

Рис. 1 – Фіксація показників експериментальних досліджень електромобіля Hyundai Kona Electric: а – дисплей панелі приладів; б – екран мультимедійної системи; в – екран сканера Car Scanner ELM OBD-II

Таблиця 1 – Показники експериментальних досліджень Hyundai Kona Electric у міських умовах експлуатації, 1-й заїзд за маршрутом довжиною 26 км

Дата	Час, хв	Спожив., кВт на 100 км	Т, °C	Пробіг на 100% заряду, км			Display, %		BMS, %		Витрачено заряду, %		Витрати			
				3а Display	3а BMS	3а ПП	SOC, початок	SOC, кінець	SOC, початок	SOC, кінець	Display	BMS	Driv.-rain, %	Clim., %	Elec., %	Battery care, %
17.02.25	38	19,4	-14	325	347	330	59,5	51,5	57,5	50	8	7,5	65	28	7	0
11.02.25	42	19,3	-12	307	326	332	66	57,5	64	56	8,5	8	63	29	8	0
10.02.25	41	18,3	-8	400	400	350	50	43,5	49	42,5	6,5	6,5	-	-	-	0
09.02.25	38	17,5	-6,5	326	348	366	71	63	69	61,5	8	7,5	69	24	7	0
13.12.24	47	18,9	-3	473	520	339	87,5	82	85	80	5,5	5	73	16	11	0
03.12.24	40	16,3	-1,5	359	386	393	55,5	48,5	54	47,5	7	6,5	72	19	9	0
01.03.25	42	16,4	0	473	520	390	83,5	78	79	74	5,5	5	74	16	10	0
01.01.25	39	15,9	2	475	522	403	81,5	76	79	74	5,5	5	68	20	12	0
03.02.25	42	15,6	2,5	473	473	410	96	90,5	93	87,5	5,5	5,5	66	27	7	0
24.12.24	48	14,9	5,5	402	402	430	84	77,5	81,5	75	6,5	6,5	65	27	8	0
09.01.25	43	14,5	6,5	400	400	441	52,5	46	51	44,5	6,5	6,5	65	24	11	0
29.03.25	44	13,1	12	520	520	489	40	35	39	34	5	5	92	0	8	0
23.03.25	40	11,8	14	734	734	542	97,5	94	95	91,5	3,5	3,5	92	0	8	0
08.05.25	45	11,4	18	520	578	561	88	83	85,5	81	5	4,5	91	0	9	0
05.05.25	49	11,6	19	400	433	552	70	63,5	68	62	6,5	6	90	1	9	0
17.04.25	46	12	20	473	520	533	35	29,5	34	29	5,5	5	90	0	10	0
25.04.25	46	11,8	24	578	650	542	76	71,5	73,5	69,5	4,5	4	91	0	9	0
06.07.25	38	11,2	26	473	433	571	65,5	60	64	58	5,5	6	91	0	9	0
23.04.25	45	11,9	28	578	578	538	75,5	71	73,5	69	4,5	4,5	92	0	8	0
08.07.25	46	12,5	36	650	743	512	77	73	74,5	71	4	3,5	75	15	10	0

Дослідження електромобіля в міських умовах

На рис. 2 показано середній пробіг у міських умовах за різних температур відповідно до табл. 1. Найвищі значення досягаються за додатних температур, тоді як зниження температури суттєво впливає на запас ходу. Для формування більш повної картини дослідження проводили за трьома показниками:

- за показниками на ПП;

– за показниками остаточного заряду високовольтної АКБ, що відображаються на дисплеї;

– за показниками остаточного заряду високовольтної АКБ, що показують датчики BMS.

Також для розуміння загального тренду зміни показників пробігу побудовано лінію тренду, яка базується на показниках, що відображаються на дисплеї панелі приладів (крива з точок).

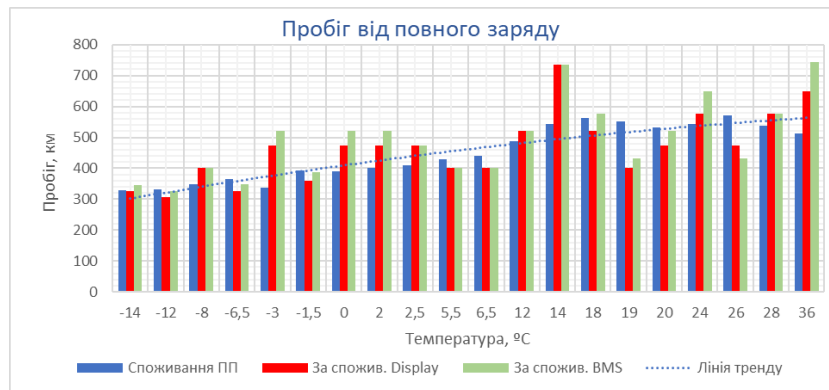


Рис. 2 – Міські умови: середній пробіг залежно від температури за показниками споживання енергії EV

Для опису зміни пробігу електромобіля залежно від температури навколишнього середовища найчастіше використовують лінійну або поліноміальну лінію тренду. Вибір типу лінії тренду залежить від характеру емпіричних даних. У цьому дослідженні обрано поліноміальну лінію тренду 2-го ступеня:

$$y=ax^2+bx+c,$$

де y – пробіг електромобіля; x – температура навколишнього середовища.

Вибір поліноміальної лінії тренду 2-го ступеня обумовлений її перевагами у порівнянні з іншими, а саме:

- вона добре описує реальну фізичну поведінку високовольної батареї електромобіля, коли зниження пробігу має нелінійний характер. Наприклад, при легкому похолоданні пробіг майже не змінюється, але при сильному морозі (нижче 0°C) він швидко па-

дає. Це характерно для електромобілів через поведінку високовольної батареї у холод;

- графік має форму параболи, що відображає U-подібну або перевернуту U-подібну криву залежно від контексту. Наприклад, зменшення пробігу при холоді.

За графіками рис. 2 видно, що пробіг електромобіля зростає з підвищенням температури і досягає максимального значення біля 26 °C. Потім, запас ходу повчине зменшуватися. Це пояснюється тим, що починає працювати кліматична система на охолодження салону електромобіля і, відповідно, витрачає на це енергію високовольної батареї.

За отриманими даними експериментальних досліджень побудовано графіки залежності споживання електроенергії електромобілем від температури навколишнього середовища, рис. 3.

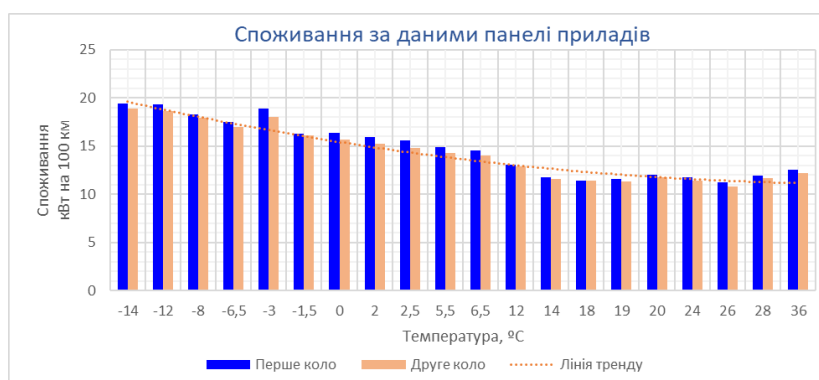


Рис. 3 – Міські умови: залежність споживання електроенергії (за показниками ПП) електромобілем Hyundai Kona Electric від температури навколишнього середовища

Другий заїзд (або друге коло) має трохи менші показники споживання електроенергії. Це пояснюється тим, що електросилова система електромобіля, а особливо високо-

вольтна батарея, прогрівається і виходить на свій оптимальний режим роботи. Відповідно, бортовий комп'ютер розраховує показники споживання електроенергії і пробігу елек-

тромабіля вже з урахуванням поточних умов. На початку роботи електромобіля здійснюється інтенсивна підготовка високовольтної батареї до її оптимальних параметрів (прогрівання або охолодження), тому, тут завжди показники будуть завищеними. Бортовий комп'ютер перераховує споживання у відповідності до пройденого шляху. Відповідно, більш реальними або адекватними можна вважати показники другого кола (заїзду), на які і будемо спиратися при подальшому аналізі. Тому, лінію тренду побудовано саме за даними другого кола випробувань.

Аналізуючи побудовані графіки можна зазначити, що температура 26 °C є найбільш оптимальною для даних умов експлуатації електромобіля Hyundai Kona Electric. Подальше зростання температури призводить до більшого споживання електроенергії електричними і електронними системами електромобіля. Найбільш сприятливий температурний діапазон для експлуатації Hyundai Kona Electric стано-

вить від 10 °C до 30 °C (рис. 2, рис. 3). Це досить широкий діапазон зовнішніх температур, який забезпечує ефективне використання електромобіля. Вихід температури за ці межі призводить до збільшення споживання електроенергії електричними та електронними системами автомобіля. Варто зазначити, що досліджуваний електромобіль оснащений зимовим пакетом і тепловим насосом, що додатково зменшує споживання електроенергії завдяки більшій ефективності системи опалення, як це показано у роботах [8–10].

Дослідження електромобіля в умовах автомагістралі

Також були проведені експериментальні дослідження залежності пробігу та електроспоживання електромобіля від температури навколишнього середовища на автомагістралі. Отримані дані зведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень експлуатації електромобіля Hyundai Kona Electric за круговим маршрутом довжиною 38,3 км по автомагістралі

Дата	Час, хв	Спожив., кВт на 100 км	Т, °C	Пробіг на 100% заряду, км			Display, %		BMS, %		Витрачено заряду, %		Витрати			
				За Display	За BMS	За ІІІ	SOC, початок	SOC, кінець	SOC, початок	SOC, кінець	Display	BMS	Driv. rain, %	Climate, %	Electronics %	Battery care, %
22.02.25	27	19	-11	349	366	337	73	62	70,5	60	11	10,5	90	7	3	0
22.02.25	24	20,7	-11	334	334	309	62	50,5	60	48,5	11,5	11,5	91	6	3	0
22.02.25	22	22,7	-11	295	306	282	50,5	37,5	48,5	36	13	12,5	92	5	3	0
22.02.25	20	24,4	-11	225	239	262	37,5	20,5	36	20	17	16	94	4	2	0
07.02.25	27	17,4	-4	451	479	368	82	73,5	79,5	71,5	8,5	8	94	3	3	0
07.02.25	24	19,7	-4	365	365	325	73,5	63	71,5	61	10,5	10,5	94	3	3	0
07.02.25	22	21,5	-4	319	333	298	63	51	61	49,5	12	11,5	94	3	3	0
07.02.25	21	24	-4	295	306	267	51	38	49,5	37	13	12,5	96	2	2	0
15.01.25	27	16,2	1,5	364	364	395	56	45,5	54,5	44	10,5	10,5	90	7	3	0
15.01.25	24	17,8	1,5	295	306	360	45,5	32,5	44	31,5	13	12,5	91	6	3	0
15.01.25	22	20,3	1,5	255	263	315	32,5	17,5	31,5	17	15	14,5	92	6	2	0
15.01.25	20	22,3	1,5	274	284	287	30	16	29	15,5	14	13,5	93	5	2	0
30.01.25	27	15,4	6	333	348	416	80,5	69	78	67	11,5	11	88	10	2	0
30.01.25	24	16,9	6	284	295	379	69	55,5	67	54	13,5	13	89	9	2	0
30.01.25	23	19,1	6	264	274	335	55,5	41	54	40	14,5	14	90	8	2	0
30.01.25	20	21,2	6	225	232	302	41	24	40	23,5	17	16,5	90	8	2	0
30.03.25	27	15,5	10	511	547	413	85	77,5	80,5	73,5	7,5	7	98	0	2	0
30.03.25	24	17,1	10	403	426	374	77,5	68	73,5	64,5	9,5	9	98	0	2	0
30.03.25	22	19,3	10	347	364	332	68	57	64,5	54	11	10,5	98	0	2	0
30.03.25	20	22,1	10	319	348	290	57	45	54	43	12	11	98	0	2	0
27.03.25	27	14	15,5	451	426	457	79	70,5	77	68	8,5	9	97	1	2	0
27.03.25	24	15,4	15,5	348	365	416	70,5	59,5	68	57,5	11	10,5	97	1	2	0
27.03.25	22	17,4	15,5	332	347	368	59,5	48	57,5	46,5	11,5	11	97	1	2	0
27.03.25	21	18,4	15,5	255	264	348	48	33	46,5	32	15	14,5	97	1	2	0
30.05.25	27	13,3	24	478	478	481	78,5	70,5	76,5	68,5	8	8	94	3	3	0
30.05.25	24	15	24	365	365	427	70,5	60	68,5	58	10,5	10,5	94	3	3	0
30.05.25	22	16,8	24	347	364	381	60	49	58	47,5	11	10,5	95	3	2	0
30.05.25	20	18,6	24	255	274	344	49	34	47,5	33,5	15	14	95	3	2	0
24.04.25	27	13,7	27	547	547	467	85	78	82,5	75,5	7	7	97	0	3	0
24.04.25	24	15,1	27	449	478	424	78	69,5	75,5	67,5	8,5	8	97	0	3	0
24.04.25	22	17	27	364	382	376	69,5	59	67,5	57,5	10,5	10	97	0	3	0
24.04.25	20	18,7	27	348	348	342	59	48	57,5	46,5	11	11	98	0	2	0
12.07.25	27	13,9	33	511	547	460	82,5	75	80	73	7,5	7	89	7	4	0
12.07.25	24	15	33	424	424	427	75	66	73	64	9	9	91	6	3	0
12.07.25	22	16,9	33	364	382	379	66	55,5	64	54	10,5	10	92	5	3	0
12.07.25	20	18,8	33	348	348	340	55,5	44,5	54	43	11	11	92	5	3	0

Дослідження проводили впродовж одного дня. Вимірювали показники при швидкостях 90 км/год (перший рядок табл. 2, позначений сірим фоном), 100 км/год (другий рядок), 110 км/год (третій рядок) та 120 км/год (четвертий рядок).

За даними табл. 2 побудовано графіки залежності пробігу електромобіля від температури навколишнього середовища при різних швидкостях руху, рис. 4.

Як видно з рис. 4, найменші пробіги спостерігаються при високих швидкостях та низьких температурах. Але найбільший інтерес викликає саме швидкість цих змін. Якраз це можна оцінити на наведених гістограмах, рис. 4.

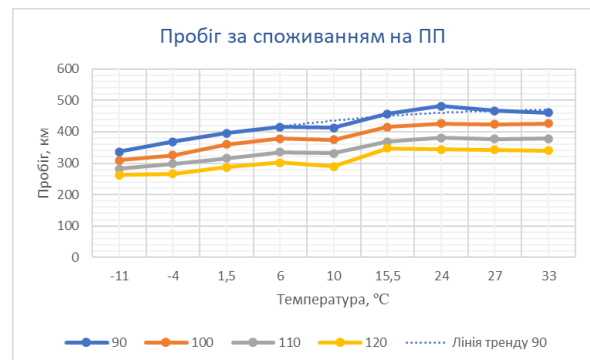
На рис. 5 наведено графік залежності споживання електроенергії (за показниками ПП) електромобілем Hyundai Kona Electric від температури навколишнього середовища, яку побудовано за даними табл. 2.

Порівнюючи графіки рис. 4 та рис. 5 можна зробити висновок, що загальний характер змін показників споживання електроенергії та пробігу електромобіля залишається незмінним, а самі конкретні значення різняться. При цьому дані за показниками датчиків BMS є зазвичай більшими. Це пояснюється тим, що, по-перше, система приблизно оцінює заряд високовольтної батареї електромобіля, і, по-друге, заряд за показниками датчиків BMS враховує всю ємність батареї, разом і з зарезервованою частиною (для електромобіля Hyundai Kona Electric це складає близько 3 кВт·год).

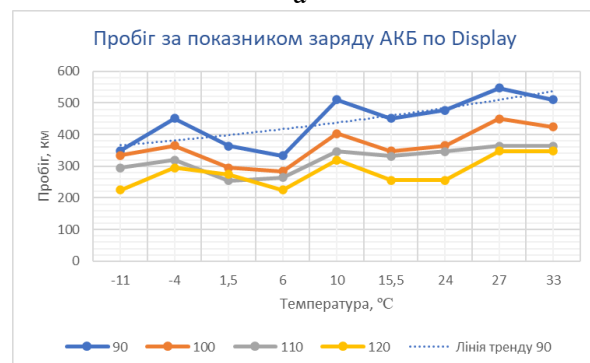
Варто зауважити, що у Hyundai Kona Electric система резервує частину ємності батареї для забезпечення її довговічності та надійності, а також для захисту від надмірної зарядки або розрядки. Зазвичай в електромобілях, це становить 5-10% від загальної ємності батареї, але точні цифри можуть варіюватися в залежності від конкретної моделі, конфігурації, версії програмного забезпечення електричних та електронних систем електромобіля, та його року випуску.

Проведені дослідження пробігу електромобіля за показниками заряду високовольтної батареї показали, що зменшення значення заряду є нелінійним. Тобто, чим менший заряд, тим швидше зменшуються показники пробігу електромобіля на ПП. Тому, для більш точного прогнозування та оцінювання залишкового пробігу електромобіля, слід орієнтуватися не лише на поточний рівень

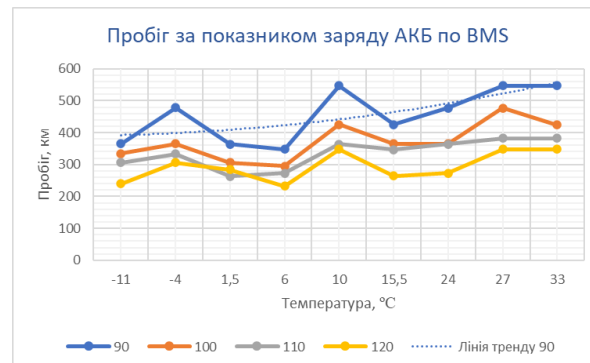
заряду, а враховувати витрати електроенергії та динаміку зміни стану заряду (SOC) високовольтної батареї в процесі її розряду.



а



б



в

Рис. 4 – Дослідження на автомагістралі: середній пробіг електромобіля Hyundai Kona Electric в залежності від температури та швидкості руху: а – за показниками споживання енергії на ПП; б – за показниками заряду високовольтної батареї, що відображаються на Display; в – за показниками заряду високовольтної батареї, що показують датчики BMS

Показники споживання енергії на ПП електромобіля є найбільш реалістичними та адекватними, тому, як і при дослідженні в міських умовах, надалі спиратимемося саме на них при формуванні загальних висновків і рекомендацій. Аналізуючи побудовані графіки (рис. 4 та рис. 5), можна зазначити, що під час руху по автомагістралі оптимальна тем-

пература навколишнього середовища, за якої забезпечується найбільший пробіг електро-мобіля Hyundai Kona Electric, становить близько 24 °C.

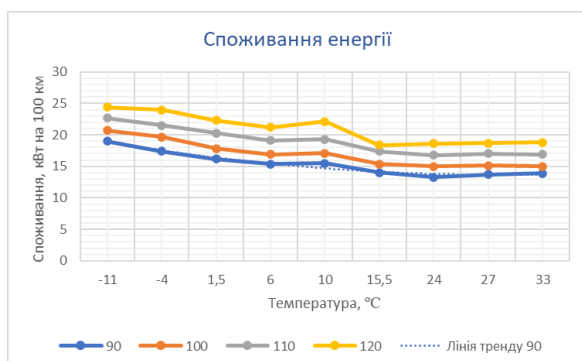


Рис. 5 – Дослідження на автомагістралі: залежність споживання електроенергії (за показниками ПП) електро-мобілем Hyundai Kona Electric від темпера навколишнього середовища

Цей показник дуже близький до значення для міських умов (26 °C) і фактично лежить у межах статистичної похибки. Навіть невеликий вітер зі швидкістю 3–4 м/с може додавати до 1,5 кВт·год/100 км споживання електроенергії, залежно від його напрямку [21]. Подальше зростання температури призводить до збільшення споживання електроенергії бортовими системами електро-мобіля. Найбільш сприятливий температурний діапазон для експлуатації Hyundai Kona Electric у трасових умовах становить від 15 °C до 27 °C згідно з результатами, наведеними на рис. 4 та рис. 5. Фактично цей температурний діапазон збігається з аналогічним діапазоном для міських умов експлуатації електро-мобіля. Як і в попередніх дослідженнях, вихід за межі цього діапазону температур призводить до підвищеного споживання електроенергії.

Висновки

Проведений аналіз експериментальних даних щодо впливу температури навколишнього середовища та швидкості руху на пробіг електро-мобіля Hyundai Kona Electric у реальних умовах експлуатації дозволяє зробити такі узагальнення.

Основними науковими результатами даної роботи є:

- показано, що температурний режим істотно впливає на ефективність роботи високовольтної батареї: за температур нижче 0 °C пробіг електро-мобіля помітно зменшується через погіршення хімічної активності

елементів батареї та зростання споживання енергії системами обігріву;

- встановлено, що зі збільшенням швидкості руху, особливо понад 90 км/год, різко зростає аеродинамічний опір, що призводить до підвищеного енергоспоживання і, відповідно, до зменшення запасу ходу;

- визначено, що для досліджуваного електро-мобіля Hyundai Kona Electric 2019 року випуску оптимальний температурний діапазон у міських умовах становить приблизно від 10 °C до 30 °C, а в умовах руху по автомагістралі – від 15 °C до 27 °C; саме в цих межах електро-мобіль демонструє найкраще співвідношення між витратами енергії та пройденою відстанню.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що на їх основі можна сформулювати прості рекомендації для підвищення пробігу електро-мобіля на одному заряді, а саме:

- підтримувати плавний стиль водіння без різких прискорень і гальмувань;

- у міських умовах максимально використовувати режим рекуперації для гальмування;

- під час руху по автомагістралі за потреби руху «накатом» зменшувати рівень рекуперації;

- уникати тривалого руху на високих швидкостях, особливо за низьких температур;

- планувати маршрути з урахуванням температури навколишнього середовища та потреб у кліматичному контролі;

- за наявності функції «Driver only» використовувати її для зменшення споживання енергії системою опалення та кондиціонування.

Отримані результати можуть бути корисними для водіїв, автопарків, логістичних компаній та виробників під час планування маршрутів, вибору режимів руху й налаштування систем керування енергією електро-мобіля. Водночас дослідження виконано для одного екземпляра Hyundai Kona Electric з певним станом батареї, на фіксованих маршрутах і в конкретних кліматичних умовах, що потрібно враховувати під час поширення висновків на інші моделі та регіони. Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналіз інших моделей електро-мобілів з різними типами та станом батарей, а також на дослідження інших профілів маршрутів із поєд-

нанням експериментальних даних та деталь-ного моделювання енергоспоживання.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інте-ресів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Patlins, A., Hnatov, A., Kunicina, N., Arhun, S., Zabasta, A., & Ribickis, L. (2018, July). Sustainable pavement enabling electricity production for road lighting using green energy. In *2018 Energy and Sustainability for Small Developing Economies (ES2DE)* (pp. 1–2). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ES2DE.2018.8494236>
2. 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. <https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316601>
3. 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. <https://doi.org/10.3390/educsci10100282>
4. Аргун, Ш. В., Гнатов, А. В., & Ульянець, О. А. (2016). Екологічний та енергоефективний автомобільний транспорт та його інфраструктура. *Вісник ЖДТУ*, 2(77), 18–26. Arhun, Sh. V., Hnatov, A. V., & Ulyanets, O. A. (2016). Ekolohichnyi ta enerhoefektyvnyi avtomobilnyi transport ta yoho infrastruktura [Ecological and energy-efficient automobile transport and its infrastructure]. *Visnyk ZhDTU*, 2(77), 18–26. [in Ukrainian].
5. Qian, K., Zhou, C., Yuan, Y., & Allan, M. (2010, September). Temperature effect on electric vehicle battery cycle life in vehicle-to-grid applications. In *CICED 2010 Proceedings* (pp. 1–6). IEEE.
6. Samadani, E., Mastali, M., Farhad, S., Fraser, R. A., & Fowler, M. (2016). Li-ion battery performance and degradation in electric vehicles under different usage scenarios. *International Journal of Energy Research*, 40(3), 379–392. <https://doi.org/10.1002/er.3378>
7. Timilsina, L., Badr, P. R., Hoang, P. H., Ozkan, G., Papari, B., & Edrington, C. S. (2023). Battery degradation in electric and hybrid electric vehicles: A survey study. *IEEE Access*, 11, 42431–42462. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3271287>
8. Senol, M., Bayram, I. S., Naderi, Y., & Galloway, S. (2023). Electric vehicles under low temperatures: A review on battery performance, charging needs, and power grid impacts. *IEEE Access*, 11, 39879–39912. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3268615>
9. Ekoenergetyka. (2023). Does cold weather affect the performance of your electric vehicle (EV)? Retrieved from <https://ekoenergetyka.com/blog/does-cold-weather-affect-the-performance-of-your-electric-vehicle-ev/>
10. Seo, J., Vijayagopal, R., Kim, N., Rousseau, A., & Stutenberg, K. (2025). Effects of ambient temperature on electric vehicle range considering battery performance, powertrain efficiency, and HVAC load. *Energy Conversion and Management*, 326, 119493. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119493>
11. Hnatov, A., Arhun, S., Tarasov, K., Hnatova, H., Mygal, V., & Patlins, A. (2019, October). Researching the model of electric propulsion system for bus using Matlab Simulink. In *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RTUCON48111.2019.8982352>
12. Iora, P., & Tribioli, L. (2019). Effect of ambient temperature on electric vehicles' energy consumption and range: Model definition and sensitivity analysis based on Nissan Leaf data. *World Electric Vehicle Journal*, 10(1), 2. <https://doi.org/10.3390/wevj10010002>
13. Karlsen, H., Dong, T., Yang, Z., & Carvalho, R. (2019). Temperature-dependence in battery management systems for electric vehicles: Challenges, criteria, and solutions. *IEEE Access*, 7, 142203–142213. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2943558>
14. Bairwa, B., & Soujanya, R. (2024, April). Mathematical modeling and analysis of electric vehicle battery. In *2024 1st International Conference on Innovative Sustainable Technologies for Energy, Mechatronics, and Smart Systems (ISTEMS)* (pp. 48–53). IEEE.
15. Gurusamy, A., Ashok, B., & Mason, B. (2023). Prediction of electric vehicle driving range and performance characteristics: A review on

- analytical modeling strategies with its influential factors and improvisation techniques. *IEEE Access*, 11, 131521–131548.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3334620>
16. Galvin, R. (2017). Energy consumption effects of speed and acceleration in electric vehicles: Laboratory case studies and implications for drivers and policymakers. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 234–248.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.020>
17. Wager, G., Whale, J., & Braunl, T. (2016). Driving electric vehicles at highway speeds: The effect of higher driving speeds on energy consumption and driving range for electric vehicles in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 158–165.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.060>
18. Wang, J., Besselink, I., & Nijmeijer, H. (2015). Electric vehicle energy consumption modelling and prediction based on road information. *World Electric Vehicle Journal*, 7(3), 447–458.
<https://doi.org/10.3390/wevj7030447>
19. Kuttey, V. K., & Bali, S. K. (2024, July). Effect of various drive cycles on battery electric vehicle (BEV). In *2024 International Conference on Computational Intelligence for Green and Sustainable Technologies (ICCIGST)* (pp. 1–4). IEEE.
20. Hnatov, A., Arhun, S., & Migal, V. (2025). Experimental assessment of temperature and speed effects on Hyundai Kona Electric driving range and energy consumption. In *Transport Means 2025: Proceedings of the 29th International Scientific Conference Transport Means* (Kaunas, Lithuania, 1–3 October 2025).
21. Tran, T. B., Kolmanovsky, I., Biberstein, E., Makke, O., Tharayil, M., & Gusikhin, O. (2024). Effect of wind on electric vehicle energy consumption: Sensitivity analyses and implications for range estimation and optimal routing. *ACM Journal on Autonomous Transportation Systems*, 1(2), Article 8.
<https://doi.org/10.1145/3633460>

Гнатів Андрій¹, д.т.н., проф., завідувач каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Аргун Щасяна^{1,2}, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Ульянець Ольга¹, асистент каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0957336312,

olga.ulyanets@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9384-4557>

Іванов Дмитро¹, аспірант каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0675723905, Kylinichii44@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8230-6854>

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

²University College London, The Bartlett School of Sustainable Construction, Gower Street, London, WC1E 6BT, Greater London, United Kingdom.

Impact of Ambient Temperature and Vehicle Speed on the Driving Range of Hyundai Kona Electric

Abstract. Problem. One of the key parameters for electric vehicle (EV) users is the actual driving range – the distance a vehicle can travel on a single battery charge. Environmental conditions, particularly ambient temperature, as well as driving style and vehicle speed, significantly affect energy consumption. Despite numerous technical reviews and manufacturer specifications, real-world operating conditions often show considerable deviations from the stated performance. Therefore, an empirical investigation into the influence of temperature and speed on the driving range, using the popular Hyundai Kona Electric as a case study, is highly relevant. **Goal.** This study aims to identify the relationship between ambient temperature, driving speed modes and the actual driving range of the Hyundai Kona Electric under real-world operating conditions. Special attention is given to how the efficiency of high-voltage battery usage changes under various temperature and speed conditions, enabling users to optimise driving style and energy management to enhance overall energy efficiency. **Methodology.** To ensure data reliability and repeatability, the research uses a 2019 Hyundai Kona Electric in its highest configuration, equipped with a heat pump. Data collection was carried out via the vehicle's dashboard, dedicated multimedia display screens and the Car Scanner ELM OBD-II diagnostic tool. Data transmission from the vehicle to a smartphone or tablet was performed via a Bluetooth connection with dedicated software. **Results.** Temperature significantly affects battery efficiency. At low temperatures (below 0 °C), a noticeable reduction in driving range is observed due to decreased electrochemical activity and increased energy consumption by heating systems. For urban driving conditions, the optimal ambient temperature range is between 10 °C and 30 °C. On highways, the

optimal temperature range narrows to between 15 °C and 27 °C; within these temperature ranges, the energy consumption and distance travelled show the most favourable balance. **Originality.** In highway operation, the optimal ambient temperature providing the maximum driving range is approximately 24 °C, which closely aligns with the optimal value for city driving, around 26 °C. Even light wind (3–4 m/s), depending on its direction, may increase energy consumption by up to 1.5 kWh per 100 km. **Practical value.** The study offers practical recommendations for EV users aiming to maximise driving range. The findings are valuable for individual drivers, fleet operators, logistics companies and manufacturers seeking to improve EV efficiency, reduce operating costs and extend battery lifespan.

Key words: electric vehicle, EV driving range, vehicle mileage, SOH, energy efficiency, Hyundai Kona Electric.

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

Shchasiana Arhun^{1,2}, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0993780451, shasyana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Olha Ulianets ¹, assistant professor of Vehicle Electronics Department, tel.+38 0957336312, olga.ulyanets@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9384-4557>

Dmytro Ivanov¹, post graduate student of Vehicle Electronics Department, tel.+38 0675723905, Kylinichii44@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8230-6854>

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

²University College London, The Bartlett School of Sustainable Construction, Gower Street, London, WC1E 6BT, Greater London, United Kingdom.

Методи розрахунку реалізованого зчеплення між шиною автомобільного колеса та поверхнею дорожнього покриття

Леонт'єв Д. М.¹, Сметанін Г. В.¹, Володін В. В.^{1,2},

Малий В. М.¹, Рябушенко О. В.¹, Товт Б. М.³

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

²Комунальний заклад «Харківський ліцей № 154 Харківської міської ради», Україна

³Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Україна

Надійшла: 09.09.2025. Прийнято: 04.12.2025. Опубліковано: 08.12.2025. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. Забезпечення безпеки дорожнього руху не можливе без точного прогнозування поведінки транспортного засобу у різних умовах експлуатації, тому визначення реалізованого зчеплення шини з поверхнею дорожнього покриття є актуальною задачею. В роботі проведено поглиблений аналіз літературних джерел і математичних моделей, здійснено чисельне моделювання з фіксованими значеннями ключових точок « $f - S$ діаграми» та проведено порівняльну оцінку точності отриманих результатів. Встановлено, що не всі моделі дають повноцінний опис процесу реалізації зчеплення в усьому діапазоні ковзання шини. Частина рівнянь забезпечує високу точність лише у режимах часткового ковзання, водночас інші відомі моделі мають значні похибки та обмежену придатність. Отримані дані можуть бути використані при створенні пневматичних шин, оптимізації систем активної безпеки та високоточних симуляторів руху транспортних засобів на дорогах з різним покриттям.

Ключові слова: реалізоване зчеплення; коефіцієнт зчеплення; шина; автомобільне колесо; поверхня дорожнього покриття.

Вступ

Методи розрахунку реалізованого зчеплення шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття є важливими для забезпечення безпеки руху транспортних засобів.

Точні розрахунки зчеплення дозволяють прогнозувати поведінку автомобіля за різних умов, зокрема на мокрому, слизькому або заśnieженому покритті.

Це особливо актуально для розвитку сучасних систем активної безпеки, таких як антиблокувальна система, система стабілізації руху транспортного засобу, система розподілу гальмового зусилля.

Слід відзначити, що правильний вибір методу розрахунку реалізованого зчеплення шини автомобільного колеса із поверхнею дорожнього покриття дозволяє забезпечити ра-

ціональне проектування шини та виконати підбір її характеристик.

Аналіз публікацій

Як показує аналіз науково-технічної літератури існує багато методів розрахунку реалізованого зчеплення, які дозволяють виконати обчислення значень зчеплення в залежності від різних факторів, що впливають на реалізацію зчеплення шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття. Розглянемо детальніше ці методи.

Найвідомішим методом визначення реалізованого зчеплення в залежності від ковзання шини, в плямі контакту, відносно поверхні дорожнього покриття є метод, який запропонований Н. Расејка [1].

Запропоноване ним рівняння (1) для визначення f_x він представив у вигляді так званої «Магічної формули», яка є апроксимацією результатів багатьох експериментальних досліджень виконаних для шин різних типорозмірів та конструкцій:

$$f_x = D_0 \cdot \sin \left(C \cdot \arctan \left(B_s \cdot S^* - E \cdot \left(B_s \cdot S^* - \arctan \left(B_s \cdot S^* \right) \right) \right) \right) - S_v, \quad (1)$$

де C – коефіцієнт, що визначає вид "f - S діаграми" (вибирається в межах $1,8 \div 2,0$); D_0 – коефіцієнт, що визначає значення максимуму реалізованого зчеплення (f_m); B_s – коефіцієнт, що визначає критичне ковзання шини, обирається в межах $5 \div 10$; E – коефіцієнт, що впливає на значення величини тертя шини в момент 100% ковзання шини відносно поверхні дорожнього покриття (змінюється в межах $0,5 \div 1,1$); S_v – величина, на яку зміщується f - S діаграма по вертикальній шкалі (можна прийняти рівним величині коефіцієнту опору кочення (f_0) автомобільного колеса); S^* – поздовжнє прослизання колеса з урахуванням зсуву початку «f - S діаграми», визначається за залежністю:

$$S^* = S + S_h,$$

де S_h – горизонтальне зміщення «f - S діаграми».

Слід відзначити, що формула (1) дозволяє будувати реалізоване зчеплення шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття для будь яких режимів кочення колеса. Тобто ця формула може бути використана в діапазоні ковзання S від значення мінус 1 до значення плюс 1.

Існує також метод визначення реалізованого зчеплення, який базується на так званій залежності *Burckhardt* [2], яка запропонована для визначення реалізованого зчеплення між шиною та поверхнею дорожнього покриття для гальмового режиму кочення колеса. Це друга за поширеністю залежність, що використовується для опису зміни реалізованого зчеплення залежно від ковзання. Вона представлена в експоненціальному вигляді, як рівняння (2):

$$f_x = \left(A_1 \cdot (1 - e^{-A_2 \cdot S}) - A_3 \cdot S \right) \times \frac{e^{-A_4 \cdot S \cdot V_x}}{R_{z_ст}} \cdot \left(1 + \frac{R_{z_ст}^2}{R_z} \right), \quad (2)$$

де $A_1 = f_m$ – коефіцієнт, що дорівнює максимуму кривої f - S діаграми; A_2 – коефіцієнт, що визначає форму «f - S діаграми» і може бути розрахований численним методом за залежністю:

$$A_2 \cdot e^{A_2 \cdot S_k} = \frac{A_3 \cdot 1000}{A_1};$$

$A_3 = (f_m - f_b)$ – коефіцієнт, який враховує падіння реалізованого зчеплення від максимуму (f_m) до коефіцієнта тертя (f_b) шини о поверхню дорожнього покриття при повному блокуванні колеса; S_k – критичне ковзання шини відносно поверхні дорожнього покриття; A_4 – коефіцієнт, що характеризує вологість довкілля, можна прийняти з діапазону $0,02 - 0,04$; R_z – динамічне навантаження на автомобільне колесо; $R_{z_ст}$ – статичне навантаження на автомобільне колесо; V_x – швидкість руху автомобіля, м/с.

Наступний метод для визначення реалізованого зчеплення уявляє собою залежність *Denny*, яку запропонував в своїй роботі [3] відомий німецький дослідник *Mark Denny*. Він запропонував використовувати для опису «f - S діаграми», в режимі гальмування автомобільного колеса, модифіковану модель авторів *U. Kiencke* та *A. Daiss* у вигляді:

$$f_x = \frac{a_0 \cdot S}{b_0 + c_0 \cdot S + S^2}, \quad (3)$$

де a_0, b_0, c_0 – коефіцієнти, що залежать від значень f_m, f_b та S_k .

Коефіцієнти a_0, b_0, c_0 автор роботи [3] пропонує визначити за рівняннями:

$$a_0 = \frac{f_m \cdot f_b \cdot (1 - S_k)^2}{f_m - f_b};$$

$$b_0 = S_k^2;$$

$$c_0 = \frac{f_b \cdot (1 + S_k^2) - 2 \cdot f_m \cdot S_k}{f_m - f_b}.$$

На відміну від залежності *Denny* залежність запропонована авторами *U. Kiencke* та

А. Daiss в їх роботі [4] має дещо інший вигляд, але вона так само, як і залежність Denno з достатньою точністю дозволяє розрахувати величину f_x в залежності від проковзування (S) пневматичної шини відносно поверхні дорожнього покриття тільки в режимі гальмування автомобільного колеса:

$$f_x = k_s \cdot \frac{S}{c_1 \cdot S^2 + c_2 \cdot S + 1}, \quad (4)$$

де k_s – коефіцієнт, який враховує характер нахилу кривої « $f - S$ діаграми» в діапазоні значень S від 0 до 1; c_1 та c_2 – коефіцієнти, що визначають форму кривої « $f - S$ діаграми».

Коефіцієнти k_s , c_1 та c_2 , що входять в рівняння (4) можна визначити з наступних рівнянь:

$$\begin{aligned} k_s &= f_b \cdot (c_1 + c_2 + 1); \\ c_1 &= \frac{1}{S_k^2}; \\ c_2 &= \frac{f_b \cdot (1 + S_k^2) - 2 \cdot f_m \cdot S_k}{S_k^2 \cdot (f_m - f_b)}. \end{aligned}$$

В роботах [5] для опису реалізованого зчеплення в режимі гальмування автомобільного колеса, також згадується метод, який має дуже простий вигляд, який можна представити у вигляді рівняння (5):

$$f_x = b_1 \cdot \sqrt{S} - b_2 \cdot S, \quad (5)$$

де b_1 та b_2 – коефіцієнти, які відповідають за форму кривої « $f - S$ діаграми».

Слід зазначити, що у разі коли ставиться задача розрахунку реалізованого зчеплення для значень S від 0 до S_k , рівняння (5) забезпечує достатню точність розрахунку, яку можна співставити з лінійними моделями реалізованого зчеплення.

Для такого випадку, коефіцієнти b_1 та b_2 , що входять до рівняння (5) можна визначити з залежностей:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{f_m - f_b \cdot S_k}{\sqrt{S_k - S_k}}; \\ b_2 &= b_1 - f_b. \end{aligned}$$

У разі ж використання рівняння (5) для моделювання процесу блокування автомобільного колеса, тобто при значеннях S від значення критичного проковзування S_k до значення 100% ковзання $S=1$, точність розрахунків може не відповідати дійсності процесу, а похибка розрахунків може змінюватися від 0 до 60% (нуль відсотків в точках f_m та f_b при відповідних значеннях S).

Аналіз рівняння (5) показав, що у разі його адаптації до точніших розрахунків реалізованого зчеплення, в режимі гальмування автомобільного колеса, необхідно його модифікувати у систему (6), яку не складно вирішити на відповідних ділянках значення проковзування $S \in [0, S_k]$ та $S \in [S_k, 1]$:

$$f_x = \begin{cases} b_s (2\sqrt{S_k S} - S) + f_0, & S \in [0, S_k]; \\ b_c (2\sqrt{S_k S} - S - S_k) + f_m, & S \in [S_k, 1], \end{cases} \quad (6)$$

де b_s та b_c – коефіцієнти, які визначають форму « $f - S$ діаграми» на відповідних ділянках значення проковзування S .

Коефіцієнти b_s та b_c визначаються з відповідних рівнянь:

$$\begin{aligned} b_s &= \frac{f_m - f_0}{S_k}; \\ b_c &= \frac{f_m - f_b}{(1 + S_k) - 2 \cdot \sqrt{S_k}}. \end{aligned}$$

Слід зазначити, що система рівнянь (6) на відміну від рівняння (5) враховує зсув величини реалізованого зчеплення відносно нуля по вертикальній шкалі, який виникає із-за коефіцієнта опору кочення (f_0) автомобільного колеса [6, 7].

Ще одним з методів, який звертає на себе увагу, є метод розрахунку реалізованого зчеплення, що базується на рівнянні кубічної параболи, яке запропоновано в роботі [8]:

$$f_x = \frac{\alpha_1}{3} \cdot (S - \alpha_2)^3 + \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2^3}{3}, \quad (7)$$

де α_1 та α_2 – коефіцієнти кубічної параболи.

Аналіз формули (7) показує, що коефіцієнти α_1 та α_2 точно визначають характер зміни реалізованого зчеплення тільки на ділянці від 0 до S_k . На ділянці від S_k до 1 рівняння (7) не має аналітичного рішення і тому воно може

бути вирішено тільки, якщо припустити, що α_1 є функція від S . Всебічний аналіз рівняння (7) показує, що значення α_2 дорівнює S_k для значень проковзування $S \in [0,1]$.

Коефіцієнт α_1 на ділянці від 0 до S_k має однозначне рішення, яке можна представити у вигляді рівняння:

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot f_m}{S_k^3}.$$

Оскільки на ділянці від S_k до 1 кубічне рівняння (7) не має однозначного рішення, коефіцієнт α_1 можна представити у вигляді функції від проковзування:

$$\alpha_1(S) = \frac{3 \cdot \left(\frac{(f_m - f_b) \cdot (S - 1)}{(S_k - 1)} + f_b \right)}{(S - S_k)^3 + S_k^3},$$

яка побудована на основі припущення, що характер зміни реалізованого зчеплення від значення f_m до значення f_b лінійно змінюється на ділянці від S_k до 1.

Існує також модель реалізованого зчеплення, яка базується на експоненціальному законі, що представляється у вигляді рівняння:

$$f_x = f_b \left(1 - e^{\frac{S}{S_0}} \right) \left(1 + e^{\frac{S}{S_1}} \right), \quad (8)$$

де S_0 та S_1 – це коефіцієнти, що визначають форму « f - S діаграми».

Рівняння (8) не має аналітичного рішення, але коефіцієнти S_0 та S_1 можна визначити за емпіричними рівняннями виду:

$$S_0 = -0,4 \cdot S_k;$$

$$S_1 = \frac{f_b - f_m}{1,1 \cdot f_m}.$$

У роботі [9] для опису « f - S діаграми», в режимі гальмування автомобільного колеса, пропонується використовувати систему рівнянь (9), що побудовані на основі парабол:

$$f_x = \begin{cases} a_1 \cdot S^2 + b_1 \cdot S + f_0, & S \in [0, S_k]; \\ a_2 \cdot S^2 + b_2 \cdot S + c_1, & S \in [S_k, 1]. \end{cases} \quad (9)$$

Коефіцієнти a_1, a_2, b_1, b_2 та c_1 нескладно визначити з наступних рівнянь:

$$a_1 = \frac{S_k \cdot d_0 - f_m + f_0}{S_k^2};$$

$$b_1 = \frac{2 \cdot (f_m - f_0) - d_0 \cdot S_k}{S_k};$$

$$c_1 = \frac{S_k^2 (f_b + d_1) - S_k (2 \cdot f_m + d_1) + f_m}{S_k^2 - 2 \cdot S_k + 1};$$

$$a_2 = \frac{S_k \cdot d_1 - f_m + c_1}{S_k^2};$$

$$b_2 = \frac{2 \cdot (f_m - c_1) - d_1 \cdot S_k}{S_k}.$$

Таким чином, задаючись коефіцієнтом тертя при повністю заблокованих колесах (f_b), максимальним реалізованим зчепленням (f_m), що реалізується між шиною та поверхнею дорожнього покриття, критичним ковзанням шини (S_k) і величинами прогину парабол ($d_0 \in [-0,5,1]$, $d_1 \in [-0,5,0]$), можна визначити характер зміни реалізованого зчеплення f_x в залежності від величини проковзування S .

З роботи [10] також відома залежність (10) яка за структурою схожа на залежність парабол (9), яка з достатньою точністю також дозволяє розрахувати значення реалізованого зчеплення в залежності від ковзання шини колеса відносно поверхні дорожнього покриття для режиму гальмування колеса:

$$f_x = \begin{cases} \frac{2 \cdot (f_m - f_0) \cdot S_k \cdot S}{S_k^2 + S^2} + f_0, & S \in [0, S_k]; \\ f_b + \frac{f_m - f_b}{(1 - S_k)^2} \cdot (1 - S)^2, & S \in [S_k, 1]. \end{cases} \quad (10)$$

На відміну від рівняння (9), структура рівняння (10) є простішою і не потребує визначення додаткових коефіцієнтів, які визначають форму парабол на відповідних ділянках « f - S діаграми».

Також відома модель визначення реалізованого зчеплення між шиною та поверхнею дорожнього покриття в режимі гальмування колеса, яка базується на жорсткісних властивостях шини [11]. Така модель може бути представлена у вигляді нелінійного рівняння:

$$f_x = \frac{C_x \cdot S}{R_z \cdot (1-S)} \cdot f(s), \quad (11)$$

де C_x – крутильна жорсткість пневматичної шини, Н·м/рад.

Функція $f(s)$ пропонується авторами наукової роботи [11] у вигляді системи наступних рівнянь:

$$f(s) = \begin{cases} s \cdot (2-s), & s \in [0,1]; \\ 1, & s \in [1,\infty]. \end{cases}$$

Значення параметру s не складно визначити з рівняння:

$$s = \frac{f_m \cdot R_z \cdot (1-\varepsilon \cdot V_x \cdot \sqrt{S^2 + \tan^2(\alpha)}) \cdot (1-S)}{2 \cdot \sqrt{C_x^2 \cdot S^2 + C_a^2 \cdot \tan^2(\alpha)}},$$

де ε – коефіцієнт, який враховує зниження значення f_m в залежності від швидкості руху автомобіля V_x (м/с); C_a – кутова жорсткість пневматичної шини, Н·м/рад; α – кут відведення шини, рад.

В роботах [12-14] пропонується метод, який також базується на жорсткісних властивостях шини. Цей метод може бути представлений у вигляді рівняння (12), яке на відміну від рівняння (11) має меншу кількість розрахункових параметрів, оскільки воно приведене до кута закручування шини в повздовжньому напрямку при гальмуванні колеса:

$$f_x = \frac{C_x \cdot \xi_x}{R_z \cdot r_d}, \quad (12)$$

де ξ_x – кут закручування шини, рад; r_d – динамічний радіус колеса, м.

Для шин, які мають не одинарне ошинування, рівняння (12) записується у вигляді рівняння (13) [12]:

$$f_x = \frac{\alpha_{ш} \cdot C_{хсп} \cdot \xi_x}{R_z \cdot r_d}, \quad (13)$$

де $\alpha_{ш} \leq 1$ – нелінійність впливу реалізації зчеплення між шинами здвоєних або строєних автомобільних коліс [12]; $C_{хсп}$ – середня крутильна жорсткість пневматичних шини здвоєних або строєних коліс транспортного засобу

[12], Н·м/рад.

В рівняннях (12) та (13), кут закручування шини відносно поверхні дорожнього покриття є функцією від проковзування S .

Автор наукового дослідження [12] пропонує визначати кут закручування шини за рівнянням:

$$\xi_x = \frac{a_0^\xi \cdot S}{S_k^2 + b_0^\xi \cdot S + S^2} + \xi_0,$$

де a_0^ξ , b_0^ξ – коефіцієнти, що залежать від значень кутів закручування ξ_m , ξ_b , ξ_0 та S_k .

Коефіцієнти a_0^ξ , b_0^ξ автори робіт [13, 14] пропонують визначити за рівняннями:

$$a_0^\xi = \frac{(\xi_m - \xi_0) \cdot (\xi_b - \xi_0) \cdot (1 - S_k)^2}{\xi_m - \xi_b};$$

$$b_0^\xi = \frac{(\xi_b - \xi_0) \cdot (1 + S_k^2) - 2 \cdot (\xi_m - \xi_0) \cdot S_k}{\xi_m - \xi_b}.$$

Слід зазначити, що серед математичних рівнянь (1) – (13), які описують реалізоване зчеплення шини з поверхнею дорожнього покриття, не всі рівняння дозволяють описати повну « f - S діаграму» [15-26] в залежності від величини ковзання шини (S) відносно поверхні дорожнього покриття в діапазоні значень ковзання $S \in [-1,1]$.

Аналіз показує, що з наведених вище рівнянь, тільки рівняння (1) дозволяє описати повну « f - S діаграму» для будь яких значень ковзання $S \in [-1,1]$.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є визначення універсального методу розрахунку реалізованого зчеплення шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- Аналіз методів розрахунку реалізованого зчеплення;
- Змоделювати характер перебігу зміни реалізованого зчеплення від різних факторів при однакових початкових умовах;
- Співставити результати моделювання за різними методами розрахунку реалі-

зованого зчеплення шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття;

Повні методи розрахунку реалізованого зчеплення

Детальний аналіз рівнянь (3), (4), (12) та (13) дозволив встановити, що ці формули можуть бути використані для моделювання реалізованого зчеплення в діапазоні $S \in [-1, 1]$, якщо змінити характер визначення коефіцієнтів a_0 , b_0 та c_0 , які визначають форму « f - S діаграми».

Так наприклад, якщо рівняння (3) перетворити на рівняння виду:

$$f_x = \frac{a_0 \cdot S}{b_0 + c_0 \cdot S + S^2} + f_0, \quad (14)$$

коефіцієнти a_0 , b_0 та c_0 визначатимуться з відповідних систем рівнянь:

$$a_0 = \begin{cases} \frac{(f_{m1} + f_0) \cdot (f_{b1} + f_0) \cdot (1 - S_{k1})^2}{f_{m1} - f_{b1}}, & S \in [-1, 0]; \\ \frac{(f_{m2} - f_0) \cdot (f_{b2} - f_0) \cdot (1 - S_{k2})^2}{f_{m2} - f_{b2}}, & S \in [0, 1]; \end{cases}$$

$$b_0 = \begin{cases} S_{k1}^2, & S \in [-1, 0]; \\ S_{k2}^2, & S \in [0, 1]; \end{cases}$$

$$c_0 = \begin{cases} \frac{2 \cdot (f_{m1} + f_0) \cdot S_{k1} - (f_{b1} + f_0) \cdot (1 + S_{k1}^2)}{f_{m1} - f_{b1}}, & S \in [-1, 0]; \\ \frac{(f_{b2} - f_0) \cdot (1 + S_{k2}^2) - 2 \cdot (f_{m2} - f_0) \cdot S_{k2}}{f_{m2} - f_{b2}}, & S \in [0, 1], \end{cases}$$

в діапазоні $S \in [-1, 1]$.

Іншим підходом для опису реалізованого зчеплення шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття, для діапазону $S \in [-1, 1]$, можуть бути використані нормалізовані ступеневі функції, які можна представити у вигляді системи рівнянь (15).

$$f_x = \begin{cases} \text{sign}(S) \cdot f_{mi} - \text{sign}(S) \cdot (f_{mi} - f_{bi}) \cdot \left(\frac{(\text{sign}(S) \cdot S - S_{ki})}{1 - S_{ki}} \right)^{D_1}, & \text{для } i=1, 2 \text{ при } S \in [-1, -S_{k1}] \cup [S_{k2}, 1]; \\ \text{sign}(S) \cdot f_{mi} - (f_0 + \text{sign}(S) \cdot f_{mi}) \cdot \left(1 - \left(\frac{|S|}{S_{ki}} \right)^{D_2} \right)^{D_3}, & \text{для } i=1, 2 \text{ при } S \in [-S_{k1}, 0] \cup [0, S_{k2}]; \end{cases} \quad (15)$$

Нормалізовані функції мають ступені D_1 , D_2 та D_3 , які визначають гладкість так званої « f - S діаграми». Якщо значення D_1 , D_2 та D_3 дорівнюватимуть 1, то « f - S діаграма» буде кусочно лінійною. Якщо D_1 , D_2 та D_3 дорівнюватимуть 2, то « f - S діаграма» буде складатися з плавних дуг (парабол). У разі якщо D_1 , D_2 та D_3 будуть більше 2, то « f - S діаграма» матиме більш виражені пологі вершини.

Досвід моделювання реалізованого зчеплення за рівнянням (15) показує, що параметр D_1 , краще приймати рівним 1.5, параметр D_2 рівним 1, а параметр $D_3 \geq 3$, оскільки він відповідає за характер з'єднання двох функцій системи рівнянь (15) поблизу значення f_m .

Для моделювання реалізованого зчеплення між шиною та поверхнею дорожнього покриття в діапазоні проковзування $S \in [-1, 1]$ може бути використана також одиничне рівняння (16), яке, як і рівняння (15) носить нормалізований характер, але базується на експоненціальному законі.

В рівнянні (16), як і в рівнянні (15) можна використовувати різні значення ключових точок « f - S діаграми» f_{mi} , f_{bi} та S_{ki} для режиму гальмування (індекс $i = 1$) та режиму розгону (індекс $i = 2$) автомобільного колеса.

Коефіцієнти k_1 , k_2 , k_3 та k_4 , які є складовою частиною рівняння (16) визначають форму так званої « f - S діаграми». Під час моделювання доцільно використовувати наступні числові значення цих коефіцієнтів: $k_1 \geq 5$, $k_2 = 1$, $k_4 \geq 1$ (ціле), а k_3 визначається з залежності:

$$k_3 = 1 - \frac{f_{bi}}{f_0 + (f_{mi} - f_0) \cdot (1 - \exp(-k_1/S_{ki}^{k_2}))}.$$

Вочевидь, що рівняння (16) може бути спрощено для використання на практиці до вигляду рівняння (17), оскільки вираз $1 - \exp(-k_1) \approx 1$, як і вираз $1 - \exp(-k_1/(S_{ki})^{k_2}) \approx 1$.

$$f_x = \left(\text{sign}(S) \cdot f_{mi} + f_0 \right) \cdot \frac{\left(1 - \exp\left(-k_1 \left(|S|/S_{ki} \right)^{k_2} \right) \right)}{1 - \exp(-k_1)} - f_0 \left(1 - k_3 \left(\frac{|S| - S_{ki}}{1 - S_{ki}} \right)^{k_4} \right), \quad S \in [-1, 0] \cup [0, 1]; \quad (16)$$

$$f_x = \left(\text{sign}(S) \cdot f_{mi} + f_0 \right) \cdot \left(1 - \exp\left(-k_1 \cdot \frac{|S|}{S_{ki}} \right) \right) - f_0 \left(1 - \frac{(f_{mi} - f_{bi}) \cdot (|S| - S_{ki})}{f_{mi} \cdot (1 - S_{ki})} \right), \quad S \in [-1, 0] \cup [0, 1] \quad (17)$$

Хотілось би зазначити, що в даній роботі ми не розглядаємо процес моделювання колеса, яке буксує, бо цей режим передбачає суттєву зміну значення f_{b2} при постійному значенні $S = 1$. Оскільки такий процес є не тривіальним, розглянемо його в наступних публікаціях за цією тематикою.

Підводячи підсумки можна сказати, що для моделювання реалізованого зчеплення існує багато рівнянь, але не всі рівняння, дозволяють описати реалізоване зчеплення шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття в гальмовому та тяговому режимі одночасно. Деякі методи можна використовувати тільки в одному з двох режимів руху транспортного засобу.

Аналізуючи науково-технічну літературу з тематики моделювання реалізованого зчеплення встановлено, що ключові точки $[0, -f_0]$, $[\mp S_{ki}, \mp f_{mi}]$, $[\mp 1, \mp f_{bi}]$ так званої « $f - S$ діаграми» не є сталими величинами і постійно змінюються в залежності від різних факторів: швидкості руху автомобіля (V_x), температури шини ($T_{ш}$), тиску в плямі контакту (p_k), тиску в пневматичній шині ($p_{ш}$), стану протектору шини, наявності шару води на поверхні дорожнього покриття, тощо. Вплив деяких з наведених параметрів на значення f_0 , f_m та f_b розглянемо в одній з наступних публікацій, а в цій роботі проведемо імітаційне моделювання при фіксованих значеннях f_0 , f_m , f_b та S_k .

Результати моделювання реалізованого зчеплення f_x при фіксованих значеннях ключових точок « $f - S$ діаграми»

Маючи на меті отримати графічне уявлення про характер зміни реалізованого зчеплення шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття в залежності від проковзування S прийемо наступні фіксовані значення $f_0 = 0,012$, $f_{m1} = 0,9$, $f_{m2} = 0,8$, $f_{b1} = 0,6$, $f_{b2} = 0,5$, $S_{k1} = 0,15$ та $S_{k2} = 0,2$, які є типовими для більшості одинарних шин легкових автомобілів, що експлуатуються по дорогах загального користування.

З метою порівняння результатів моделювання за різними рівняннями розділимо їх на дві групи:

- рівняння, що моделюють реалізоване зчеплення шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття в режимі гальмування колеса;
- рівняння, що моделюють реалізоване зчеплення шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього в двох режимах (в режимі гальмування колеса та режимі його розгону).

До першої групи рівнянь, підходять рівняння (2) – (13), а для другої – рівняння (1), (14) – (17). Рівняння (4), (12) та (13), що можуть бути перетворені на рівняння з другої групи в даній роботі, перетворювати не будемо і виконаємо розрахунки за цими рівняннями тільки для гальмового режиму кочення автомобільного колеса. Результати розрахунків представимо в графічному вигляді (див. рис. 1 – 3).

При розрахунках за рівняннями (2) – (11) слід значення f_0 , f_{m1} , f_{b1} , S_{k1} мають позитивний знак, але після розрахунків, з метою приведення до єдиних координат усіх отриманих графіків, зобразимо реалізоване зчеплення f_x для гальмового режиму на рисунку 1 та рисунку 2 у від'ємних координатах, помноживши отримані значення S та f_x на мінус один.

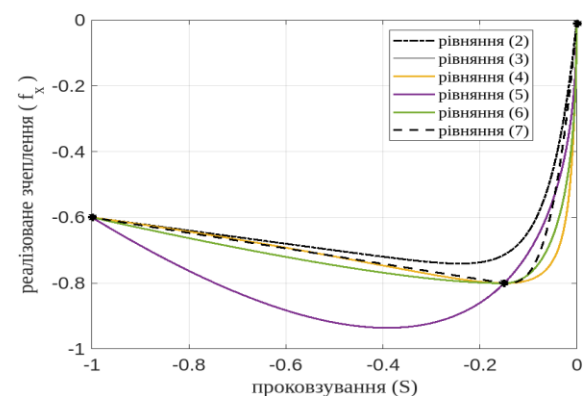


Рис. 1. Розрахунок реалізованого зчеплення за рівняннями (2) – (7) при позитивних значеннях f_0 , f_{m1} , f_{b1} , S_{k1} зображених у від'ємних координатах S та f_x

На рисунку 1 розрахунки за рівнянням (3) та рівнянням (4) повністю збіглися один з одним, оскільки ці рівняння мають спільну математичну основу та відрізняються між собою тільки формою їх представлення та формою представлення їх коефіцієнтів.

З рисунку 1 можна побачити, що найбільш доцільними для використання, під час моделювання процесу кочення автомобільного колеса в гальмовому режимі, є рівняння (3), (4), (6) та (7). Навпроти, рівняння (2) та (5) мають суттєві похибки в розрахунках на окремих ділянках проковзування S , тому їх використання при моделюванні може призвести до отримання хибних висновків та результатів дослідження.

З рисунку 2 можна також побачити, що рівняння (9), (10), (12) та (13) теж дуже добро описують ключові точки так званої « f - S діаграми». Слід зазначити, що розрахунки за рівняннями (12) та (13) виявилися однаковими, оскільки це пов'язано з умовами моделювання (значення $\alpha_{ш} = 1$, а середня крутильна жорсткість ($C_{хер}$) була прийнята рівною $C_x = 128,0$ кН·м/рад при $R_z = 25,5$ кН та $r_d = 0,5$ м.

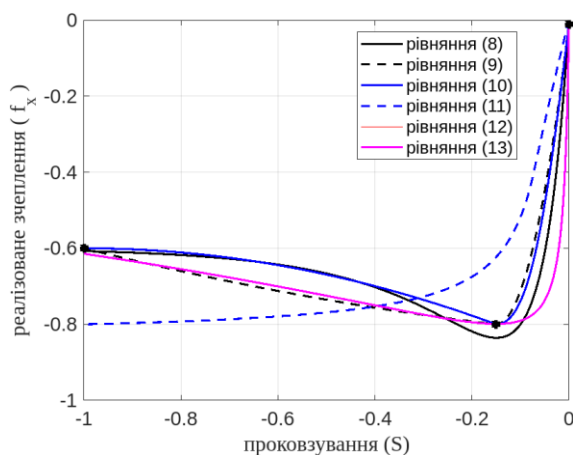


Рис. 2. Розрахунок реалізованого зчеплення за рівняннями (8) – (13) при позитивних значеннях f_0 , f_{m1} , f_{b1} , S_{k1} зображених у від'ємних координатах S та f_x

В рівнянні (12), як і в рівнянні (13) значення кутів закручування шини ξ_m , ξ_b , ξ_0 були визначені за емпіричними рівняннями:

$$\xi_m \approx 0.26 \cdot f_b \cdot r_d;$$

$$\xi_b \approx 0.2 \cdot f_b \cdot r_d;$$

$$\xi_0 \approx 0.2 \cdot f_0 \cdot r_d.$$

Аналіз результатів моделювання за рівняння (8) показав, що вони близькі до ключових точок « f - S діаграми», тому це рівняння можна вважати умовно-придатним для моделювання характеру реалізації зчеплення між шиною та поверхнею дорожнього покриття в режимі гальмування колеса.

Рівняння (11), як можна побачити з рисунку 2 має велику похибку в усіх ключових точках « f - S діаграми», тому його використання є не доцільним, оскільки може призвести до таких самих наслідків, як і рівняння (2) та (5), результат розрахунку за якими зображено на рисунку 1.

Отже підводячи підсумки, щодо використання рівнянь (2) – (13) для моделювання реалізованого зчеплення шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття в режимі гальмування колеса, можна констатувати, що не всі з цих рівнянь мають достатню точність розрахунків. Деякі з наведених рівнянь, а саме, рівняння (2), (5) та (11) можуть суттєво вплинути на висновки та результати моделювання, наприклад систем автоматичного регулювання гальмового зусилля, таких, як: антиблокувальна система, система курсової стійкості, система розподілу гальмового зусилля.

Виконаємо моделювання за рівняннями, що належать до другої групи. Для математичного рівняння (1) приймемо наступні параметри: $D_0 = f_{mi}$, $C = 1,9$, $S_h = 0$, $S_v = f_0$, а величини B_s та E визначимо з емпіричних рівнянь:

$$B_{si} \approx 12.5 - 25 \cdot S_{ki};$$

$$E_i \approx \sqrt[3]{f_{mi} \left(\frac{f_{bi}}{f_{mi}} \right)^{f_{bi}}}.$$

Результати моделювання за математичним рівнянням (1), для прийнятих вище параметрів, представлені в графічному вигляді на рисунку 3.

Моделювання реалізованого зчеплення за рівняннями (14) та (15) також показало добру збіжність результатів моделювання із заданими ключовими точками « f - S діаграми»: $[0, -f_0]$, $[\mp S_{ki}, \mp f_{mi}]$, $[\mp 1, \mp f_{bi}]$ (позначено зірочками на рисунку 3).

Слід зазначити, що оскільки для визначення параметрів C , B_s , E були використані значення отримані емпіричним шляхом точ-

ність розрахунків поблизу значень f_{bi} має похибку, але вона є незначною і нею можна знехтувати.

Аналізуючи результати моделювання реалізованого зчеплення за рівняннями (16) та (17) також можна відзначити, що вони дають достатньо високу точність співпадиння розрахованих значень зчеплення із ключовими точками « f - S діаграми». Порівнюючи між собою результати моделювання за повним рівнянням (16) та його спрощеним еквівалентним виглядом (17) можна зробити висновок

про те, що спрощене рівняння (17) не уступає повному рівнянню (16) в точності визначення реалізованого зчеплення і може бути використано при моделюванні взаємодії шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття, як в тяговому так і гальмовому режимі його кочення.

При моделюванні за рівнянням (16) та рівнянням (17) були використані наступні значення коефіцієнтів: $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $k_4 = 2$.

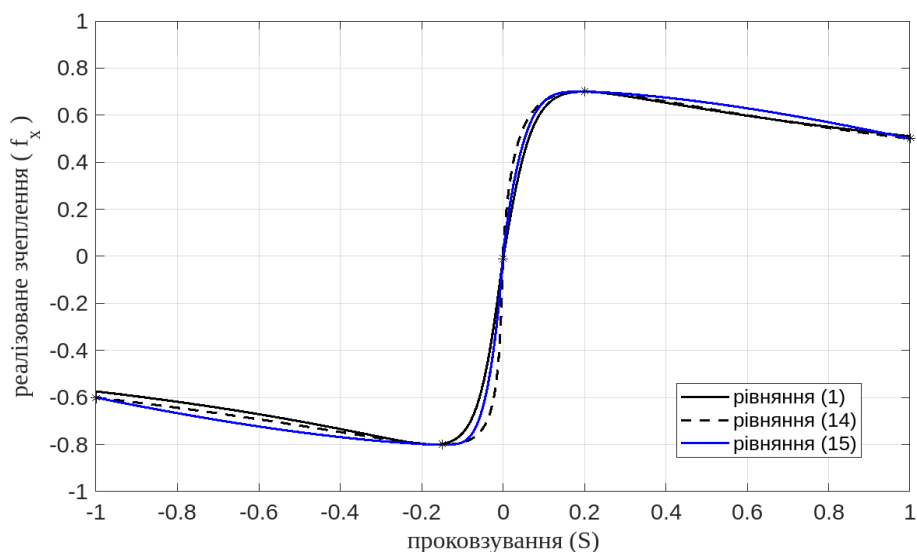


Рис. 3. Розрахунок реалізованого зчеплення за рівняннями (1), (14) та (15) коли $S \in [-1,1]$

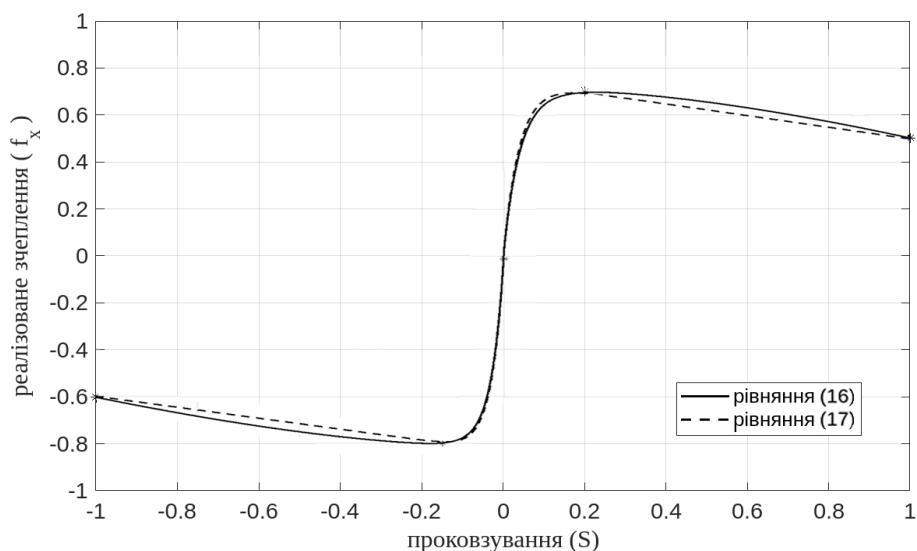


Рис. 4. Розрахунок реалізованого зчеплення за рівняннями (16) та (17) коли $S \in [-1,1]$

Висновки

Дослідження показують, що для моделювання реалізованого зчеплення шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття існує декілька універсальних рівнянь,

що дозволяють змоделювати повну « f - S діаграму» в усіх режимах кочення автомобільного колеса.

Найбільш універсальним рівнянням для моделювання повної « f - S діаграми» можна

вважати рівняння (17) або рівняння (1), якщо точністю блокування колеса, або точністю повного його буксування можна знехтувати.

Результати розрахунків за рівняннями (2), (5) та (11) мають значні похибки на окремих ділянках кривої « $f-S$ », що обмежує їх практичне використання, особливо для моделювання роботи автоматизованих систем регулювання гальмового або тягового зусилля на колесах транспортного засобу.

Рівняння (3), (4), (6) – (10), (12), (13) добре підходять для моделювання характеру взаємодії шини автомобільного колеса з поверхнею дорожнього покриття в гальмовому режимі кочення колеса, але не підходять для моделювання повної « $f-S$ діаграми» в діапазоні ковзання від мінус 1 до плюс 1, особливо поблизу значення 0, крім випадків, коли крива реалізованого зчеплення проходить через координати [0,0].

Більшість методів визначення реалізованого зчеплення потребує використання коефіцієнтів, що постійно змінюються (наприклад, таких як: B_s , E , S_k , f_m , f_b , тощо), які повинні підбиратися до конкретних умов та параметрів експлуатації шин. Похибка при їх визначенні може призводити до суттєвих помилок при моделюванні динаміки розгону або гальмування транспортного засобу.

Методи розрахунку реалізованого зчеплення (рівняння (11), (12), (13)), що засновані на жорсткісних властивостях шини, мають перспективи, але потребують удосконалення в частині правильності визначення кутів закручування та параметрів пружності пневматичної шини..

Рівняння (15), (16), (17) показали високу відповідність ключовим точкам « $f-S$ діаграми» при використанні типових значень коефіцієнтів S_k , f_m , f_b . Особливо слід зазначити, що рівняння (17) є зручним для практичного використання завдяки своїй простоті без втрати точності моделювання.

Результати моделювання підтверджують доцільність групування рівнянь за режимами кочення. Проведене групування рівнянь на ті, що підходять лише для гальмового режиму, і ті, що універсальні, дозволило відокремити найбільш ефективні математичні моделі та полегшує вибір рівняння для конкретного завдання з розрахунку реалізованого зчеплення між шиною автомобільного колеса та поверхнею дорожнього покриття, яке ставиться перед науковцем або дослідником.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Feng, S., Zhao, Y., Deng, H., Wang, Q., & Chen, T. (2021). Parameter identification of Magic Formula tire model based on Fibonacci tree optimization algorithm. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 26(5), 647–657. <https://doi.org/10.1007/s12204-021-2354-9>
2. Burckhardt, M. (1979). Erfahrungen bei der Konzeption und Entwicklung des Mercedes-Benz Bosch-Anti-Blockier-Systems (ABS). *Automobiltechnische Zeitschrift*, 81(5), 201–208.
3. Denny, M. (2005). The dynamics of antilock brake systems. *European Journal of Physics*, 26(6), 1007–1016. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/26/6/008> *Grafiati*
4. Kiencke, U., & Daiss, A. (1994). Estimation of tyre friction for enhanced ABS systems. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC '94)* (pp. 515–520).
5. Canudas-de-Wit, C., Tsiotras, P., Velenis, E., Basset, M., & Gissinger, G. (2003). Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction. *Vehicle System Dynamics*, 39(3), 189–226. <https://doi.org/10.1076/vesd.39.3.189.14152> *Taylor & Francis Online*
6. Michelin Technology Society. (1999). *The tyre. Grip*. Michelin.
7. Michelin Technology Society. (2001). *The tyre. Grip*. Michelin.
8. Han, K., Hwang, Y., Lee, E., & Choi, S. (2016). Robust estimation of maximum tire-road friction coefficient considering road surface irregularity. *International Journal of Automotive Technology*, 17(3), 415–425. <https://doi.org/10.1007/s12239-016-0043-8>
9. Леонтьєв, Д. М. (2011). *Системний підхід до створення автоматизованого гальмівного керування транспортних засобів категорій M_3 та N_3* . Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Leontiev, D. M. (2011). *Systemnyi pidkhid do stvorennia avtomatyzovanoho halmivnogo keruvannia transportnykh zasobiv katehorii M_3 ta N_3* [A systematic approach to the creation of an automated brake control for vehicles of categories M_3 and N_3]. Kharkiv National Automobile and Highway University [in Ukrainian]
10. Rill, G. (2009). *Vehicle Dynamics. Lecture notes*. Hochschule Regensburg University of Applied Sciences.
11. Dugoff, H., Fancher, P. S., and Segel, L. (1969). *Tire performance Characteristics Affecting Vehicle Response to Steering and Braking Control*

- Inputs, Final Report for Contract No, CST-460, Office of Vehicle Systems Research, National Bureau of Standards, Washington.
12. Фролов, А. А. (2023). Удосконалення методу визначення реалізованого зчеплення шин здвоєних коліс транспортного засобу в режимі гальмування. Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Frolov, A. A. (2023). Udoskonalennia metodu vyznachennia realizovanoho zchepлення shyn zdvoienykh kolis transportnoho zasobu v rezhymy halmuvannia. [Improvement of the method of determining the adhesion utilized of tires at dual wheels vehicle with the surface of the road pavement] Kharkiv National Automobile and Highway University [in Ukrainian]
13. Klimentenko, V., Kapski, D., Leontiev, D., Kuripka, O., & Frolov, A. (2021). Determination of tangential properties of a single pneumatic tire in the braking mode of a vehicle. *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, 19, 28–34. <https://doi.org/10.30977/veit.2021.19.0.28> [Veit Automotive and Electronics](#)
14. Leontiev, D., & Don, E. (2016). Specifics of automobile dual wheels interaction with the supporting surface. *Automobile Transport*, 39, 74–79. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2016.39.0.74> [ResearchGate](#)
15. Leontiev, D. N., Mikhalevich, N. G., & Frolov, A. A. (2018). Influence of vertical load on braking force and tyre adhesion coefficient of vehicle wheel. *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*, 18, 383–392. <https://doi.org/10.32353/khrife.2018.42> [ResearchGate](#)
16. Leontiev, D., Klymenko, V., Aloksa, M., & Sylchenko, M. (2022). Regarding the issue of determining the deceleration of a two-axle vehicle with a damaged brake system. *Automobile Transport*, 50, 21–28. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2022.50.0.03> [Academia](#)
17. Maknickas, A., Ardatov, O., Bogdevičius, M., & Kačianauskas, R. (2022). Modelling the interaction between a laterally deflected car tyre and a road surface. *Applied Sciences*, 12(22), 11332. <https://doi.org/10.3390/app122211332> [ResearchGate+1](#)
18. Fathi, H., Khosravi, M., El-Sayegh, Z., & El-Gindy, M. (2023). An advancement in truck-tire–road interaction using the finite element analysis. *Mathematics*, 11(11), 2462. <https://doi.org/10.3390/math11112462> [IDEAS/RePEc+1](#)
19. Millan, P., & Ambrósio, J. (2024). Tire–road contact modelling for multibody simulations with regularised road and enhanced UA tire models. *Multibody System Dynamics*, 63(3), 273–302. <https://doi.org/10.1007/s11044-024-09987-z> [ResearchGate+1](#)
20. Mantaras, D. A., Luque, P., & Alonso, M. (2022). Phase plane analysis applied to non-explicit multibody vehicle models. *Multibody System Dynamics*, 56(2), 173–188. <https://doi.org/10.1007/s11044-022-09846-9> [ResearchGate+1](#)
21. Guastadisegni, G., De Pinto, S., Cancelli, D., Labianca, S., Gonzalez, A., Gruber, P., & Sornioti, A. (2024). Ride analysis tools for passenger cars: Objective and subjective evaluation techniques and correlation processes – A review. *Vehicle System Dynamics*, 62(7), 1876–1902. <https://doi.org/10.1080/00423114.2023.2259024> [Taylor & Francis Online+1](#)
22. Spiryagin, M., Edelmann, J., Klinger, F., & Cole, C. (2023). Vehicle system dynamics in digital twin studies in rail and road domains. *Vehicle System Dynamics*, 61(7), 1737–1786. <https://doi.org/10.1080/00423114.2023.2188228> [Taylor & Francis Online+1](#)
23. He, L., Pan, Y., He, Y., Li, Z., Królczyk, G., & Du, H. (2022). Control strategy for vibration suppression of a vehicle multibody system on a bumpy road. *Mechanism and Machine Theory*, 174, 104891. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104891> [ScienceDirect+1](#)
24. Mantaras, D. A., Luque, P., & Alonso, M. (2022). Phase plane analysis applied to non-explicit multibody vehicle models. *Multibody System Dynamics*, 56(2), 173–188. <https://doi.org/10.1007/s11044-022-09846-9>
25. Petrov, L. M., Kishianus, I. V., Petryk, Y. M., Nikishyn, V. A., & Sheluhin, S. V. (2023). Structural improvement of the wheel drive of a military vehicle. *Systems and Technologies*, 65(1), 160–167. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.1-65.20>
26. Петров, Л. М., Кішянус, І. В., Петрик, Ю. М., & Фролов, О. С. (2022). Виявлення неврахованого впливу стиснутої шини на змінення значення коефіцієнта зчеплення шини колісного рушія з дорогою та прискорення колісного рушія. *Збірник наукових праць Військової академії*, 2(18), 111–118. Vyivlennia nevrakhovanoho vplyvu stysnotoi shyny na zminenennia znachennia koefitsiienta zchepлення shyny kolisnogo rushiia z dorohoju ta pryskorennia kolisnogo rushiia [Detection of the unaccounted influence of a compressed tire on changes in the adhesion coefficient of a wheel-drive tire with the road and the acceleration of the wheel drive] *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoi akademii*, 2(18), 111–118. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2022.18.111-118> [in Ukrainian]

Леонт'єв Дмитро¹, д.т.н., професор кафедри автомобілів, leontiev@khadi.kharkov.ua, тел.: +38 097 943-78-85, ORCID: 0000-0003-4255-6317

Сметанін Герман¹, аспірант кафедри автомобілів ім. А. Б. Гредескула, smetanin.gv@gmail.com, тел.: +38 063 950-35-35, ORCID: 0000-0002-2275-6891

Володін Валерій^{1,2}, здобувач кафедри автомобілів, val.volod1@gmail.com, тел.: +38 095 180-17-08, ORCID: 0009-0004-0107-5618

Малий Віктор¹, здобувач кафедри автомобілів ім. А.Б. Гредескула, victormaly@outlook.com, тел.: +38 093 452-95-50, ORCID: 0009-0002-7800-9163

Рябушенко Олександр¹, к.т.н., доцент кафедри організації та безпеки дорожнього руху, riabushenko79@ukr.net, тел.: +38 066 858-36-51 ORCID: 0000-0002-8415-5733

Товт Богдан³, к.т.н., доцент кафедри вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін, btovtua@gmail.com, тел.: +38 068 680-79-31, ORCID: 0009-0000-7670-8898

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

²Комунальний заклад «Харківський ліцей № 154 Харківської міської ради» 61204, Україна, м. Харків, пр. Людвіга Свободи 42Б.

³Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49009.

Methods for Calculating Utilized Adhesion Between a Vehicle Tire and the Road Surface

Abstract. Problem. Ensuring road traffic safety is impossible without accurate prediction of a vehicle's behavior under various operating conditions. Therefore, determining the actual adhesion between a tire and the road surface is a relevant and pressing issue for researchers and engineers. Modeling tire-road traction is particularly crucial for improving active safety systems such as ABS, ESP, and brake force distribution systems. **Goal.** The aim of this work is to analyze existing mathematical models of tire-road traction and to determine a method that enables high-accuracy modeling of traction across all rolling regimes of the vehicle wheel. **Methodology.** The study includes a review of relevant literature and mathematical models of tire-road adhesion (Pacejka, Burckhardt, Denny, Kiencke equations, stiffness-based models, etc.). Numerical modeling was performed using fixed values for key points of the

“*f-S diagram*,” and the accuracy of the results was compared across different models. Results. It was found that not all existing mathematical models of tire-road interaction can adequately simulate traction behavior over the full range of tire slip. Some models demonstrate high accuracy within specific wheel rolling modes, while others exhibit significant errors and limited applicability. **Originality.** This study systematizes the known methods for calculating actual tire-road adhesion, defines criteria for evaluating their effectiveness, and presents comprehensive simulations based on typical key tire parameters. **Practical value.** The results can be used in the design of pneumatic tires, optimization of active vehicle safety systems, and development of high-precision simulators for vehicle motion on various road surfaces.

Key words: utilized adhesion; adhesion coefficient; tire; vehicle wheel; road surface.

Leontiev Dmytro¹, professor, Doct. of Science, Automobiles named after A. B. Gredeskul, leontiev@khadi.kharkov.ua, +38 097 943-78-85, ORCID: 0000-0003-4255-6317

Smetanin German¹, PhD student Department of Automobiles named after A. B. Gredeskul, smetanin.gv@gmail.com, +38 063 950-35-35, ORCID: 0000-0002-2275-6891

Volodin Valerii^{1,2}, student, Department of Automobiles named after A. B. Gredeskul, +38 095 180-17-08, val.volod1@gmail.com, ORCID: 0009-0004-0107-5618

Malyi Viktor¹, PhD Student of the Department of Automobiles, +38 093 452-95-50, victormaly@outlook.com, ORCID: 0009-0002-7800-9163

Riabushenko Oleksandr¹, C.Sc. (Eng), Associate Professor of the Department of road traffic management and safety, +38 066 858-36-51 riabushenko79@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8415-5733

Tovt Bohdan³, C.Sc., Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Physics and General Engineering, +38 068 680-79-31, btovtua@gmail.com, ORCID: 0009-0000-7670-8898

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

²Municipal institution "Kharkiv Lyceum 154 of the Kharkiv City Council" 42B, Ludviga Svobody Ave., Kharkiv, 61204, Ukraine.

³Dnipro State Agrarian and Economic University, 25, Serhii Efremov str., Dnipro, 49009, Ukraine.

Робастна оптимізація транспортно-технологічних схем доставки вантажів в умовах невизначеності

Подригало М. А.¹, Коробко А. І.¹, Абрамов Д. В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Надійшла: 28.08.2025. Прийнято: 04.12.2025. Опубліковано: 08.12.2025. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. У статті досліджується проблема підвищення ефективності транспортно-технологічних схем доставки вантажів у міжнародному сполученні в умовах воєнних конфліктів. Розглядається методологія робастної оптимізації з використанням композитної цільової функції, що враховує логістичні витрати, вартість ризику та вартість депривації в умовах епістемічної невизначеності. Результати показують, що запропонований підхід у поєднанні з технологією цифрових двійників дозволяє гарантувати виконання дедлайнів та мінімізувати соціальні збитки навіть за найгірших сценаріїв розвитку подій.

Ключові слова: міжнародні перевезення, логістична схема, оптимізація, витрати, невизначеність, вантаж.

Вступ

Повномасштабне вторгнення російської федерації в Україну у лютому 2022 року спровокувало найбільшу гуманітарну та логістичну кризу в Європі з часів Другої світової війни. Традиційні ланцюги постачання, які функціонували за принципами «Just-in-Time» та мінімізації складських запасів, миттєво втратили свою актуальність та ефективність. Блокада морських портів Чорного моря, через які проходило до 90 % експортно-імпортних операцій, змусила переорієнтувати товарні потоки на західні сухопутні кордони з країнами ЄС.

Харків, як один із найбільших індустріальних та наукових центрів Східної Європи, опинився у безпосередній близькості до лінії фронту. Логістичне забезпечення міста та області набуло критичного значення не лише для підтримки економіки, але й для фізичного виживання населення. Специфіка доставки вантажів до Харкова полягає в необхідності подолання значних відстаней від західних кордонів в умовах постійної загрози ракетних обстрілів транспортної інфраструктури, руйнування мостів та нестабільності енергопостачання.

Аналіз поточної ситуації свідчить про те, що класичні методи управління транспортом не здатні адекватно реагувати на виклики воєнного часу. Основною проблемою є стохастична невизначеність, природа якої змінилася з ризикової (де відомі розподіли ймовірностей) на гносеологічну (де знання про майбутні події відсутні або фрагментарні). Звичайні моделі прогнозування попиту та часу доставки, засновані на статистичних вибірках, сформованих у періоди стабільної роботи транспортної мережі, стають нерелевантними, оскільки минулі закономірності не відображають поточних загроз.

Вибір раціональної транспортно-технологічної схеми (ТТС) у міжнародному сполученні – це багатофакторна оптимізаційна задача, що передбачає визначення оптимальної конфігурації транспортних засобів, маршрутів, технологій перевантаження та складських потужностей.

Однак в умовах воєнного стану просте застосування існуючих алгоритмів є недостатнім. Критичною проблемою стає невідповідність класичних цільових функцій, орієнтованих на мінімізацію фінансових витрат, реальним потребам гуманітарної логістики, де пріоритетом є мінімізація соціальних наслід-

ків затримок (вартість депривації) та збереження життя персоналу.

Статичність традиційних моделей робить їх безпорадними перед динамікою змін на лінії фронту. Виникає об'єктивна необхідність у розробці адаптивного математичного апарату, здатного інтегрувати методи робастної оптимізації для гарантування надійності ланцюга постачання в умовах невизначеності з технологіями цифрових двійників для оперативної корекції маршрутів у реальному часі.

Аналіз публікацій

Сучасна світова економіка функціонує в умовах, які характеризуються високим рівнем волатильності, невизначеності, складності та неоднозначності. Якщо на початку ХХІ століття основним критерієм вибору ТТС була мінімізація вартості при дотриманні нормативного терміну доставки (Just-in-Time), то події останніх років докорінно змінили пріоритети. Пандемія COVID-19, блокування Суецького каналу, а згодом – повномасштабна війна в Україні, продемонстрували вразливість глобальних ланцюгів постачання до зовнішніх кризових впливів [1].

Вибір ТТС на поточний момент – це не просто пошук найкоротшого шляху на графі транспортної мережі, а багатовимірна задача оптимізації, що повинна враховувати ймовірність закриття кордонів, коливання фрахтових ставок, доступність контейнерного обладнання та надійність перевізників. Як зазначено в роботі [2], систематичний аналіз обмежень детермінованих моделей вказує на їх неспроможність адекватно реагувати на несподівані події.

Для України питання вибору оптимальної ТТС набуло екзистенційного значення. Блокування чорноморських портів змусило експортерів та логістичних операторів повністю перебудовувати маршрути, орієнтуючись на західні сухопутні переходи та порти Дунаю. Це призвело до виникнення нових типів невизначеності – непередбачувані черги на кордонах, дефіцит рухомого складу на європейській колії, зміни в транзитних процедурах країн ЄС [3].

Вітчизняні науковці акцентують увагу на тому, що в умовах воєнних дій логістична система має трансформуватися з орієнтації на ефективність до орієнтації на виживання та стійкість [4]. Це вимагає впровадження нових інструментів підтримки прийняття рі-

шень, які б базувалися не на історичних даних (які часто втратили актуальність), а на моделюванні сценаріїв в реальному часі.

ТТС міжнародної доставки вантажів є складним комплексом, що об'єднує фізичні потоки (вантаж, транспортні засоби), інформаційні потоки (дані про стан вантажу, документи) та фінансові потоки (оплата фрахту, митні платежі). Згідно з дослідженнями [5], ефективність ТТС визначається не лише технічними параметрами транспортних засобів, але й узгодженістю взаємодії всіх учасників процесу перевезення – від вантажовідправника до кінцевого отримувача, включаючи експедиторів, термінальних операторів та митні органи.

Традиційно вибір ТТС включає наступні етапи:

- вибір виду транспорту. Автомобільний, залізничний, водний, авіаційний або їх комбінація (мультимодальні перевезення);
- маршрутизація. Визначення конкретної послідовності проходження пунктів транспортної мережі;
- вибір логістичних посередників. Перевізники, 3PL-оператори, митні брокери;
- вибір технології вантажообробки. Контейнеризація, пакування, використання спеціалізованого обладнання.

Однак, як зазначено в роботі [6], в сучасних умовах до цього переліку необхідно додати етап оцінки надійності та ризиків. Автори пропонують розглядати надійність транспортного сервісу як комплексну величину, що залежить від часу реакції системи на збурення та часу затримок.

Українські дослідники підкреслюють, що в умовах цифрової економіки окремим фактором невизначеності стає динамічність технологічних інновацій, що вимагає постійного моніторингу та адаптації логістичних систем [7]. Відсутність точної інформації про стан інфраструктури в умовах війни переводить задачу вибору ТТС з площини стохастичного програмування в площину робастної оптимізації, де рішення має бути прийнятним для найгіршого сценарію.

Протягом тривалого часу основою логістичного планування були детерміновані моделі, які базуються на припущенні, що всі параметри системи (попит, час, вартість) є відомими та сталими. Прикладом таких моделей є класична транспортна задача лінійного програмування або задача комівояжера у її базовій постановці.

В роботі [8] зазначено, що детерміновані моделі, які ігнорують стохастичну природу попиту, призводять до створення планів, які є оптимальними лише на папері. У реальності будь-яке відхилення від планових показників (наприклад, затримка судна на 2 дні) руйнує весь ланцюг постачання, оскільки в моделі не передбачено буферів надійності. Автор в роботі [9] підтверджує, що традиційні підходи демонструють найбільш значну деградацію продуктивності в умовах збурень.

Зокрема, дослідження [10] вказує, що хоча детерміновані моделі є обчислювально простішими, вони не здатні забезпечити необхідний рівень стійкості. Наприклад, при проектуванні мережі постачання кисневих концентраторів, ігнорування невизначеності попиту призводило до критичних дефіцитів у пікові періоди, що є неприпустимим для життєво важливих товарів.

Намагаючись подолати недоліки детермінізму, науковці використовують стохастичне програмування. Цей підхід розглядає параметри як випадкові величини з відомими функціями розподілу. Найпоширенішим методом є двохетапне стохастичне програмування, де на першому етапі приймаються стратегічні рішення (наприклад, вибір складів), а на другому – операційні рішення (маршрутизація) коригуються залежно від реалізації випадкової події [11].

В своїй роботі [12], дослідники використали стохастичне моделювання для оптимізації гуманітарної логістики, враховуючи невизначеність попиту та маршрутів евакуації. Запропоновані моделі дозволяють мінімізувати очікувані витрати та незадоволений попит. Проте, стохастичні моделі мають суттєві обмеження:

- залежність від якості даних. Для коректної роботи моделі необхідно мати точні статистичні дані для побудови розподілів ймовірностей. В умовах унікальних подій (війна) такі дані відсутні або нерепрезентативні;
- проблема експоненційної комбінаторної складності. Врахування великої кількості сценаріїв призводить до експоненціального зростання обчислювальної складності задачі, що робить її непридатною для оперативного прийняття рішень.

Враховуючи обмеження стохастичного програмування, сучасна наука схиляється до використання робастної оптимізації (Robust Optimization, RO). На відміну від стохастич-

них моделей, RO не вимагає точних розподілів ймовірностей. Замість цього вона оперує «множинами невизначеності» – інтервалами, в межах яких можуть варіюватися параметри. Мета RO – знайти рішення, яке буде допустимим та ефективним для будь-якої реалізації параметрів у межах цих множин, часто орієнтуючись на найгірший сценарій [13]. Дослідження показують, що робастні моделі забезпечують вищу надійність виконання контрактів. Порівняння традиційної та робастної оптимізації для ланцюга постачання швидкопсувної продукції показало, що робастний підхід дозволяє уникнути дефіциту компонентів, який був неминучим при використанні класичних методів.

Одним із ключових інструментів підвищення робастності та керованості логістичних систем у сучасних умовах є впровадження технології цифрових двійників. Цифровий двійник – це віртуальна репрезентація фізичного об'єкта або процесу, яка оновлюється в реальному часі за допомогою даних з датчиків, IoT-пристроїв та інформаційних систем. У контексті вибору ТТС, цифровий двійник ланцюга постачання дозволяє моделювати рух вантажів, стан інфраструктури та завантаженість терміналів, створюючи динамічну карту логістичної мережі [14].

Аналіз літератури свідчить про стрімке зростання інтересу до цифрових двійників. Ринок цифрових двійників у ланцюгах постачання прогнозовано зросте до 8,7 млрд доларів США до 2033 року [15]. Ключова відмінність цифрових двійників від традиційного імітаційного моделювання полягає у двосторонньому зв'язку. Цифровий двійник не лише отримує дані від фізичної системи, але й може надсилати керуючі впливи або рекомендації назад у систему.

Поєднання робастної оптимізації та цифрових двійників створює потужний інструмент для управління невизначеністю. Робастна оптимізація забезпечує стратегічну стійкість, розраховуючи параметри системи (рівні запасів, пропускну здатність) з урахуванням найгірших сценаріїв. Цифровий двійник забезпечує тактичну гнучкість, постійно оновлюючи параметри множини невизначеності на основі реальних даних.

В дослідженні [16] автори демонструють застосування гібридних алгоритмів – генетичний алгоритм, імітація відпалу та глибоке Q-навчання для оптимізації розподілу вантажопотоків у портових системах. Це особливо

актуально для українських дунайських портів, які зіткнулися з надмірним навантаженням. Використання таких алгоритмів дозволяє балансувати навантаження між різними видами транспорту в режимі реального часу, зменшуючи затори та екологічний вплив.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування ТТС доставки вантажів у міжнародному сполученні в умовах воєнних конфліктів шляхом розробки методології робастної оптимізації, яка, на відміну від класичних підходів, мінімізує сукупні соціальні витрати та враховує епістемічну невизначеність параметрів логістичної мережі.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити наступний комплекс задач:

- розробити математичну модель вибору раціональної ТТС, що базується на композитній цільовій функції, яка інтегрує три ключові компоненти – логістичні витрати (прямі фінансові витрати на транспортування та перевалку), вартість депривації (економічна оцінка гуманітарних наслідків затримки доставки критичних вантажів), вартість ризику (кількісна оцінка загрози втрати вантажу або життя персоналу на небезпечних ділянках маршруту);
- сформулювати систему робастних обмежень для часових вікон доставки, що дозволить гарантувати виконання дедлайнів навіть за умов реалізації найгірших сценаріїв затримок на маршруті;
- розробити механізм динамічної адаптації параметрів моделі (номінального часу руху, допустимих відхилень, доступності дуг графа) на основі даних, отриманих від цифрового двійника транспортної мережі в режимі реального часу.

Об'єктом дослідження є процеси доставки вантажів у міжнародних логістичних системах в умовах високого рівня невизначеності та ризиків.

Предметом дослідження є методи та моделі оптимізації транспортно-технологічних схем з урахуванням критеріїв соціальної ефективності та безпеки.

Методологічне обґрунтування робастної оптимізації

Традиційні ланцюги постачання, побудовані на принципах «Just-in-Time» та мінімізації

складських запасів, виявилися нежиттєздатними в умовах, коли час транзиту може зрости на порядок через блокування кордонів або руйнування мостової інфраструктури. Критичним викликом для моделювання є природа невизначеності. У мирний час логістика оперує ризиковою невизначеністю, де на основі статистичних даних можна побудувати розподіли ймовірностей. В умовах війни стикаємося з глибокою невизначеністю.

Статистичні дані за попередні роки або навіть місяці стають нерелевантними через динамічну зміну лінії фронту, тактику обстрілів та політичні фактори. Класичне стохастичне програмування, яке мінімізує математичне очікування витрат, в таких умовах є небезпечним. Оптимізація номінального сценарію може призвести до катастрофічних наслідків у випадку реалізації найгіршого сценарію, який у воєнний час має значно вищу ймовірність, ніж у мирний. Тому методологічною основою даного дослідження обрано робастну оптимізацію, яка дозволяє знайти рішення, що залишається допустимим та ефективним для будь-якої реалізації параметрів у межах заданої множини невизначеності.

Класичні моделі вибору ТТС доставки вантажів у міжнародному сполученні мінімізують суму транспортних витрат. У гуманітарній логістиці, особливо в умовах війни, це є недостатнім. Запропонована модель використовує композитну цільову функцію, яка мінімізує сукупні соціальні витрати. Цільова функція B складається з трьох зважених компонентів:

$$B = w_l \cdot B_l + w_c \cdot B_d + w_p \cdot B_r \rightarrow \min, \quad (1)$$

де w_l , w_c , w_p – вагові коефіцієнти, що задаються відповідно до обраної стратегії гуманітарної місії. У ситуаціях, коли існує реальна загроза життю, значення коефіцієнтів w_c та w_p істотно перевищують w_l , оскільки пріоритет надається соціальним потребам та мінімізації ризиків, а не логістичній ефективності; B_l – логістичні витрати, грн; B_d – вартість депривації, грн; B_r – вартість ризику, грн.

Логістичні витрати включають витрати на транспортування та обробку вантажів:

$$B_{\text{л}} = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \sum_{m \in M} c_{ij}^m x_{ij}^{km} + \sum_{i \in B_{\text{транс}}} \sum_{k \in K} B_i Q_i^k, \quad (2)$$

де x_{ij}^{km} – бінарна змінна рішення, що набуває значення 1, якщо транспортний засіб, який перевозить вантаж k , проходить дугу (i,j) у модальності m ; у протилежному випадку – 0; B_i – вартість перевантаження у транзитному хабі i , грн.; Q_i^k – обсяг вантажу, що перевантажується, т.

Вартість депривації являє собою ключову інновацію для гуманітарних моделей. Вартість депривації відображає гуманітарний збиток населення через відсутність доступу до товарів першої необхідності. Ця функція є нелінійною (експоненційною) відносно часу затримки.

Функція депривації для критично важливих вантажів розраховується як:

$$D(T_i^k) = \exp(\lambda_k (T_i^k - L_i)) - 1, \quad \text{при } T_i^k > L_i, \quad (3)$$

де T_i^k – фактичний час доставки вантажу k у пункт призначення i , год.; L_i – гранично допустимий час доставки вантажу, год.; λ_k – коефіцієнт «чутливості» депривації до запізнення.

В умовах гуманітарної логістики, на відміну від суворих виробничих графіків, доцільно використовувати концепцію «м'якого часового вікна». Під цим терміном розуміється часовий інтервал, прибуття транспортного засобу в межах якого вважається своєчасним і не тягне за собою жодних штрафних санкцій або негативних соціальних наслідків. Для збереження лінійності моделі використовуємо кусково-лінійну апроксимацію або штрафну функцію для порушення «м'яких вікон»:

$$B_{\text{л}} = \sum_{i \in B_{\text{деп}}} \sum_{k \in K} \left(B_{\text{шп}} \max(0, a_i - T_i^k) + B_{\text{шз}} \max(0, T_i^k - b_i) \right), \quad (4)$$

де a_i, b_i – межі дозволеного інтервалу доставки (м'яке часове вікно), год.; $B_{\text{шп}}$ – штраф за надто ранню доставку, грн/год.; $B_{\text{шз}}$ – штраф

за запізнення, грн/год.

Вартість ризику включає оцінку небезпеки для персоналу та вантажу. В умовах війни екологічні фактори свідомо виключаються, оскільки пріоритетом є виживання, та розраховується за формулою:

$$B_{\text{р}} = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \sum_{m \in M} (\rho_{ij}^m \cdot V_k) \cdot x_{ij}^{km}, \quad (5)$$

де ρ_{ij}^m – ймовірність інциденту або повної (часткової) втрати вантажу на дузі (i,j) ; V_k – цінність вантажу k , грн.

Для гарантування правильного функціонування ТТС вводиться система обмежень, яка забезпечує зв'язність маршрутів, задоволення попиту та дотримання вантажопідйомності транспортних засобів. Кожен транспортний засіб, що входить у вузол, повинен також із нього вийти (за винятком вузлів походження та завершення маршруту). Це гарантує відсутність незавершених маршрутів:

$$\sum_{j \in V} \sum_{m \in M} x_{ij}^{km} - \sum_{j \in V} \sum_{m \in M} x_{ji}^{km} = 0, \quad \forall i \in V \setminus \{V_n, V_k\}, \forall k, \quad (6)$$

Кожен пункт призначення повинен бути відвіданий рівно один раз. Це забезпечує виконання гуманітарного або логістичного завдання:

$$\sum_{j \in V} \sum_{m \in M} x_{ij}^{km} = 1, \quad \forall i \in V_m. \quad (7)$$

Сумарний обсяг вантажу, що перевозиться транспортним засобом, не може перевищувати його максимально допустимого вантажопідйомності Q^m . Це фізичне обмеження транспортного засобу, яке гарантує виконання перевезення без перевантаження:

$$\sum_{i \in V_m} d_i \sum_{j \in V} x_{ij}^{km} \leq Q^m, \quad \forall m. \quad (8)$$

Час прибуття транспортного засобу у вузол j , позначений як T_j , залежить від часу прибуття у попередній вузол T_i , часу обслуговування у вузлі s_i , часу руху між вузлами. У детермінованому випадку час поїздки між вузлами задається як t_{ij} . Тоді базове обмеження має вигляд:

$$T_j \geq T_i + s_i + t_{ij} - M \cdot (1 - x_{ij}), \quad (9)$$

де M – велике число, що деактивує обмеження, якщо дуга (i, j) не використовується.

У реальних умовах (особливо під час війни або на територіях з підвищеним ризиком) час у дорозі є випадковою величиною. Тому замість детермінованого значення використовуємо інтервал невизначеності:

$$\tilde{t}_{ij} \in [\bar{t}_{ij}, \bar{t}_{ij} + \hat{t}_{ij}], \quad (10)$$

де $\bar{t}_{ij}$ – номінальний (очікуваний) час руху, год.; $\hat{t}_{ij}$ – максимально можлива додаткова затримка, год.

Щоб гарантувати виконання часових обмежень за будь-якої допустимої реалізації затримок, вводимо бюджет невизначеності Γ , який визначає, скільки дуг маршруту можуть одночасно мати максимальні затримки. Робастне обмеження набуває вигляду:

$$T_j \geq T_i + s_i + \bar{t}_{ij} + \beta_{ij}(x, \Gamma) - M \cdot (1 - x_{ij}), \quad (11)$$

де $\beta_{ij}(x, \Gamma)$ – робастний буфер, що компенсує можливі затримки при русі, год., він залежить від структури маршруту, вибраних дуг x_{ij} , рівня захисту Γ .

Робастна модель вимагає, щоб сумарний час руху на маршруті залишався меншим за дедлайн D навіть за найнесприятливішої (у межах Γ) комбінації затримок:

$$\sum_{(i,j) \in \text{Path}} \bar{t}_{ij} x_{ij} + \max_{\substack{S \subseteq E \\ |S| \leq \Gamma}} \sum_{(i,j) \in S} \hat{t}_{ij} x_{ij} \leq D. \quad (12)$$

Основне обмеження часу з буфером визначається як:

$$T_j + M \cdot (1 - x_{ij}) \geq T_i + s_i + \bar{t}_{ij} + \left(\Gamma z_j + \sum_{(u,v) \in E} p_{uvj} \right). \quad (13)$$

Двоїсті (лінійні) обмеження визначаються як:

$$\begin{aligned} z_j + p_{ijj} &\geq \hat{t}_{ij} x_{ij}, & \forall (i, j) \in E \\ z_j &\geq 0, & p_{ijj} \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Змінна z_j представляє, наскільки збільшується «страховий запас часу» при використанні одиниці бюджету невизначеності Γ , p_{ijj} поглинає частину затримки на дузі (i, j) коли значення $\hat{t}_{ij}$ перевищує внесок змінної z_j . У контексті робастної оптимізації критично важливим є поняття «страхового запасу часу». Це додатковий резерв часу, який модель автоматично додає до номінальної тривалості маршруту для компенсації можливих затримок, викликаних епістемічною невизначеністю (блокування, обстріли, ремонти). Робастний буфер визначає мінімальний необхідний запас часу, який гарантує виконання дедлайну в найгіршому сценарії, коли затримки виникають не більше ніж на Γ дугах:

$$\Gamma z_j + \sum_{(u,v) \in E} p_{uvj}. \quad (15)$$

Інтеграція умови (15) у модель гарантує, що знайдений маршрут залишатиметься допустимим навіть за умови реалізації найгіршого сценарію затримок у межах бюджету, що є критичним для мінімізації вартості депривації у цільовій функції (1). Таким чином, величина робастного буфера виступає захисним резервом моделі логістичної системи, вартість якого автоматично балансується моделлю проти ризику зриву поставок життєво необхідних вантажів.

Сценарний аналіз стратегій функціонування

Використання розробленої моделі дозволяє порівняти ефективність стратегій у різних сценаріях. Для всебічного аналізу ефективності роботи ТТС пропонується порівняння чотирьох базових стратегій, що варіюються залежно від розподілу вагових коефіцієнтів цільової функції та заданого рівня невизначеності.

Як базовий варіант розглядається сценарій «Мирний час», де пріоритетом виступає економічна ефективність за умови мінімальних ризиків та відсутності критичного дефіциту товарів. У цьому випадку ваговий коефіцієнт логістичних витрат w_d значно перевищує інші параметри, а бюджет невизначеності Γ дорівнює нулю, що наближає роботу моделі до класичної задачі маршрутизації з мінімізацією сукупних фінансових витрат.

На противагу цьому, сценарій «Гуманітарна криза» відображає ситуацію критичної

потреби у швидкій доставці вантажів першої необхідності, коли вартість перевезення втрачає своє першочергове значення. За таких умов домінує коефіцієнт w_c при високій чутливості до запізнення, що змушує модель обирати найшвидші маршрути для мінімізації вартості депривації, ігноруючи при цьому високі витрати на пальне чи експлуатацію дорожніх видів транспорту.

У ситуаціях, що передбачають транспортування цінних вантажів або рух через зони бойових дій, реалізується сценарій «Високий рівень загрози», де головною метою стає збереження вантажу та життя персоналу. Математично це виражається через домінування вагового коефіцієнта ризику w_p , внаслідок чого маршрути формуються в обхід небезпечних дуг із високою ймовірністю інцидентів, навіть ціною суттєвого збільшення часу доставки та загальних витрат.

Окремої уваги потребує сценарій «Максимальна невизначеність», характерний для умов повної непередбачуваності дорожньої ситуації через блокпости або обстріли. При збалансованих вагових коефіцієнтах, але максимальному бюджеті невизначеності Γ , вмикаються робастні обмеження, які призводять до формування маршрутів зі значними часовими буферами. Це гарантує дотримання дедлайнів навіть за умови реалізації найгірших сценаріїв затримок, дозволяючи особам, що приймають рішення, адаптувати стратегію управління ТТС відповідно до поточної військово-політичної ситуації.

З метою верифікації розробленого методологічного підходу та оцінки ефективності запропонованої робастної моделі проведено

моделювання вибору раціональної ТТС на прикладі фрагмента логістичної мережі сполученням «Західний кордон – Харків». Експеримент спрямовано на порівняльний аналіз стійкості рішень, отриманих при варіюванні вагових коефіцієнтів цільової функції та бюджету невизначеності. Як модельний полігон розглянуто дві альтернативні траєкторії доставки:

- маршрут А (умовно-оптимальний), характеризується мінімальною довжиною та низькою базовою вартістю, проте проходить через вузли з високою ймовірністю виникнення інцидентів;
- маршрут Б (альтернативний), характеризується більшою протяжністю та вищими логістичними витратами, однак має низький рівень стохастичної невизначеності параметрів (табл.1).

Таблиця 1. Параметри альтернативних маршрутів

Характеристика	Маршрут А	Маршрут Б
Номінальний час руху, год	15	20
Максимальна можлива затримка, год	12	3
Логістичні витрати, \$	1000	1400
Гранично допустимий час доставки вантажу, год	24	24

Моделювання виконано для трьох базових стратегій функціонування ТТС, описаних у теоретичній частині роботи. Результати розрахунків наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Результати порівняльного аналізу стратегій вибору ТТС

Показник	Сценарій 1 – «Мирний час»	Сценарій 2 – «Гуманітарна криза»	Сценарій 3 – «Максимальна невизначеність»
Цільова функція	Мінімізація витрат ($w_d \rightarrow \max$)	Мінімізація часу/депривації ($w_c \rightarrow \max$)	Робастна стійкість ($\Gamma > 0$)
Обраний маршрут	Маршрут А	Маршрут А	Маршрут Б
Розрахункові витрати	1000 \$ (min)	1000 \$	1400 \$ (+40%)
Прогноз часу (оптимістичний)	15 год	15 год	20 год
Фактичний час (найгірший сценарій)	27 год	27 год	23 год
Результат виконання гуманітарної доставки	Гранично допустимий час доставки вантажу зірвано (>24 год). Критичне зростання вартості депривації	Гранично допустимий час доставки вантажу зірвано. Гуманітарна катастрофа через затримку	Гранично допустимий час доставки вантажу дотримано. Гарантована доставка вантажу

Інтеграція з технологією цифрових двійників

Практична імплементація запропонованої робастної моделі вимагає виходу за межі статичного планування та створення системи управління на базі технології цифрових двійників.

Математична модель у цьому контурі виступає аналітичним ядром, тоді як цифровий двійник забезпечує безперервний двосторонній потік даних між фізичними активами транспортної мережі та їх віртуальними репрезентаціями. Такий підхід дозволяє трансформувати розроблену систему обмежень з інструменту попереднього розрахунку в механізм оперативного реагування, що функціонує в режимі ковзного горизонту планування.

Функціонування системи базується на безперервній агрегації та обробці гетерогенних потоків даних, які надходять від бортових телеметричних систем GPS-трекінгу, API-інтерфейсів прикордонних та митних служб, а також систем оповіщення про повітряну небезпеку.

У процесі синхронізації цифрового двійника з реальною ситуацією відбувається динамічне оновлення параметрів зваженого графа мережі. Зокрема, номінальний час проходження дуги $\hat{t}_{ij}$ коригується на основі поточної статистики трафіку, тоді як параметр максимального відхилення $\hat{t}_{ij}$ перераховується з урахуванням повідомлень про блокування інфраструктури або черги на пунктах пропуску. Одночасно, у разі фізичного знищення або блокування транспортних вузлів, відповідні бінарні змінні доступності дуг примусово набувають нульового значення, змінюючи топологію доступної мережі.

Ключовим елементом запропонованої архітектури є тригерний механізм перерахунку маршрутів. Система не просто відслідковує рух транспортних засобів, а постійно перевіряє виконання робастних обмежень для поточних значень параметрів. Якщо прогнозований час прибуття у цільовий вузол з урахуванням оновлених затримок перевищує допустиме часове вікно, алгоритм ініціює нову ітерацію пошуку оптимального рішення. Це дозволяє генерувати альтернативні маршрути ще до моменту фактичного настання критичної затримки, забезпечуючи адаптивність ланцюга постачання в умовах високої волатильності безпекового середовища та мінімізуючи ризики для гуманітарних місій.

Висновки

Визначено, що в умовах активних бойових дій застосування класичних детермінованих та стохастичних моделей є неефективним через наявність епістемічної невизначеності, коли статистичні дані втрачають репрезентативність.

Обґрунтовано доцільність використання методів робастної оптимізації, яка дозволяє знаходити рішення, стійкі до найгірших сценаріїв розвитку подій, на відміну від оптимізації «середнього» результату.

Розроблено математичну модель вибору раціональної ТТС, ключовою відмінністю якої є використання композитної цільової функції мінімізації сукупних соціальних витрат. На відміну від комерційних моделей, запропонована функція інтегрує три складові – логістичні витрати, вартість ризику (безпека персоналу та вантажу) та вартість депривації (соціальна ціна затримки доставки критичних вантажів).

Сформульовано систему робастних обмежень із використанням бюджету невизначеності. Це дозволило математично формалізувати гарантію дотримання дедлайнів доставки навіть за умов виникнення максимальних затримок на визначеній кількості ділянок маршруту, що забезпечує надійність функціонування гуманітарних коридорів.

Проведене моделювання базових стратегій («Мирний час», «Гуманітарна криза», «Високий рівень загрози», «Максимальна невизначеність») показало, що зміна вагових коефіцієнтів моделі дозволяє адаптувати логістичну систему до поточних пріоритетів – від мінімізації витрат до максимізації безпеки або швидкості доставки, ігноруючи економічні чинники у критичних ситуаціях.

Запропоновано концепцію динамічного управління ТТС шляхом інтеграції розробленої робастної моделі з технологією цифрових двійників. Це забезпечує можливість оперативного перерахунку маршрутів у режимі реального часу на основі даних про зміни трафіку, блокування інфраструктури або воєнні загрози, трансформуючи статичний план у гнучкий механізм реагування.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Polo, A., Morillo-Torres, D., & Escobar, J. W. (2025). Toward Adaptive and Immune-Inspired Viable Supply Chains: A PRISMA Systematic Review of Mathematical Modeling Trends. *Mathematics*, 13(14), 2225. <https://doi.org/10.3390/math13142225>.
2. Li, R. (2025). Optimisation of cross border export e-commerce supply chain network based on machine learning and random programming. *International Journal of Information and Communication Technology*, 26(28), 84–102. <https://doi.org/10.1504/ijict.2025.147712>.
3. Marchenko, V. (2025). Main challenges on the way of implementing «green» technologies in the logistics sphere. *Electronic Scientific Journal Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management* #1 2020, 33, 43–55. <https://doi.org/10.46783/smart-scm/2025-33-3>.
4. Grytsenko, S., & Hallini, I. (2025). Modeling sustainable supply chains for ukraine's export-oriented industries. *Electronic Scientific Journal Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management* #1 2020, 1(31), 46–54. <https://doi.org/10.46783/smart-scm/2025-31-4>.
5. Pencheva, V., Asenov, A., Sladkowski, A., Ivanov, B., & Georgiev, I. (2022). Current Issues of Multimodal and Intermodal Cargo Transportation. *У Modern Trends and Research in Intermodal Transportation* (с. 51–124). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87120-8_2.
6. Vojtov, V., Berezchnaja, N., Kravcov, A., & Volkova, T. (2018). Evaluation of the Reliability of Transport Service of Logistics Chains. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 270. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19802>.
7. Почтовіук, А. Б., Хоменко, М. М., Семеніхіна, В. В., & Заїка, К. О. (2022). Функціонування логістичних інформаційних систем в умовах діджиталізації. *Pochtoviuk, A. B., Khomenko, M. M., Semenikhina, V. V., & Zaika, K. O. (2022). Funktsionuvannia lohistychnykh informatsiynykh system v umovakh didzhytalizatsii. [Functioning of logistic information systems under digitalization conditions] Efektyvna ekonomika*, (11). <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2022.11.2>. [in Ukrainian].
8. Science, J. o. S. C. M. (2015). A Review of Supply Chain Data Mining Publications. *Journal of Supply Chain Management Science*. <https://doi.org/10.18757/jscms.2015.955>.
9. Lu Y. (2025). A multimodal deep reinforcement learning approach for IoT-driven adaptive scheduling and robustness optimization in global logistics networks. *Scientific reports*, 15(1), 25195. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10512-1>.
10. Faggioni, F., & Rossi, M. V. (2025). Resilience: A New Need for Global Supply and Value Chain Networks. *У Network Design, Redesign and Supply Chain Resilience* (с. 1–24). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-03203-4_1.
11. Siddig, M., & Song, Y. (2024). Multistage stochastic programming with a random number of stages: Applications in hurricane disaster relief logistics planning. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.10.004>.
12. Heng, S., Phutthanawong, K., & Boonmee, C. (2025). Optimizing localized humanitarian logistics: a stochastic programming approach for facility location, inventory and evacuation strategies. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*. <https://doi.org/10.1108/jhlscm-02-2025-0020>.
13. Wu, Y., Zhang, J., Li, Q., & Tan, H. (2023). Research on Real-Time Robust Optimization of Perishable Supply-Chain Systems Based on Digital Twins. *Sensors*, 23(4), 1850. <https://doi.org/10.3390/s23041850>.
14. Li, S., Jin, P., Su, S., Yao, J., & Pang, Q. (2025). Digital Twins and Cross-Border Logistics Systems Risk Management Capability: An Innovation Diffusion Perspective. *Systems*, 13(8), 658. <https://doi.org/10.3390/systems13080658>.
15. Zaidi, S. A. H., Khan, S. A., & Chaabane, A. (2024). Unlocking the Potential of Digital Twins in Supply Chains: A Systematic Review. *Supply Chain Analytics*, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2024.100075>.
16. Sun, M., Liang, C., Wang, Y., & Biancardo, S. A. (2025). Maritime Port Freight Flow Optimization with Underground Container Logistics Systems Under Demand Uncertainty. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(6), 1173. <https://doi.org/10.3390/jmse13061173>.

Подригало Михайло¹, д.т.н., проф., завідувач
каф. технології машинобудування і ремонту
машин, тел. +38 0503011658,
e-mail pmikhab@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>

Коробко Андрій¹, д.т.н., проф., каф. технології
машинобудування і ремонту машин,
тел. +38 0668333443,
e-mail ak82andrey@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>

Абрамов Дмитрій¹, д.т.н., проф., каф. технології
машинобудування і ремонту машин,
тел. +38 0951294293, e-mail varan_mail@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1846-1991>

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

Robust optimization of transport-technological schemes for cargo delivery under uncertainty

Abstract. Problem. The full-scale military aggression against Ukraine has fundamentally altered the architecture of logistics systems, rendering traditional «Just-in-Time» supply chain models ineffective. The blockade of Black Sea ports and the constant threat of shelling have forced a strategic shift of cargo flows to western land borders. This environment is characterized not by risk (stochastic uncertainty with known probabilities), but by epistemic (deep) uncertainty, where historical data becomes irrelevant. Consequently, classic deterministic and stochastic models, which focus on minimizing financial costs, are inadequate for humanitarian logistics, where the priority lies in minimizing social consequences and ensuring the physical survival of the population. **Goal.** The primary objective of this study is to enhance the efficiency and reliability of transport-technological schemes (TTS) for international cargo delivery in conditions of military conflict. This is achieved by developing a robust optimization methodology that, unlike classical approaches, minimizes total social costs and effectively accounts for the epistemic uncertainty of logistics network parameters. **Methodology.** The research methodology is based on robust optimization (RO) principles, which utilize «uncertainty sets» rather than probability distributions. The study develops a mathematical model centered on a composite objective function that integrates three key components: direct logistics costs, the cost of risk (threats to cargo and personnel), and the cost of deprivation (a non-linear economic valuation of the humanitarian impact caused by delivery delays). To handle time uncertainty, the authors formulate robust constraints using the concept of an «uncertainty budget» and propose a mechanism for dynamic parameter adaptation using Digital Twin technology. **Results.** A new mathematical model for selecting rational TTS has been developed. Unlike commercial models, the proposed function prioritizes social needs over financial economy in critical situations. The study successfully formulated a system of robust constraints that guarantees the adherence to delivery deadlines (Hard Time Windows) even under the realization of worst-case delay scenarios on a specified number of route segments. Scenario analysis of four strategies («Peace», «Humanitarian Cri-

sis», «High Threat», «Maximum Uncertainty») demonstrated that adjusting the model's weight coefficients allows for the adaptation of the logistics system to current priorities—ranging from cost minimization to the maximization of safety or speed, regardless of economic factors. **Originality.** The scientific novelty lies in the integration of the deprivation cost function into a robust routing model specifically designed for conditions of epistemic uncertainty characteristic of wartime. The authors substantiate the shift from the paradigm of minimizing expected costs (stochastic approach) to minimizing costs in the worst-case scenario (robust approach) for critical humanitarian cargo. **Practical value.** The practical significance of the work involves the proposed concept of dynamic TTS management through the integration of the robust model with Digital Twin technology. This architecture enables operational route re-calculation in real-time based on heterogeneous data regarding traffic, infrastructure destruction, or military threats. This transforms static plans into flexible response mechanisms, ensuring the reliability of humanitarian corridors and the security of supply chains in highly volatile environments.

Key words: international transportation, logistics scheme, optimization, costs, uncertainty, cargo.

Podryhalo Mikhail¹, professor, Doct. of Science, Head of Mechanical Engineering Technology and Machine Repair Department, tel. +38 0503011658, e-mail: pmikhab@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>

Korobko Andrii¹, professor, Doct. of Science, Mechanical Engineering Technology and Machine Repair Department, tel. +38 0668333443, e-mail: ak82andrey@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>

Abramov Dmytrii¹, professor, Doct. of Science, Mechanical Engineering Technology and Machine Repair Department, tel. +38 0951294293, e-mail: varan_mail@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1846-1991>

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

Моделювання активного балансування елементів літій-іонних акумуляторних батарей в MATLAB/Simulink

Смирнов О. П.¹, Борисенко А. О.¹, Іноземцев Д. В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Надійшла: 08.09.2025. Прийнято: 09.12.2025. Опубліковано: 10.12.2025. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. Стаття присвячена дослідженню активного балансування елементів літій-іонних акумуляторів. Обґрунтована необхідність активного балансування літій-іонних акумуляторів, яке підвищує безпеку, довговічність та ефективність акумуляторних батарей електромобілів. Наведено детальний огляд методів балансування. Побудована модель активного балансування двох літій-іонних акумуляторів з номінальною напругою 3,7 В і номінальною ємністю 5,4 А·год в MATLAB/Simulink. Моделювання проведено у двох режимах роботи: без зовнішнього джерела електричної енергії та із зовнішнім джерелом. Результати моделювання свідчать, що використання зовнішнього джерела електричної енергії знижує час балансування приблизно у 2 рази та при цьому значно підвищує стан заряду акумуляторів. Таке дослідження сприяє екологічній стійкості транспортних засобів.

Ключові слова: літій-іонний акумулятор, балансування, джерело електричної енергії, електромобіль, ємність, моделювання, напруга, стан заряду

Вступ

З розвитком електромобілів технологія літій-іонних акумуляторів стала вирішальною з точки зору високої питомої енергії та питомої потужності. Літій-іонна акумуляторна батарея складається з елементів, з'єднаних послідовно та паралельно, щоб відповідати вимогам до напруги та потужності електропривода. Під час виробництва та експлуатації кожний акумулятор у батареї може мати неоднакову напругу та стан заряду SOC (англ. State of Charge, SOC). Стан заряду SOC всієї акумуляторної батареї електромобіля відображає залишок заряду та визначає запас ходу.

Літій-іонні акумулятори дуже чутливі до глибокого розряду або перезаряду, і їх впровадження в електромобілях породжує необхідність моніторингу параметрів стану акумуляторних батарей та належного механізму балансування, яке має вирішальне значення при експлуатації. При проектуванні систем управління акумуляторними батареями BMS (англ.

Battery Management System, BMS) для електромобілів моніторинг та точні прогнози стану заряду SOC є важливою проблемою.

Методи керування акумуляторними батареями та балансування елементів мають вирішальне значення для забезпечення високої ефективності, довговічності та надійності електромобілів. Контролюючи напругу, температуру та стан заряду кожного елемента, система управління акумуляторами BMS допомагає уникнути перезарядження та глибокого розрядження, що може призвести до проблем безпеки та скорочення терміну служби акумуляторної батареї.

Оптимальне керування та балансування літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів гарантує, що кожен елемент отримує оптимальну кількість енергії, що максимізує ефективно та безпечно використання електричної енергії. Без належного балансування елементів акумуляторної батареї електромобілів може виникнути серйозна загроза безпеці, наприклад надмірне зарядження та глибоке розрядження акумуляторів. Балансування літій-

іонних акумуляторних батарей електромобілів стає важливим для кращого та ефективнішого використання електромобілів.

Враховуючи значний внесок балансування елементів у систему керування батареями BMS проведено дослідження надає детальний огляд методів балансування акумуляторів та демонструє приклад балансування на основі побудованої моделі активного балансування літій-іонних батарей в MATLAB/Simulink. Моделювання активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей демонструють покращену ефективність управління станом заряду SOC та напругою. Таке дослідження має вирішальне значення для підвищення ефективності електромобілів та сприяння екологічній стійкості.

Аналіз публікацій

У дослідженні [1] розроблено чотири двонаправлені понижувально-підвищувальні перетворювачі постійного струму. Балансування базується на стані заряду(SO) і сприяє ефективному розподілу енергії під час розряду батарей, а також коректному розподілу зарядного струму під час процесу заряджання.

У роботі [2] проведено аналіз інтелектуальних стратегій керування і методів балансування акумуляторів, що застосовуються в системах керування батареєю BMS електромобілів. Виділено інтелектуальні алгоритми оцінювання SOC акумуляторів, детально розглянуто їхні типи, функції, точність роботи, основні переваги та недоліки. Окрім цього, запропоновано конкретні рекомендації для вдосконалення BMS у майбутньому.

У статті [3] наведено огляд різних типів схем балансування акумуляторів на основі перетворювачів постійного струму. Проведено порівняння чотирьох схем балансування акумуляторів, а також розглянуто характеристики акумуляторних технологій, моделювання батарей, оцінку SOC і оптимізацію ефективності BMS в електромобілях. У матеріалі висвітлені проблеми, пов'язані з роботою BMS і балансуванням літій-іонних батарей, визначені потенційні шляхи для вдосконалення технологій і сформульовані рекомендації для розробки високоєфективних електромобілів у майбутньому.

У дослідженні [4] запропоновано підхід глибокого навчання для розв'язання проблеми дисбалансу акумуляторів в електромобілях. Ефективність запропонованої методики була підтверджена шляхом використання

MATLAB/Simulink для моделювання, навчання та тестування створених моделей, що також сприяло підвищенню ефективності роботи батарей.

У публікації [5] розроблено метод оцінки та прогнозування невідповідностей у літій-іонних акумуляторах електромобілів, який ґрунтується на реальних експлуатаційних даних. Стаття [6] пропонує гібридну методику з використанням ПІД-контролера для балансування напруги активних елементів акумуляторів електротранспорту.

У дослідженні [7] описано методику точного прогнозування стану працездатності акумуляторів електромобілів за допомогою моделей машинного навчання, що відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки та підвищенні довіри споживачів.

У роботі [8] була запропонована схема балансування напруги, заснована на LC-перетворювачі, яка характеризується високою стабільністю та ефективністю, що робить її перспективною для впровадження в системи управління акумуляторних батарей електромобілів.

Стаття [9] представляє огляд ключових компонентів сучасних систем управління батареями BMS, таких як двонаправлене заряджання і розрядження, захист від перевищення постійного струму та напруги, а також методи балансування елементів літій-іонних акумуляторів.

У дослідженні [10] було розроблено нову активну стратегію балансування, яка враховує температурні показники для вдосконалення процесів управління літій-іонними акумуляторними батареями.

Робота [11] пропонує інтелектуальний підхід до активного балансування елементів акумуляторної батареї електромобіля, демонструючи використання алгоритмів машинного навчання для забезпечення оптимізації системи управління енергоспоживанням та працездатності BMS.

У роботі [12] проаналізовано різні аспекти систем управління акумуляторами BMS, включаючи архітектуру, функціональність, вимоги, топології, методи моделювання акумуляторів, різновиди моделей, а також завдання та виклики, що постають перед цими системами. Докладно висвітлено особливості BMS, проведено порівняння моделей акумуляторів та визначена їх важливість для забезпечення ефективної роботи акумуляторної батареї в електромобілях. Дослідження надає

всеосяжний огляд актуальних проблем BMS і пропонує рекомендації для їх розв'язання. Особливу увагу приділено балансуванню елементів, яке є ключовим фактором для підвищення ефективності роботи акумулятора. У роботі детально розглянуто різні методи балансування, їхню ефективність та проведено порівняльний аналіз. Окрім цього, змодельовано процес балансування з використанням програмного забезпечення MATLAB/Simulink для восьмиелементного літій-іонного акумуляторного блоку. Результати аналізу демонструють перевагу активного балансування над пасивним у контексті оптимізації роботи електромобілів.

Стаття [13] присвячена аналізу проблем, труднощів і можливих рішень, пов'язаних із літій-іонними акумуляторами. Розглянуто аспекти системи управління акумуляторами BMS, яка включає моніторинг напруги та струму, оцінку рівня заряду і розряду, функції захисту й вирівнювання, регулювання температури, а також управління й зберігання даних про акумулятори. Окрім цього, у дослідженні детально описано різні типи схем балансування елементів, їх складові, надійність роботи, втрати енергії, ефективність, габарити та вартість, а також висвітлено їх сильні та слабкі сторони. Додатково акцентовано увагу на проблемах і викликах у роботі систем управління акумуляторами. У статті також визначено ключові питання та завдання, які потребують подальшого опрацювання для створення оптимальних і надійних систем управління акумуляторами, орієнтованих на електромобілі та зберігання енергії з відновлюваних джерел.

Стаття [14] спрямована на розробку системи управління акумуляторами BMS, яка забезпечує моніторинг та контроль таких ключових параметрів, як температура, стан заряду SOC і стан справності (англ. State of Health, SOH). Це спрямовано на підвищення ефективності використання акумуляторних батарей. У рамках дослідження представлено активну систему балансування енергії для літій-іонного блоку акумуляторних батарей, яка базується на методах онлайн-оцінки SOC і SOH. Для визначення залишкової ємності акумулятора використовується процедура вимірювання напруги на клеммах кожного елемента. Система балансування активується у випадках, коли відхилення SOC окремого елемента від середнього значення перевищує або не до-

сягає заданого порогу, що дозволяє мінімізувати коливання вихідної напруги. Результати моделювання демонструють, що запропонована BMS здатна з високою точністю синхронізувати SOC і ефективно знижувати пульсації вихідної напруги.

Стаття [15] пропонує детальний аналіз різних типів схем балансування елементів на основі DC/DC перетворювачів постійного струму. Особлива увага приділяється порівнянню чотирьох схем балансування (ізолюваних та неізолюваних) на базі перетворювачів постійного струму, включаючи шунтувальну схему, яка враховує час балансування як у процесі заряджання, так і розряджання. Крім того, цей огляд охоплює глибокий аналіз сучасних акумуляторних технологій, методів моделювання акумуляторів, оцінки стану заряду SOC і оптимізації ефективності систем управління батареями BMS в електромобілях. Основна мета дослідження полягає у висвітленні характеристик, переваг і недоліків таких технологій, а також у розгляді викликів і перспектив для розвитку електромобільності. У завершальній частині статті обговорюються основні проблеми, пов'язані з BMS та балансуванням елементів акумуляторів, визначаються потенційні напрями вдосконалення і запропоновані рекомендації для поглиблення знань у створенні високоефективних електромобілів.

У статті [16] запропоновано автоматичний еквалайзер на основі комутованих конденсаторів, призначений для балансування елементів акумуляторних батарей. Для кожного елемента системи використовується лише два перемикачі та один конденсатор. Управління всіма MOSFET-транзисторами здійснюється за допомогою однієї пари комплементарних сигналів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Енергія автоматично та безпосередньо передається від елементів із вищою напругою до тих, що мають нижчу напругу, без використання додаткових схем моніторингу. Це забезпечує високу ефективність і швидке балансування, незалежне від кількості елементів або початкової напруги кожного з них. Розроблений прототип для чотирьох літій-іонних акумуляторів підтвердив ефективність запропонованого підходу. Експериментальні дані демонструють значне поліпшення процесу балансування, а піковий ККД досягає 92,7%.

У роботі [17] аналізуються різноманітні

методи активного балансування з метою подовження терміну служби акумуляторної батареї. Балансувальна методика на основі індуктивності для системи акумуляторів напругою 60 В була реалізована в середовищі MATLAB/Simscape, а отримані результати представлені та обговорені.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є проведення моделювання активного балансування елементів літій-іонних акумуляторів. Активне балансування підвищує безпеку, довговічність та ефективність акумуляторних батарей електромобілів.

Методологія дослідження заснована на використанні інтерактивного інструменту (програмного забезпечення) для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем MATLAB/Simulink.

Для досягнення мети проведені наступні дослідження:

- проведено обґрунтування необхідності балансування літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів та визначені види балансування;
- побудована модель активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів в MATLAB/Simulink без зовнішнього джерела електричної енергії та проведено математичне моделювання;
- побудована модель активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів в MATLAB/Simulink із зовнішнім джерелом електричної енергії та проведено математичне моделювання;
- визначені висновки та рекомендації.

Обґрунтування необхідності балансування акумуляторних батарей

Аналіз публікацій [1-17] свідчить, що для підвищення безпеки, довговічності та ефективності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів необхідно підтримувати однаковий рівень заряду всіх елементів. Це відбувається за допомогою їх балансування. Балансування літій-іонних акумуляторних батарей можна розділити на дві категорії: активне та пасивне.

Елементи акумуляторної батареї електромобілів мають допуски щодо їх ємності та внутрішнього опору. Під час циклів заряд/розряд різниця зарядів може накопичуватися між елементами, розташованими послідовно. Якщо розряджений акумулятор має меншу

ємність, він заряджатиметься швидше порівняно з іншими елементами. Таким чином, система керування акумуляторними батареями BMS зупиняє заряд таких елементів, інакше вони будуть перезаряджені, що може привести до збільшення температури та посиленої деградації всієї акумуляторної батареї електромобіля. При розряді, акумулятори, що мають меншу ємність, розряджаються швидше, ризикуючи тим, що критично знижується їх напруга та ємність, збільшується деградація.

Балансування акумуляторної батареї використовується для усунення розбіжності параметрів між всіма елементами шляхом узгодження їхніх характеристик. Дослідження [12, 13] підтверджують, що активне балансування є більш ефективним, ніж пасивне балансування для літій-іонних акумуляторних батарей, що призводить до кращої енергоефективності та довшого терміну служби акумуляторної батареї в електромобілі.

Таким чином доведено та обґрунтовано, що балансування акумуляторної батареї електромобіля – це обов'язковий та критичний процес для довгострокової ефективності та надійності електромобіля. Він забезпечує рівномірний рівень заряду всіх акумуляторів, що допомагає підтримувати максимальну ємність, підвищує рівень безпеки, пролонгує термін служби батареї та оптимізує її ефективність.

Види балансування акумуляторних батарей

Збалансована акумуляторна батарея – це стан, в якому кожний елемент працює максимально рівномірно з точки зору своїх робочих параметрів. Будь-які відхилення можуть призвести до проблем, включаючи:

- зменшення безпеки. Елементи, які працюють менш ефективно, можуть швидше розряджатися, перезаряджатися та перегріватися, що може поставити під загрозу безпеку акумуляторної батареї та всього електромобіля і призвести до потенційних інцидентів;
- зменшення ємності та терміну служби акумуляторної батареї. Неефективні елементи можуть стати вузькими місцями в акумуляторних батареях, обмежуючи загальну ємність і термін служби;
- зниження ефективності акумуляторної батареї. Елементи, які працюють нестабільно, можуть знизити ефективність батареї,

збільшити внутрішній опір і зменшити вихідну потужність.

Балансування акумуляторної батареї використовується для усунення розбалансування між всіма елементами шляхом узгодження їх характеристик.

Види балансування акумуляторних батарей розділяють на:

- пасивне балансування;
- активне балансування.

Ілюстрація різних видів балансування в порівнянні зі станом заряду акумуляторної батареї без балансування наведено на рис. 1 [11].

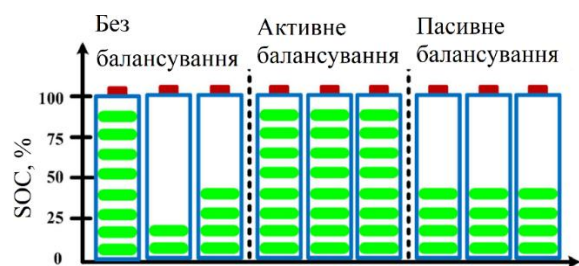


Рис. 1. Стан заряду акумулятора: без балансування, з активним балансуванням та пасивним балансуванням [11].

Пасивне балансування акумуляторних батарей здійснюється шляхом паралельного підключення шунтуючих резисторів до елементів із підвищеним рівнем заряду SOC і є найбільш поширеним методом балансування, який застосовується сьогодні завдяки його низькій вартості, компактному розміру та простоті алгоритмів управління. Проте основними недоліками пасивного балансування є низька енергетична ефективність та додатковий вплив на системи терморегулювання акумуляторної батареї.

На відміну від цього, активне балансування забезпечує можливість перерозподілу заряду між елементами, що сприяє підвищенню загальної ефективності силової установки електромобіля. Ця технологія, яка впроваджується у систему управління акумуляторами BMS, дозволяє підтримувати рівномірний рівень SOC для всіх елементів батареї, що позитивно впливає на її ефективність, безпеку та тривалість експлуатації. Активний підхід передбачає передачу енергії від акумуляторів із вищим рівнем заряду до тих, у яких SOC є нижчим. Ключовими параметрами, які враховуються під час активного балансування, є стан заряду SOC, напруга, струм, температура та ємність акумуляторів.

Пасивне балансування акумуляторних батарей споживає надлишок заряду через розрядні резистори, гарантуючи, що всі елементи батареї будуть мати приблизно еквівалентний стан заряду SOC. Приклад стратегії пасивного балансування акумуляторів (C1 – C4) наведено на рис. 2 [18]. Оскільки струм розряду акумуляторів (C1 – C4) протікає тільки через відкритий транзистор (стан ON), то тільки акумулятор C1 буде розряджати надлишок енергії та розсіювати її через резистор R.

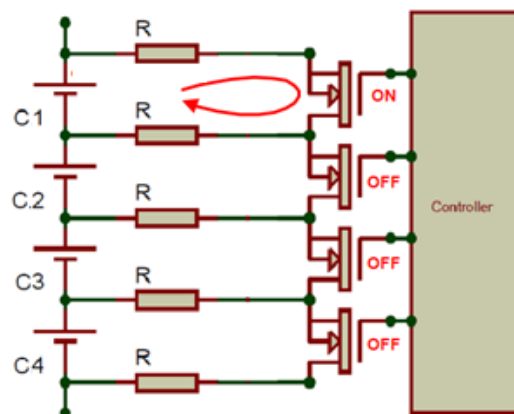


Рис. 2. Приклад стратегії пасивного балансування [18].

Активне балансування є більш складною технікою балансування. Оскільки заряд в елементах батареї перерозподіляється під час циклів заряджання та розряджання, загальний доступний заряд батареї також збільшується, таким чином збільшується дальність пробігу електромобіля. Порівняно з пасивним балансуванням, активне балансування може скоротити час заряджання та зменшити тепло, що виділяється під час балансування. Як правило, будь-яке балансування, досягнуте шляхом передачі енергії, називається активним балансуванням.

Активне балансування потребує щонайменше двох разів перетворення енергії для передачі від елементів з високим станом заряду SOC до елементів з низьким станом заряду SOC через компоненти накопичення енергії. В залежності від компонентів, які використовуються в схемах, активне балансування можна розділити на три основні групи: на основі конденсаторів, на основі індуктивності, на основі перетворювачів.

Активне балансування, яке базується на використанні конденсаторів, передбачає застосування конденсаторів у ролі енергетичних накопичувачів. Вони підключаються па-

ралельно до акумуляторів, що наочно ілюструється на рис. 3 [19].

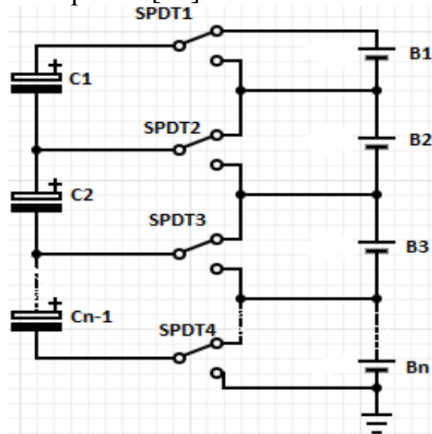


Рис. 3. Схема активного балансування на основі конденсаторів [19].

Активне балансування, яке базується на принципі індуктивності, передбачає використання котушок як елементів для зберігання енергії. У схемі, зображеній на рис. 4, застосовується енергія магнітно-зв'язаних котушок.

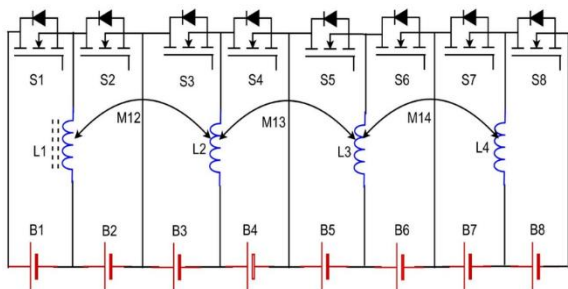


Рис. 4. Схема активного балансування на основі магнітно-зв'язаних котушок [20].

Активне балансування на основі перетворювача має високу гнучкість керування процесом балансування, але зазвичай є більш складним і дорогим. Розрізняють різні категорії активного балансування на основі перетворювачів: балансування підвищувального перетворювача, балансування одиночного перетворювача, балансування Сук-перетворювача, балансування квазірезонансного перетворювача, балансування перетворювача зі зворотним зв'язком тощо.

Схема електрична принципова балансування одиночного резонансного перетворювача наведена на рис. 5 [20].

Принцип дії резонансного перетворювача полягає в тому, щоб накопичувати енергію в резонансному колі LC від самого зарядженого акумуляторного елемента, який підключений

до обох сторін окремих елементів батареї через шини (dc1 і dc2) і перемикачі MOSFET ($S_1, S_2, \dots, S_n$), як показано на рис. 5.

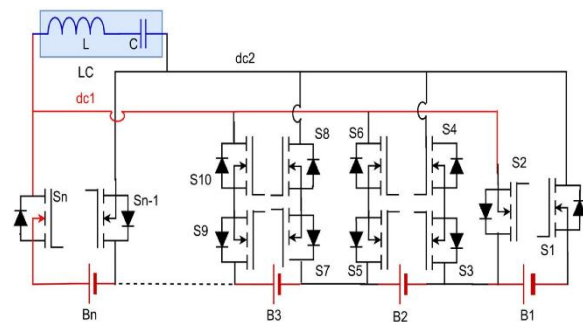


Рис. 5. Схема активного балансування на основі резонансного одиночного перетворювача [20].

Для кожного акумулятора передбачена окрема мікросхема моніторингу напруги всіх елементів, з'єднаних послідовно, які передають дані на систему керування BMS для проведення процедури активного балансування акумуляторів. Для вмикання використовуються додаткові сигнали ШІМ MOSFET вмикається або вимикається під час балансування.

Моделювання активного балансування акумуляторів без зовнішнього джерела електричної енергії

Нами побудована модель активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей в Matlab/Simulink без зовнішнього джерела електричної енергії. У моделі використано генератор ШІМ сигналів з частотою 50 Гц, з паралельно з'єднаними конденсаторами, також використані перемикачі та діоди.

У запропонованій системі балансування акумуляторних батарей спочатку визначаються стан заряду, повні напруги і струми всіх елементів акумуляторної батареї. Потім оцінюється стан заряду SOC кожного акумулятора за допомогою методу інтеграції для обчислення середнього значення SOC, таким чином оцінюючи дисбаланс акумуляторів. Якщо виявлено дисбаланс, для кожного елемента проводяться процедури балансування зарядки і розрядки на основі різниці між станом заряду SOC елемента і середнім значенням SOC всіх акумуляторів.

Для активного балансування літій-іонних акумуляторів електромобілів використовуються різні стратегії балансування. Під час заряджання акумуляторів з станом заряду SOC,

вищим за середній SOC, балансуються за допомогою стратегії розряджання, тоді як під час заряджання акумулятора з станом заряду SOC, нижчим за середній SOC, балансуються за допомогою стратегії заряджання.

На рис. 6 наведена модель активного балансування літій-іонних акумуляторів, що побудована в MATLAB/Simulink. Основною метою запропонованої моделі балансування без зовнішнього джерела електричної енергії є вирівнювання стану заряду SOC між усіма

елементами акумуляторної батареї з використанням конденсаторного перемикавання.

В моделі активного балансування акумуляторів з використанням конденсаторного перемикавання, що побудована в MATLAB/Simulink, використано два літій-іонних акумулятора номінальною напругою 3,7 В і номінальною ємністю 5,4 А·год. Процес моделювання проводилося протягом 40 с з частотою дискретизації 10^{-5} с.

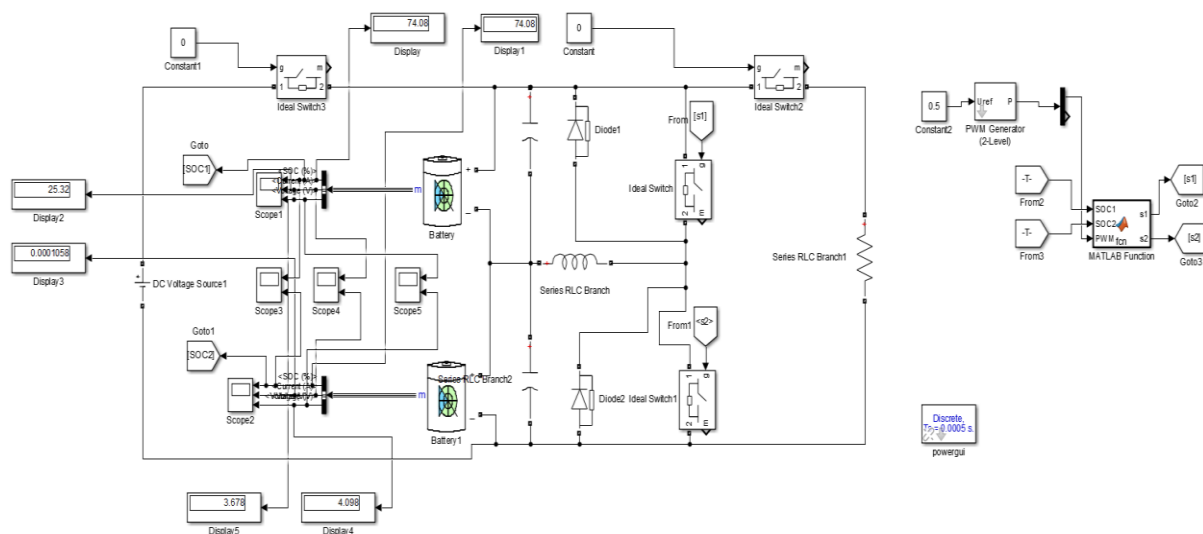


Рис. 6. Модель активного балансування літій-іонних акумуляторів в MATLAB/Simulink]

Моделювання активного балансування літій-іонних акумуляторів без зовнішнього джерела в MATLAB/Simulink полягає у наступному. Для вирівнювання стану заряду SOC між усіма елементами акумуляторної батареї розраховується середнє значення SOC на основі початкових значень SOC кожного елемента.

Згодом усереднене значення SOC застосовується блоком управління для регулювання процесів зарядки або розрядки кожного акумулятора, забезпечуючи оптимальний баланс роботи акумуляторної батареї. У процесі розрядки окремі елементи батареї можуть мати різний рівень заряду, що зумовлено такими чинниками, як особливості виробництва, наявність домішок у матеріалах, температурні коливання та відмінності в початковому стані заряду акумуляторів.

Акумуляторна батарея, застосована у моделюванні, включає два літій-іонні елементи, кожен із яких характеризується різним почат-

ковим рівнем заряду SOC, як наведено в Таблиці 1.

На рис. 7 наведені результати моделювання активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей в Matlab/Simulink без зовнішнього джерела електричної енергії, а саме: фрагмент графіку зміни станів заряду двох акумуляторів SOC1 та SOC2, які вирівнюються приблизно через 24 с, фрагменти зміни струмів (Струм 1, Струм 2) та напруги (Напруга 1, Напруга 2) в період від 23,2 с до 24,4 с.

Таблиця 1 – Початкові та кінцеві рівні заряду SOC двох акумуляторів, що використовуються при моделюванні балансування без залучення зовнішнього джерела електричної енергії

Акумулятор	Початковий SOC	Кінцевий SOC
Акумулятор 1	90 %	74,08 %
Акумулятор 2	68 %	74,08 %

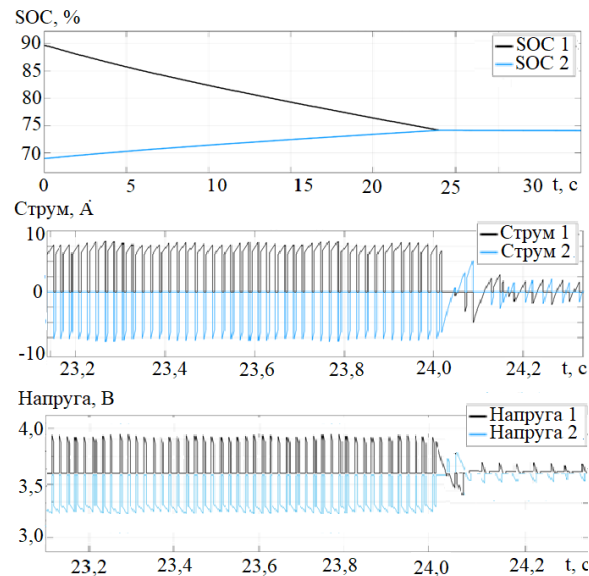


Рис. 7. Результати моделювання активного балансування двох акумуляторів без зовнішнього джерела електричної енергії

Моделювання активного балансування акумуляторів із зовнішнім джерелом електричної енергії

В моделі активного балансування літій-іонних акумуляторів із зовнішнім джерелом електричної енергії, що приблизно аналогічна моделі, що наведена на рис. 6, також використано два літій-іонних акумулятора номінальною напругою 3,7 В і номінальною ємністю 5,4 А·год. Моделювання проводилося протягом 40 с з частотою дискретизації 10^{-5} с.

Основною метою запропонованої системи балансування є не тільки вирівнювання стану заряду SOC між усіма елементами акумуляторної батареї, але й зарядження акумуляторних батарей з одночасним вирівнюванням станів їх заряду.

Моделювання проводиться у два етапи:

- на першому етапі для вирівнювання стану заряду SOC між усіма елементами акумуляторної батареї розраховується середнє значення SOC на основі початкових значень SOC кожного елемента. Згодом це середнє значення SOC використовується блоком управління для визначення зарядки або розрядки кожного акумулятора, забезпечуючи збалансовану роботу акумуляторної батареї;

- на другому етапі стан заряду SOC між усіма елементами акумуляторної батареї вирівнюється та починається паралельний заряд акумуляторів.

Початкові стани заряду SOC та SOC сходження при моделюванні балансування двох

акумуляторів із зовнішнім джерелом електричної енергії наведено в Таблиці 2.

Таблиця 2. Початкові рівні заряду SOC та SOC сходження двох акумуляторів, що використовуються при моделюванні балансування із зовнішнім джерелом електричної енергії

Акумулятор	Початковий SOC	SOC сходження
Акумулятор 1	90 %	86,2 %
Акумулятор 2	68 %	86,2 %

На рис. 8 наведені результати моделювання активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей в Matlab/Simulink із зовнішнім джерелом електричної енергії, а саме: фрагмент графіку зміни станів заряду двох акумуляторів SOC1 та SOC2, які вирівнюються приблизно через 24 с, фрагменти зміни струмів (Струм 1, Струм 2) та напруги (Напруга 1, Напруга 2) в період від 12,3 с до 14,4 с.

Таким чином, в результаті дослідження проведено теоретичне обґрунтування необхідності активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів. Побудовано модель активного балансування з використанням перемикаючого конденсатора для двох літій-іонних акумуляторів з номінальною напругою 3,7 В і номінальною ємністю 5,4 А·год протягом 40 с в MATLAB/Simulink у двох варіантах роботи: без зовнішнього джерела електричної енергії та із зовнішнім джерелом.

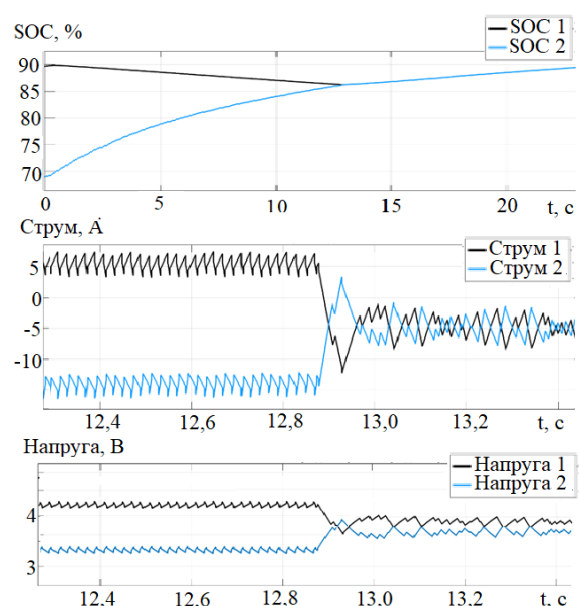


Рис. 8. Результати моделювання активно-го балансування двох акумуляторів із зовнішнім джерелом електричної енергії.

У першому варіанті моделі моделювання відбувається без зовнішнього джерела. В результаті моделювання продемонстрована робота балансування літій-іонних акумуляторів з початковими станами заряду у 90 % та 68 %. Через 24 с стан заряду акумуляторів вирівнявся на значенні $SOC=74.08\%$ і в подальшому не змінив свого значення.

У другому варіанті моделі за допомогою констант було додано зовнішнє джерело електричної енергії для заряду акумуляторів. Результати моделювання свідчать, що на першому етапі моделювання, який триває приблизно 12,9 с стан заряду акумуляторів $SOC\ 1$, $SOC\ 2$ на величині 86,2 %. На другому етапі моделювання стан заряду SOC акумуляторів поступово підвищується з однаковою швидкістю. Через 40 с моделювання стан заряду цих акумуляторів досягає 93,84 %.

Висновки

Балансування акумуляторної батареї електроавтомобіля – це обов'язковий та критичний процес, який відбувається для підвищення безпеки, довговічності та довгострокової ефективності. Він забезпечує рівномірний рівень заряду всіх акумуляторів, що дозволяє підвищити безпеку, продовжити термін служби батареї та покращити її ефективність.

Побудовано модель активного балансування з використанням перемикаючого конденсатора для двох літій-іонних акумуляторів з номінальною напругою 3,7 В і номінальною ємністю 5,4 А·год в MATLAB/Simulink у двох режимах роботи: без зовнішнього джерела електричної енергії та із зовнішнім джерелом.

Результати моделювання активного балансування двох літій-іонних акумуляторів без зовнішнього джерела електричної енергії демонструють, що, під час балансування акумуляторів з початковими станами заряду $SOC1=90\%$ та $SOC2=68\%$, вирівнювання їх стану заряду відбувається через 24 с моделювання на рівні $SOC1=SOC2=74.08\%$ і в подальшому не змінює свого значення.

Результати моделювання активного балансування двох літій-іонних акумуляторів із зовнішнім джерелом електричної енергії демонструють, що, під час балансування акумуляторів з початковими станами заряду $SOC1=90\%$ та $SOC2=68\%$, вирівнювання їх стану заряду відбувається приблизно через 12,9 с моделювання на рівні $SOC1=SOC2=86,2\%$. Після цього стан заряду обох акумуляторів продовжує

жує однаково підвищуватись. Після 40 с моделювання стан заряду двох акумуляторів дорівнював $SOC1=SOC2=93.84\%$.

Порівняння результатів моделювання активного балансування двох літій-іонних акумуляторів без зовнішнього джерела електричної енергії та із зовнішнім джерелом електричної енергії демонструє, що при використанні зовнішнього джерела електричної енергії час балансування акумуляторів знижується практично у 2 рази (з 24 с до 12,9 с), при цьому акумулятори мають значно більший SOC сходження ($SOC1=SOC2=86,2\%$ замість $SOC1=SOC2=74.08\%$).

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Luo, Y.-F., Chen, G.-J., Liu, C.-L., Chen, Y.-S., & Hsieh, H.-S. (2025). An active bidirectional balancer with power distribution control strategy based on state of charge for Lithium-ion battery pack. *Applied Energy*, 377, 124661. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124661>
2. Singh, A. K., Kumar, K., Choudhury, U., Yadav, A. K., Ahmad, A., & Surender, K. (2024). Applications of Artificial Intelligence and Cell Balancing Techniques for Battery Management System (BMS) in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.09.105>
3. Khan, N., Ooi, C. A., Alturki, A., Amir, M., Shreasth & Alharbi, T. (2024). A critical review of battery cell balancing techniques, optimal design, converter topologies, and performance evaluation for optimizing storage system in electric vehicles. *Energy Reports*, 11, 4999–5032. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.041>
4. Arandhakar, S., & Nakka, J. (2025). Deep Learning-Driven Robust Model Predictive Control Based Active Cell Equalisation for Electric Vehicle Battery Management System. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 101694. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101694>
5. Wang, S., Wang, Y., & Soo, Y.-Y. (2025). Evaluation and prediction of lithium-ion battery pack inconsistency in electric vehicles based on actual operating data. *Energy*, 319, 134879. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134879>
6. Divya, T., Umayal C & Vasan Prabhu, V. (2024). A hybrid GTOA-DRN approach based active cell voltage balancing of electric vehicle batteries using PID controller. *Journal of Energy Storage*, 98, 113095.

- <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113095>
7. Yang, C., Ye, Z., Xiong, X., Su, C., & Xie, M. (2024). Improving electric vehicles sustainability: Accurate forecasting of lithium-ion battery health using machine learning models. *Journal of Energy Storage*, 103, 114280. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114280>
 8. Habib, A. K. M. A., & Hasan, M. K. (2023). Lithium-ion battery state-of-charge balancing circuit using single resonant converter for electric vehicle applications. *Journal of Energy Storage*, 61, 106727. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106727>
 9. K, K., & P, P. (2024). Analysis of cell balancing of Li-ion batteries with dissipative and non-dissipative systems for electric vehicle applications. *Energy Reports*, 12, 2408–2428. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.08.023>
 10. Yue, S., Xia, B., Liang, C., Zhang, F., Qu, L., & Huang, X. (2025). Temperature-considered active balancing strategy for lithium-ion battery packs with surrogate optimization algorithm. *Journal of Energy Storage*, 108, 115073. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115073>
 11. Rao, V. S., Sajja, G. S., Manur, V. B., Arandhakar, S., & Krishna, V. B. M. (2025). An exploratory Study on Intelligent Active Cell Balancing of Electric Vehicle Battery Management and Performance Using Machine Learning Algorithms. *Results in Engineering*, 104524. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104524>
 12. Uzair, M., Abbas, G., & Hosain, S. (2021). Characteristics of Battery Management Systems of Electric Vehicles with Consideration of the Active and Passive Cell Balancing Process. *World Electric Vehicle Journal*, 12(3), 120. <https://doi.org/10.3390/wevj12030120>
 13. Habib, A. K. M. A., Hasan, M. K., Issa, G. F., Singh, D., Islam, S., & Ghazal, T. M. (2023). Lithium-Ion Battery Management System for Electric Vehicles: Constraints, Challenges, and Recommendations. *Batteries*, 9(3), 152. <https://doi.org/10.3390/batteries9030152>
 14. Ren, H., Zhao, Y., Chen, S., & Wang, T. (2019). Design and implementation of a battery management system with active charge balance based on the SOC and SOH online estimation. *Energy*, 166, 908–917. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.133>
 15. Khan, N., Ooi, C. A., Alturki, A., Amir, M., Shreasth & Alharbi, T. (2024). A critical review of battery cell balancing techniques, optimal design, converter topologies, and performance evaluation for optimizing storage system in electric vehicles. *Energy Reports*, 11, 4999–5032. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.041>
 16. Shang, Y., Xia, B., Lu, F., Zhang, C., Cui, N., & Mi, C. C. (2017). A Switched-Coupling-Capacitor Equalizer for Series-Connected Battery Strings. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(10), 7694–7706. <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2638318>
 17. Duraisamy, T., & Kaliyaperumal, D. (2020). Active cell balancing for electric vehicle battery management system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 11(2), 571. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i2.pp571-579>
 18. EV Battery Testing Parameters & Battery Management System. – E-Mobility Institute. (2022). E-Mobility Institute – Hardware Enabled E-Mobility Upskilling Platform. <https://courses.divyaguru.org/battery/ev-battery-testing-parameters-battery-management-system/>
 19. Duraisamy, T., & Kaliyaperumal, D. (2020). Active cell balancing for electric vehicle battery management system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 11(2), 571. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i2.pp571-579>
 20. Ashraf, A., Ali, B., Alsunjary, M. S. A., Goren, H., Kilicoglu, H., Hardan, F., & Tricoli, P. (2024). Review of Cell-Balancing Schemes for Electric Vehicle Battery Management Systems. *Energies*, 17(6), 1271. <https://doi.org/10.3390/en17061271>
- Смирнов Олег¹**, д.т.н., професор кафедри автомобільної електроніки,
e-mail: smirnov1oleg@gmail.com,
+38 068 609 94 58,
ORCID: 0000-0003-4881-9042
- Борисенко Анна¹**, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільної електроніки,
e-mail: anutochka2111@gmail.com,
тел. +38 096 110 69 49,
ORCID: 0000-0001-5992-8274
- Іноземцев Дмитро¹**, студент групи АЕ-51-25,
e-mail: inozema03@gmail.com, +380 98 112 42 94
ORCID: 0009-0000-3067-2607
- ¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.
- Modeling active cell balancing of lithium-ion batteries in MATLAB/Simulink**
Abstract. Problem. The article investigates active balancing of lithium-ion battery cells for electric vehicles. Active balancing is crucial for achieving high efficiency, durability and reliability of traction batteries. By monitoring the state of charge (SOC), voltage and temperature of each cell, the battery management system (BMS) prevents overcharge and deep discharge, which cause ageing and safety risks. Optimal control and balancing ensure that each cell receives the required energy, thus maximizing the efficient and safe use of the battery pack. Considering the significant role of cell balancing in BMS operation, the study provides a brief overview of balancing methods and focuses on an example of

active balancing based on a MATLAB/Simulink model. **Goal.** The goal is to simulate active balancing of lithium-ion battery cells and to evaluate its influence on safety, durability and efficiency of electric vehicle batteries. **Methodology.** The research uses MATLAB/Simulink as an interactive environment for modelling, simulation and analysis of dynamic systems. An active balancing model with a switched capacitor for two lithium-ion batteries with a nominal voltage of 3.7 V and a nominal capacity of 5.4 A·h is developed in two operating modes: without an external energy source and with an external source.

Results. Simulation of active balancing of two batteries without an external source shows that, for initial states of charge SOC1 = 90 % and SOC2 = 68 %, SOC equalisation occurs after 24 s at SOC1 = SOC2 = 74.08 % and then remains constant. When an external energy source is used, equalisation is achieved after about 12.9 s at SOC1 = SOC2 = 86.2 %. Afterwards, both batteries charge equally and after 40 s reach SOC1 = SOC2 = 93.84 %. Comparisons show that the external source reduces the balancing time by almost half and provides significantly higher SOC convergence. **Practical value.** Battery balancing is a necessary and critical process for improving

safety, durability and long-term performance of electric vehicles. It ensures uniform charging of all cells, increases safety, extends battery life and improves overall vehicle efficiency, contributing to environmental sustainability.

Key words: lithium-ion battery, balancing, electric power source, electric vehicle, capacity, modeling, voltage, state of charge

Smyrnov Oleh¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 068-60-99-458, smirnov1oleg@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4881-9042

Borysenko Anna¹, Ph.D., Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department, tel. +38 096-11-06-949, anutochka2111@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5992-8274

Inozemtsev Dmytro¹, student of the group AE-51-25, tel. +380 98 112 42 94, inozema03@gmail.com ORCID: 0009-0000-3067-2607

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

Удосконалення системи рекуперативного гальмування м'якого гібридного автомобіля

Двадненко В. Я.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Надійшла: 15.07.2025. Прийнято: 01.12.2025. Опубліковано: 12.12.2025. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. М'які гібридні автомобілі є вдалим компромісом щодо співвідношення ціна-якість серед гібридних автомобілів. Для зниження вартості і ваги, а також підвищення ефективності рекуперації м'якого гібридного автомобіля запропоновано новий алгоритм роботи двигунів силової установки у режимі міського руху. У запропонованому автомобілі рівномірний рух на ДВЗ з відносно невисокою швидкістю (40-50 км/г) замінений на рух з електроприводом та зупиненим ДВЗ. Також виключений режим холостого ходу ДВЗ за рахунок системи старт-стоп. Старт з місця і набір швидкості треба проводити на ДВЗ. При такому режимі руху важливе значення набуває режим службового рекупераційного гальмування електродвигуном-генератором, при якому важливо достатнє електричне навантаження тягового електродвигуна-генератора, що працює в режимі генератора. Мала ємність тягового акумулятора м'якого гібридного автомобіля і відносно висока швидкість з якою проводиться рекуперативне службове гальмування швидко призводить до малої ефективності електричного гальмування через знижений струм заряду тягового акумулятора малої ємності, коли він заряджений. Показано, що в цьому випадку достатнє уповільнення у процесі рекуперативного гальмування буде при підключенні активної трифазної нарузки змінного струму до електродвигуна-генератора.

Ключові слова: алгоритм роботи двигунів гібридного автомобіля, м'які гібридні автомобілі, вентильний електродвигун, тяговий електропривод, гібридна силова установка.

Вступ

Гібридний електромобіль (HEV) має принаймні два джерела енергії для руху: двигун внутрішнього згорання та електродвигун. Є три основні причини, через які автовиробники розробляють і продають HEV: скорочення викидів CO₂ (шляхом зниження витрати палива), скорочення токсичних викидів відпрацьованих газів, поліпшення динаміки трансмісії (шляхом збільшення загальної потужності та крутного моменту [1-5]. Трансмісія HEV досить складна, тому що вона містить усі компоненти транспортного засобу з ДВЗ, а також більшість компонентів чистого електромобілю (EV). Крім того, залежно від рівня гібридизації йому потрібні два джерела енергії: паливний бак для двигуна і батарея для електричної машини. Все це безпосередньо впливає на підвищення ціни автомобіля на ринку [6]. У спробах автомобільних виробників інтегрувати компоненти чистого електромобіля з найменшим втручанням і зміною початкової

конструкції автомобіля, була розроблена архітектура MHEV (м'який гібридний електромобіль). Зроблено це з метою знизити вартість виробництва, а відповідно і ціну автомобіля на виході, що позитивно впливає на конкуренцію гібридних електромобілів в порівнянні з класичними автомобілями з ДВЗ [6].

Також, як і в класичному гібридному автомобілі, у м'якому гібридному автомобілі необхідні два джерела енергії: паливний бак та тягова акумуляторна батарея (ТАБ), а також два двигуни: ДВЗ і тяговий електродвигун-генератор. Однак на відміну від класичного гібрида в м'якому гібридному автомобілі встановлюють менш потужний електродвигун і ТАБ із меншою енергетичною ємністю. Це рішення призводить до того, що електрична машина не може повністю замінити ДВЗ на усіх режимах роботи у зв'язку зі своєю недостатньою потужністю, але цілком здатна частково знизити навантаження з ДВЗ, що в підсумку допомагає знизити витрати палива.

Аналіз публікацій

Зменшити вартість гібридного автомобіля вдалося у м'яких гібридних автомобілях [7-10]. У м'якій гібридній архітектурі РЗ (за класифікацією роботи [7]) електродвигун передає крутний момент до трансмісії. Основною перевагою РЗ є найвищий потенціал рекуперації енергії. Порівняно з конфігураціями Р0, Р1 і Р2 втрати двигуна і трансмісії під час вимкнення трансмісії не враховуються під час рекуперації енергії.

Архітектура РЗ також мають потенціал для електричного режиму водіння (повзучість), якщо вони оснащені електричною машиною з високим крутним моментом. У зв'язку з тим, що електрична машина розташована на стороні приводу, для архітектури РЗ, щоб виконати запуск двигуна, на стороні двигуна має бути встановлена інша електрична машина. Ця функція може бути досягнута за допомогою стандартного посиленого стартера (12 В).

У роботі [10] розглянуто м'який гібридний автомобіль у якому проводиться рух у міському режимі на електроприводі дорогами загального користування, але при цьому старт з місця за допомогою системи старт-стоп [11] та розгін до 40 – 50 км/г проводиться на ДВЗ. На електроприводі ж виконується порівняно рівномірний рух зі швидкостями 40 – 50 км/г із заглушеним ДВЗ, що не вимагає великих прискорень і, відповідно, великої потужності. При такому режимі руху важливе значення набуває режим службового рекупераційного гальмування електродвигуном, при якому важливе достатнє електричне навантаження тягового електродвигуна, що працює в режимі генератора. Основним навантаженням при цьому служить тяговий акумулятор, що заряджається, проте може скластися ситуація, що акумулятор виявляється майже повністю заряджений і споживає на зарядку занадто малий струм. Електромотор-генератор, пов'язаний з ведучими колесами, починає виробляти електроенергію для заряджання акумуляторної батареї відразу після включення режиму рекупераційного гальмування, тобто, після легкого натискання на педаль гальма, щоб увімкнувся стоп-сигнал, а колодки ще не торкалися гальмівних дисків або гальмівних барабанів [10]. Якщо уповільнення виявиться занадто велике, то водій відпускає педаль гальма і, при необхідності, натискає знову. Такий режим рекуперації економить паливо та продовжує термін служби гальмівних колодок. Але така система має й недоліки. У міру

заряджання акумулятора зменшується струм зарядки акумулятора, а також ефективність гальмування електродвигуном зменшується, що змушує водія сильніше натискати на гальмівну педаль, щоб у дію вступали гальмівні колодки. На затяжному спуску настає перегрів гальмівних колодок і гальмівне уповільнення автомобіля може зникнути, тому на такому спуску водієві доводиться підключати ДВЗ у режимі примусового холостого ходу для забезпечення безпеки руху. У той же час у м'якому гібридному автомобілі при недостатній температурі ДВЗ система керування запускає його на холостому ході для прогріву, навіть якщо не потрібна зарядка акумулятора, особливо це важливо в холодну пору року [1].

У роботі [11] розглянуто принципи роботи системи старт-стоп, яка потрібна на функціонування запропонованого алгоритму рекупераційного гальмування м'якого гібридного автомобіля. У роботі [12] запропоновано принцип збереження зайвої рекупераційної енергії у вигляді теплової енергії рідини, що охолоджує.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є підвищення ефективності рекупераційного гальмування і поліпшення теплового балансу ДВЗ в м'якому гібридному автомобілі, шляхом перетворення кінетичної енергії автомобіля, що рухається, в електричну енергію і направлення її на зарядку акумуляторної батареї, а також напрямки надлишку виробленої електроенергії на нагрівання охолоджуючої рідини, температура якої при непрацюючому ДВЗ знижується. У м'якому гібридному автомобілі застосовують тягову батарею порівняно невеликої ємності, тому часто виходить надлишок виробленої при гальмуванні електроенергії. Така ситуація буде, приміром, при рекупераційному гальмуванні на затяжному спуску.

Для досягнення цієї мети необхідно ввести електричні нагрівачі охолоджуючої рідини ДВЗ і автоматичний перемикач рекупераційної електроенергії, що виробляється, з зарядки акумуляторної батареї на ці нагрівачі.

Блок-схема системи рекупераційного гальмування гібридного автомобіля

З цієї метою в системі рекупераційного гальмування гібридного автомобіля, введений електричний нагрівач охолоджувальної рідини в системі охолодження ДВЗ, а також

введений блок керування нагрівачем та заряджання акумуляторної батареї, пов'язаний з датчиком положення педалі гальма (стоп-сигналом) [8].

На рис. 1 зображено блок-схему запропонованої системи рекуперативного гальмування гібридного автомобіля, де позначені: 1 - ДВЗ, 2 - зчеплення, 3 - коробка передач, 4 - пасова передача, 5 - електромотор-генератор, 6 - електричний нагрівач охолоджувальної рідини в системі акумуляторної батареї; 8 - блок управління електромотором-генератором; 9 - акумуляторна батарея. Крім того, на рисунку позначені: 10 - ведучі колеса автомобіля, 11 - головна передача.

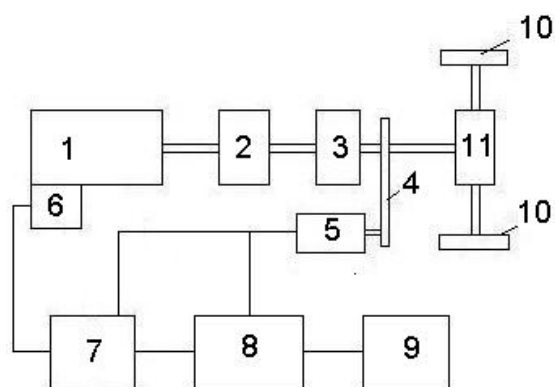


Рис. 1. Блок-схема системи гальмування рекуперативного гібридного автомобіля

Працює система рекуперативного гальмування м'якого гібридного автомобіля так: при впливі на педаль гальма на початку її ходу до вступу в роботу штатної гальмівної системи з'являється сигнал датчика положення педалі гальма. Блок управління нагрівачем і зарядкою акумуляторної батареї 7 через блок керування електромотора-генератора, що забезпечує ефективне гальмування автомобіля електромотором-генератором 5. Одночасно блок управління нагрівачем і зарядкою акумуляторної батареї 7 або спрямовує потужність, що виробляється мотором-генератором для зарядки акумулятора 9, або, залежно від струму зарядки, підключає нагрівач 6 для підігріву охолоджуючої рідини ДВЗ.

Чому потрібне активне трифазне навантаження

Здавалося б досить навантажити генератор одним активним нагрівачем після випрямляча, проте при цьому, як буде показано нижче, гальмівний момент буде меншим, ніж якщо підключати три активних нагрівача

змінного струму. Гальмівний момент при цьому легко регулювати в широких межах легким періодичним натисканням та відпусканням педалі гальма, щоб тільки спрацював стоп-сигнал, вибираючи ступінь гальмування часом включення та вимикання режиму рекуперативного гальмування [10].

Покажемо, що по змінному струму можна зняти з генератора більш велику потужність і забезпечити приблизно вдвічі ефективніше рекуперативне гальмування. Як відомо, трифазний випрямляч має шестипульсовий сигнал. Оскільки на один період фазної напруги у випрямленій напрузі припадає шість пульсацій, і оскільки відбувається двонапівперіодне випрямлення, то на половину періоду фазної напруги, на 180° , припадає три пульсації. Діючою вихідною напругою випрямляча від кожної фази напівперіоду буде тільки третина напівперіоду, а саме 60° в центрі напівперіоду, перші 60° і останні 60° цього напівперіоду діючою вихідною напругою випрямляча будуть напруги двох інших фаз трифазного випрямляча. Причому перші 60° і останні 60° напруга напівперіоду кожної фази на вихід випрямляча не пропустять відповідні цій фазі діоди, оскільки вони будуть замкнені напругою інших фаз, що перевищує напругу цієї фази. Таким чином, тільки третина часу напівперіоду кожної фази проходить на вихід трифазного мостового випрямляча і в результаті отримуємо низький коефіцієнт потужності кожної фази або, іншими словами, втрачаємо енергію спотворень форми струму кожної фази щодо форми напруги цієї фази. Порахуємо співвідношення пропущеної і непропущеної на вихід випрямляча енергій одного напівперіоду, а оскільки таке ж співвідношення у всіх інших напівперіодах, це співвідношення буде справедливо для всього випрямляча. Непропущену енергію W_1 отримаємо через інтеграл:

$$W_1 = \frac{U^2}{R} \int_0^{\pi/3} (\sin x)^2 dx + \frac{U^2}{R} \int_{2\pi/3}^{\pi} (\sin x)^2 dx$$

де U – амплітуда ЕРС генератора, R – сумарний опір навантаження генератора та внутрішній опір генератора.

Окремо візьмемо інтеграл від квадрата синусу. Зауважимо, що:

$$\cos 2x = (\cos x)^2 - (\sin x)^2,$$

і що:

$$(\cos x)^2 + (\sin x)^2 = 1,$$

звідси:

$$(\cos x)^2 = 1 - (\sin x)^2.$$

Тоді:

$$\cos 2x = 1 - 2(\sin x)^2,$$

тоді:

$$\int (\sin x)^2 dx = \int \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos 2x}{2} \right) dx + C,$$

$$\int (\sin x)^2 dx = \frac{x}{2} - \frac{\cos 2x}{4} + C$$

де C – невизначена константа.

Підставивши межі інтегрування маємо не-пропущену енергію:

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{U^2}{R} \int_0^{\pi/3} (\sin x)^2 dx + \frac{U^2}{R} \int_{2\pi/3}^{\pi} (\sin x)^2 dx = \\ &= 0,30709 \frac{U^2}{R} + 0,30709 \frac{U^2}{R} = 0,61418 \frac{U^2}{R}. \end{aligned}$$

Аналогічно обчислимо пропущену для напівперіоду енергію W_2 :

$$W_2 = \frac{U^2}{R} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} (\sin x)^2 dx = 0,51447 \frac{U^2}{R}.$$

Якщо взяти всю енергію за 100%, то таким чином, пропущена енергія складе 46%, а не-пропущена енергія складе 54%. Якщо додати не-пропущену енергію за пропонованою схемою, отримуємо без урахування втрат більш ніж дворазове підвищення корисної енергії генератора. Таким чином загальна енергія генератора W , що виробляється і йде на нагрівання охолоджуючої рідини ДВЗ, складе:

$$W = W_2 + W_1.$$

Такий результат і отримуємо у пропонованому технічному рішенні. Таке підвищення

енергії, що виробляється, а значить і підвищує гальмівний момент особливо необхідно при малих оборотах ДВЗ. Підключення активного трифазного нагрівача відбувається при малих обертах ДВЗ і відбувається при малому зарядному струмі. Пропонована нижче схема спільно зі штатним регулятором напруги включає великий струм, що подається на обмотку збудження, при малих оборотах ДВЗ, і тим самим забезпечує помітний гальмівний момент при нажатій педалі гальма. При підвищених обертах ДВЗ регулятор напруги генератора знижує струм обмотки збудження генератора і не допускає перенапруги в бортмережі та перезарядження акумулятора.

Практична реалізація технічного рішення

Результатом, що досягається зазначеним вище технічним рішенням, є постійно висока, незалежна від ступеня зарядженості акумулятора ефективність гальмування мотором-генератором, наприклад на затяжному спуску. Крім того, відбувається покращення теплового балансу ДВЗ, який у м'якому гібридному автомобілі працює обмежений час і, отже, не завжди достатньо прогрівається. Причому навіть якщо температура ДВЗ достатня, надлишок теплової енергії просто розсіюється в радіаторі системи охолодження ДВЗ. Можливість розсіювати теплову енергію цим радіатором за необхідності легко збільшити шляхом автоматичного включення електричного вентилятора, чого не можна сказати про гальмівну систему автомобіля.

Для підтвердження переваг запропонованого алгоритму розглянемо автомобіль «Ланос-пікап», конвертований у Харківському автодорожньому університеті в м'який гібридний автомобіль із зазначеним вище режимом роботи основного ДВЗ та допоміжного вентиляного електродвигуна (ВЕД). Цей електродвигун кінематично пов'язаний через поліклінову пасову передачу з вторинним валом механічної коробки передач автомобіля.

Кінематична схема трансмісії гібридного автомобіля наведена рис. 2 [10]. Фотографії електродвигуна, пов'язаного через поліклінову ремennу передачу з вторинним валом механічної коробки передач автомобіля наведена на рис. 3 [10].

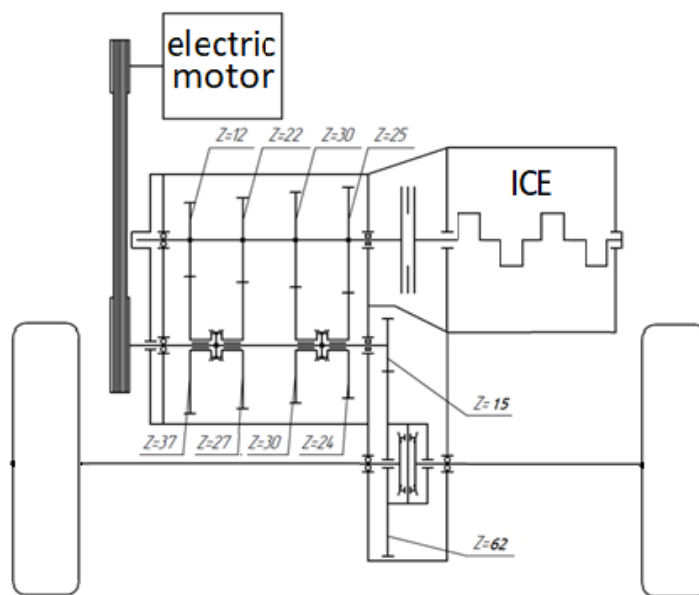


Рис. 2. Кінематична схема трансмісії гібридного автомобіля [10]

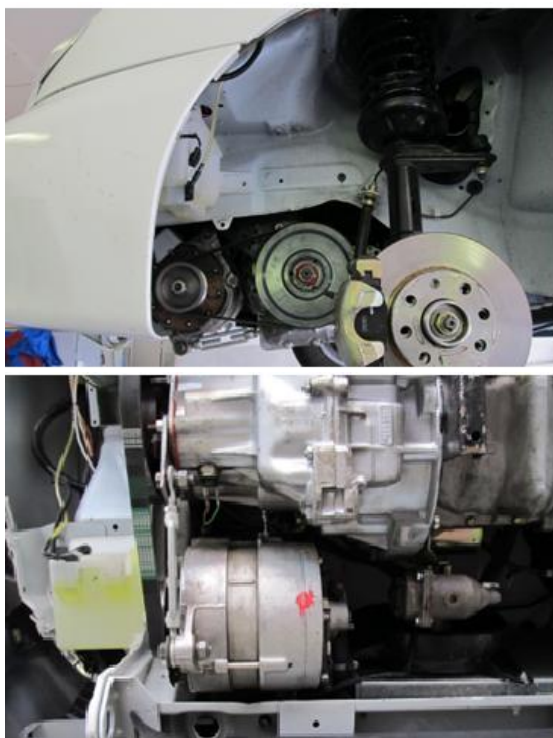


Рис. 3. Фотографії електродвигуна, пов'язаного через поліклінову пасову передачу з вторинним валом механічної коробки передач [10]

Вентильний електродвигун виконаний на основі синхронної електричної машини Г-290 з електромагнітним збудженням.

Електрична схема системи рекуперації

Як мотор-генератор використана синхронна електрична машина Г-290А потужністю 4200

вт. При оборотах вище 1450 об/хв видає напругу 25В і струм 150А. Вона має електромагнітне збудження і як генератор працює з електронним регулятором струму збудження для стабілізації вихідної напруги. Обмотки з'єднані у зірку. Активний опір лінійної фазної обмотки 40 міліом, індуктивність лінійної фазної обмотки при максимальному струмі обмотки збудження 70 мікрогенрі. Обороти, вище яких досягається напруга 28В і струм 150А при роботі з електронним регулятором струму збудження 2500 об/хв [13]. При зростанні оборотів електричної машини відбувається лінійне зростання напруги і одночасно, при цьому, зі зростанням частоти лінійно зростає індуктивний опір обмоток. В результаті відбувається самообмеження струму, що виробляється генератором.

На рис. 4 наведено принципову схему системи рекуперації. Зворотні діоди силових керованих ключів трифазного керованого моста вентильного інвертора на основі транзисторів MOSFET працюють як випрямляч в генераторному режимі електродвигуна-генератора. Такий режим використовується при рекуперативному гальмуванні. Змінна напруга фаз А, В та С генератора подається на три нагрівачі R_{H1} , R_{H2} та R_{H3} охолоджуючої рідини ДВЗ через тиристорні вимикачі. Вибір номіналу резисторів-нагрівачів R_{H1} , R_{H2} та R_{H3} (0,86 ом) здійснено з урахуванням електричної навантаженості мотора-генератора близької до максимальної в широкому інтервалі обертів. Це забезпечує достатній гальмівний момент у процесі майже всього часу службового гальмування,

тільки перед моментами остаточної зупинки буде потрібно сильніше натискання педалі гальма, щоб колодки притиснулися до гальмівних дисків (барабанів). Відкриття всіх тиристорів відбувається під час роботи блокінг-генератора, зібраного на транзисторі VT7, забезпечують для нього робочу точку резисторах R1, R2 і трансформатори тр. Частота роботи блокінг-генератора істотно вища за частоту змінної напруги генератора і на початку кожного напівперіоду всіх трьох фаз відкри-

вається один з тиристорів і залишається відкритим до закінчення напівперіоду.

Живлення на блок-генератор подається ланцюгом АС з блоку контролю струму, на який у свою чергу подається напруга зі стоп-сигналу та інформація з датчика струму у вигляді шунта $R_{ш}$ на рис.4 і рис.5, включеного в ланцюг зарядки акумулятора. На блок контролю струму подається напруга автомобільної бортмережі 12В.

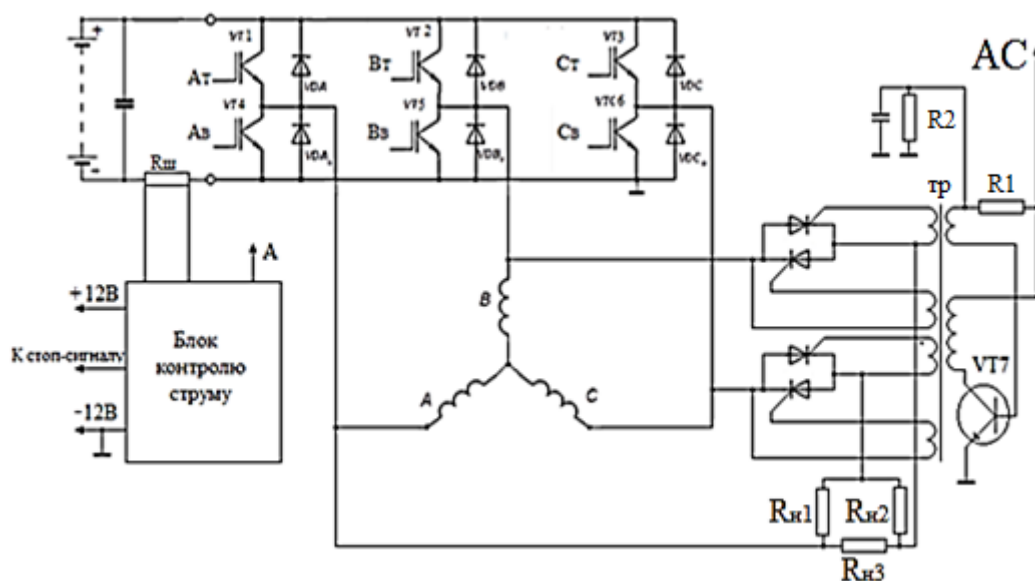


Рис. 4. Принципова схема системи рекуперації

На рис. 5 наведено принципову схему блоку контролю струму. Працює блок контролю струму так.

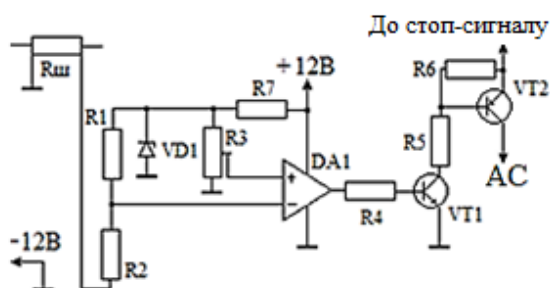


Рис. 5. Принципова схема блоку контролю струму

Напруга з вимірювального струму заряду акумуляторної батареї шунта $R_{ш}$ подається на інвертуючий вхід компаратора DA1. Для усунення зони нечутливості до малого сигналу з шунту $R_{ш}$ на резисторах R1, R2 та зібрана підставка напруги. Опорна напруга, що подається на вхід, що не інвертує, компаратора DA1 і визначає його поріг спрацьовування,

знімається з рухомого контакту змінного резистора R3. Параметричний стабілізатор напруги, зібраний на стабілітроні VD1 та резисторі R7 потрібен для усунення нестабільності напруги бортмережі. Через ланцюг зібраний на транзисторах VT1 і VT2, а також резисторах R4, R5 і R6 вихідний сигнал з компаратора DA1 підключає до напруги, що подається на стоп-сигнал, блок-генератор на VT7 (рис.3), що включає нагрівачі охолоджуючої рідини.

Оскільки сигнал із датчика зарядного струму (шунта $R_{ш}$, рис.4 і рис.5) подається на інвертуючий вхід компаратора DA1, включення нагрівачів відбувається тоді, коли немає достатнього сигналу датчика зарядного струму.

Висновки

Розглянуто вдосконалене рекуперативне гальмування м'якого гібридного автомобіля. Запропоновано надлишкову енергію рекупе-

рації використовувати для нагрівання охолоджувальної рідини ДВЗ, температура якої при непрацюючому ДВЗ знижується. Розглянуто теоретичне обґрунтування, чому потрібне активне трифазне навантаження електро-двигуна-генератора нагрівальними елементами в системі охолодження ДВЗ. Досягнуто ефективного рекуперативного гальмування навіть коли заряджений тяговий акумулятор. Наведено практичну реалізацію технічного рішення, для чого розроблено електричну схему системи рекуперації та принципову електричну схему блоку контролю струму.

Література

1. Iqbal, M. Y., Wang, T., Li, G. X., Chen, D. D., & Al-Nehari, M. (2022). A study of advanced efficient hybrid electric vehicles, electric propulsion and energy source. *Journal of Power and Energy Engineering*, 10(7), 1–12. <https://doi.org/10.4236/jpee.2022.107001>
2. Kia. (n.d.). Гибридни автомобілі Kia. URL: <https://www.kia.com/uk/electric-hybrid-cars/what-is-a-mild-hybrid/> Kia. (n.d.). Hibridni avtomobili Kia [Hybrid Kia vehicles]. Retrieved from <https://www.kia.com/uk/electric-hybrid-cars/what-is-a-mild-hybrid/> [in Ukrainian]
3. Chen, X., Zhong, J., Sha, F., & Zhong, Z. (2021). Research on innovative plug-in hybrid electric vehicle comprehensive energy consumption evaluation method based on statistic energy consumption. *Science Progress*, 104(4). doi: <https://doi.org/10.1177/00368504211050284>
4. Gómez-Barroso, Á., Vicente Makazaga, I., & Zulueta, E. (2025). Optimizing hybrid electric vehicle performance: A detailed overview of energy management strategies. *Energies*, 18(1), 10. <https://doi.org/10.3390/en18010010>
5. Бажинов, О. В., Смирнов, О. П., Серіков, С. А., Гнатов, А. В., & Колесніков, А. В. (2008). Гібридні автомобілі (за ред. О. В. Бажинова). Харків: ХНАДУ, 327 с. Bazhinov, O. V., Smyrnov, O. P., Serikov, S. A., Hnatov, A. V., & Kolesnikov, A. V. (2008). Hibrydni avtomobili (za red. O. V. Bazhinova) [Hybrid vehicles]. Kharkiv: Kharkiv National Automobile and Highway University, 327 p. [in Ukrainian].
6. Fernandes, P., Macedo, E., Tomás, R., & Coelho, C. (2023). Hybrid electric vehicle data-driven insights on hot-stabilized exhaust emissions and driving volatility. *International Journal of Sustainable Transportation*, 17(2), 84–102. <https://doi.org/10.1080/15568318.2023.2219629>
7. x-engineer.org. (2020). Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV) – examples. Retrieved from <https://x-engineer.org/mild-hybrid-electric-vehicles-mhev-examples/>
8. x-engineer.org. (2021). Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV) – control functions. Retrieved from <https://x-engineer.org/mild-hybrid-electric-vehicle-mhev-control-function/>
9. Traoudi, A., Haque, M. S., Luo, C., & Strzelec, A. (2021). Design and optimization of a mild hybrid electric vehicle with energy-efficient longitudinal control. *SAE International Journal of Electrified Vehicles*, 10(1), 14-10-01-0005. <https://doi.org/10.4271/14-10-01-0005>
10. Dvadenko, V., Arhun, S., Myhal, V., & Pushkar, O. (2022). Concept of a low-cost hybrid car. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(6), 253–264. DOI: [10.30880/ijie.2022.14.06.022](https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.06.022)
11. Karrouchi, M. (2023). Practical investigation and evaluation of the Start/Stop system's impact on the engine's fuel use, noise output, and pollutant emissions. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100310>
12. Бажинов, О. В., Двадненко, В. Я., & Колесніков, А. В. (2010). Система рекуперативного гальмування гібридного автомобіля (Патент №52009). Україна, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. № u201001540; заявлено 15.02.2010; опубліковано 10.08.2010, Бюлетень №15. Bazhinov, O. V., Dvadenko, V. Ya., & Kolesnikov, A. V. (2010). Systema rekuperativnoho halmuvannia hibridnoho avtomobilia (Patent No. 52009) [Regenerative braking system of a hybrid vehicle]. Ukraine, Kharkiv National Automobile and Highway University. No. u201001540; filed 15.02.2010; published 10.08.2010, Bulletin No. 15. [in Ukrainian]
13. Василевський, В. І., & Купіїв, Ю. А. (1978). Автомобільні генератори. Транспорт, 160 с. Vasylevskyi, V. I., & Kupiiv, Yu. A. (1978). Avtomobilni heneratori [Automotive generators]. Transport, 160 p. [in Ukrainian].

Двадненко Володимир ¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 067 733 04 41, e-mail: dvadnenkovvladimir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6634-3431>

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

Improving the regenerative braking system of a mild hybrid vehicle

Abstract. Problem. Mild hybrid vehicles are a good compromise in terms of price-quality ratio among hybrid vehicles. To reduce the cost and weight, as well as to increase the efficiency of recuperation of a mild hybrid vehicle, a new algorithm for the operation of the power plant engines in the city traffic mode is proposed. In the proposed vehicle, movement with an electric drive and a stopped ICE is replaced by

uniform movement at a relatively low speed (40-50 km/h) on an asphalt road without a noticeable rise. The ICE idle mode is also excluded due to the start-stop system. Starting from a standstill and accelerating must be done on the ICE. In this driving mode, the service recuperative braking mode of the electric motor-generator is of great importance, in which a sufficient electrical load of the traction electric motor operating in the generator mode is important. The small capacity of the traction battery of the mild hybrid vehicle and the relatively high speed of regenerative service braking quickly lead to low efficiency of electric braking due to the reduced charging current of the low-capacity traction battery. **Goal.** The aim of the work is to increase the efficiency of regenerative braking. **Methodology** It is shown that in this case sufficient deceleration during regenerative braking will be achieved by connecting an active three-phase load for alternating current to the electric motor-generator. **Results.** An improved regenerative braking of a mild hybrid vehicle is considered. Excess recuperation energy is proposed for heating the internal combustion engine coolant. A theoretical justification is considered for why an active three-phase load of the electric motor-generator with heating elements in the internal

combustion engine cooling system is required. A practical implementation of the technical solution is given, for which an electrical circuit of the recuperation system and a basic electrical circuit of the current control unit are developed. **Originality.** This study provides a comprehensive solution to the technical proposal in the patent. **Practical value.** The results of this study are of value to mild hybrid vehicle developers. The knowledge gained contributes to the optimization of the regenerative braking process. This study supports the broader goal of accelerating the adoption of mild hybrid vehicles.

Key words: robotic algorithm of hybrid car engines, hybrid cars, valve electric motor, traction electric drive, hybrid power plant.

Volodymyr Dvadnenko¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automotive Electronics, tel. +38 067-733-04-41, e-mail: dvadnenkovladimir@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6634-3431>

¹Kharkiv National Automobile and Road University, 61002, Ukraine, Kharkiv, Yaroslava Mudryho str., 25.