

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ХАЛАІМОВ Тарас Олександрович

УДК 629.349:62-83:621.317.38

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ З УРАХУВАННЯМ ФАКТОРУ
ТОПОЛОГІЇ МАРШРУТУ

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Галузь знань: 14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Т.О. Халаїмов

Науковий керівник:

Бешта Олександр Степанович, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор.

Дніпро 2026

АНОТАЦІЯ

Халаїмов Т.О. Підвищення енергетичної ефективності електромобільного транспорту з урахуванням фактору топології маршруту. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (галузь знань 14 «Електрична інженерія») – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», МОН України, Дніпро, 2026.

Дисертаційна робота є завершеним науково-дослідним дослідженням, присвяченим підвищенню енергоефективності електромобільного транспорту шляхом урахування фактору топології маршруту під час прогнозування витрат енергії. На основі отриманих теоретичних та експериментальних результатів розв’язано актуальну науково-прикладну задачу встановлення закономірностей впливу топологічного профілю маршруту на витрати електричної енергії транспортним засобом і розроблення підходів до прогнозування енергоспоживання вздовж маршруту, що забезпечує обґрунтований вибір найбільш енергоефективного шляху між двома точками з урахуванням рельєфу та режимів руху.

Метою дисертаційної роботи є визначення впливу фактору топології маршруту на витрати енергії електромобілів під час руху та підвищенні їх енергоефективності за рахунок вибору найбільш енергоефективного шляху руху.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 174 найменувань та 2 додатків.

Об’єкт дослідження – процеси енерговитрат електричних транспортних засобів під час руху в різних експлуатаційних умовах.

Предмет дослідження – методи та моделі прогнозування витрат енергії електричного транспортного засобу з урахуванням топологічного профілю маршруту, режимів руху та потенціалу рекуперації.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків і списку використаних джерел.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, об'єкт, предмет і завдання дослідження, наведено методи досліджень, наукову новизну та практичну значимість результатів, а також подано загальну характеристику структури дисертації.

У першому розділі виконано інформаційний аналіз сучасного стану електромобільного транспорту. Визначено актуальні методи підвищення енергоефективності електромобільного транспорту, виконано порівняльний аналіз прогнозових моделей та проаналізовано методи оцінки максимального пробігу електромобілів.

У другому розділі розглянуто основні внутрішні й зовнішні фактори, що визначають витрати енергії під час руху, та обґрунтовано доцільність урахування топологічного профілю маршруту при прогнозуванні енергоспоживання і запасу ходу. Розроблено підхід до прогнозування витрат енергії вздовж альтернативних шляхів маршруту з урахуванням топології та рекуперації енергії, а також виконано порівняльну оцінку впливу джерел топологічних даних і кроку дискретизації точок уздовж маршруту на точність розрахунку питомих витрат енергії на сегментах різної довжини. Отримані результати дозволили сформулювати практичні рекомендації щодо вибору дискретизації залежно від вимог до точності та обчислювального навантаження.

У третьому розділі виконано експериментальне дослідження впливу фактору топології маршруту на витрати енергії на прикладі електричного транспортного засобу типу «трицикл» у лабораторних умовах. Запропоновано та реалізовано методику виокремлення складових потужності й втрат на навантажувальній установці (втрати мотор-колеса в режимі холостого ходу, втрати стенда, втрати роликів), експериментально визначено коефіцієнт опору кочення та встановлено залежність сили скатування від еквівалентного кута топологічного профілю. Проведено валідацію розрахункових залежностей на

основі відтворення фази WLTC class 3b LOW, виконано аналіз похибок і визначено умови застосовності запропонованого підходу. Сформульовано перспективні напрямки подальших досліджень і напрями практичного використання результатів.

У четвертому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності використання прогнозової моделі для вибору найбільш енергоефективного маршруту. Розроблено розрахункову процедуру перерахунку механічної роботи маршруту у витрати електричної енергії та грошовий еквівалент для сценаріїв приватного користувача та автопарку; оцінено економію енергії (коштів), а також показники ефективності впровадження інформаційної системи за прийнятими тарифами й допущеннями.

У загальних висновках наведено основні кількісні та якісні результати дисертаційного дослідження та сформульовано підсумкові положення щодо можливостей практичного застосування розробленого підходу.

Наукова новизна Отримало подальшого розвитку методологія розрахунку витрат енергії руху електромобіля, що враховує топологічний профіль маршруту та теоретичний потенціал рекуперативного гальмування під час прогнозування енерговитрат уздовж маршруту; удосконалено методи порівняльної оцінки енергоефективності BEV за фазами WLTC за критерієм питомих витрат механічної енергії на 1 км шляху; вперше встановлено, що використання запропонованої методології є коректним в діапазоні зміни кроку дискретизації маршруту в межах 10-100 м з помилкою в межах 8,6 % відносно дискретизації 1 м; теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено на LOW фазі WLTC Class 3b з похибкою 11% використання запропонованої методики для лабораторної установки з трициклом.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці та апробації методики прогнозування витрат енергії електромобіля вздовж альтернативних маршрутів шляхом урахування топологічного профілю, уніфікованих швидкісних циклів процедури WLTP та потенціалу

рекуперативного гальмування, що забезпечує співставну оцінку енерговитрат і обґрунтований вибір найбільш енергоефективного маршруту. Розробці алгоритмічного підходу до ранжування альтернативних шляхів за критерієм питомих витрат енергії з можливістю практичної інтеграції у програмні модулі прогнозування енерговитрат для одного електромобіля або автопарку. Створенні та використанні лабораторної експериментальної бази для відтворення режимів руху за WLTC і імітації топологічного навантаження шляхом формування еквівалентного моменту опору, що забезпечує експериментальну перевірку розрахункових залежностей. Експериментальному визначенні параметрів, критичних для точності прогнозу, що може бути використано для калібрування параметрів моделі під конкретну електромобільну платформу. Обґрунтуванні можливості масштабування запропонованих підходів на BEV шляхом калібрування параметрів моделі, що підвищує обґрунтованість прогнозування енерговитрат, потенціалу рекуперації та запасу ходу при виборі маршруту; Використанні результатів роботи під час створення сервісів енергоефективної маршрутизації та систем керування автопарками з перспективою інтеграції у навігаційні та картографічні сервіси. Використанні матеріалів роботи при підготовці фахівців у сфері електроенергетики

Ключові слова: електропривод, електромобілі, акумуляторні батареї, енергетична ефективність, планування маршруту, топологічний профіль маршруту, споживання енергії, рекуперація енергії, електрична потужність, BLDC двигуни, втрати потужності, мінімум витрат, електричні двигуни.

ABSTRACT

Khalaimov, T.O. Improving of the electric vehicles energy efficiency taking into account the topology of the route. — Manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics" (14 "Electrical engineering"). Dnipro University of Technology. Dnipro, 2026.

The dissertation is a completed research study devoted to improving the energy efficiency of electric vehicles by considering the route topology factor when predicting energy consumption. Based on the theoretical and experimental results obtained, the relevant scientific and applied problem of establishing the relationships between the route topological profile and the electrical energy consumed by a vehicle has been addressed. Approaches have been developed for predicting energy consumption along a route, thereby enabling a justified selection of the most energy-efficient path between two points with consideration of the terrain and driving conditions.

The aim of the dissertation is to determine the influence of the route topology factor on the energy consumption of electric vehicles during motion and to improve their energy efficiency by selecting the most energy-efficient travel path.

The dissertation comprises an introduction, four chapters, general conclusions, a list of 174 references, and two appendices.

The object of the research is the energy consumption processes of electric vehicles operating under different conditions.

The subject of the research is the methods and models for predicting electric vehicle energy consumption with consideration of the route topological profile, driving modes, and regenerative braking potential.

The introduction substantiates the relevance of the research topic, formulates the aim, object, subject, and objectives of the study, and presents the research methods, scientific novelty, and practical significance of the results. It also provides a general description of the dissertation structure.

Chapter 1 presents a review and analysis of the current state of electric vehicle transport. Current methods for improving the energy efficiency of electric vehicles are identified, a comparative analysis of energy consumption prediction models is performed, and methods for estimating the maximum driving range of electric vehicles are examined.

Chapter 2 considers the main internal and external factors that determine energy consumption during vehicle motion and substantiates the need to consider the route topological profile when predicting energy consumption and driving range. An approach is developed for predicting energy consumption along alternative route paths with consideration of route topology and energy recuperation. A comparative assessment is also performed to determine how the sources of topological data and the discretization step of points along the route affect the accuracy of calculating specific energy consumption for route segments of different lengths. The results obtained made it possible to formulate practical recommendations for selecting the discretization step depending on the required accuracy and computational load.

Chapter 3 presents an experimental investigation of the influence of the route topology factor on energy consumption using a tricycle-type electric vehicle under laboratory conditions. A method for separating the power components and losses in the loading test bench is proposed and implemented, including the no-load losses of the in-wheel motor, test-bench losses, and roller losses. The rolling resistance coefficient is determined experimentally, and the relationship between the downslope force and the equivalent angle of the route topological profile is established. The calculated relationships are validated by reproducing the LOW phase of the Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) Class 3b. The errors are analysed, and the applicability limits of the proposed approach are determined. Promising directions for further research and practical applications of the results are formulated.

Chapter 4 provides a technical and economic justification for using the predictive model to select the most energy-efficient route. A calculation procedure is developed for converting the mechanical work required to travel a route into electrical energy

consumption and its monetary equivalent for private-user and vehicle-fleet scenarios. Energy and financial savings are evaluated, together with the economic efficiency indicators for implementing the information system under the adopted electricity tariffs and assumptions.

The general conclusions present the main quantitative and qualitative results of the dissertation research and formulate the final provisions concerning the possibilities for practical application of the developed approach.

Scientific novelty. The methodology for calculating the energy consumption of an electric vehicle during motion has been further developed by considering the route topological profile and the theoretical regenerative braking potential when predicting energy consumption along a route. Methods for the comparative assessment of battery electric vehicle (BEV) energy efficiency over the phases of the WLTC have been improved using the specific mechanical energy consumption per kilometre as the assessment criterion. For the first time, it has been established that the proposed methodology can be correctly applied with a route discretization step ranging from 10 to 100 m, with an error not exceeding 8.6% relative to a discretization step of 1 m. The applicability of the proposed methodology to a laboratory test bench incorporating a tricycle was theoretically substantiated and experimentally confirmed using the LOW phase of WLTC Class 3b, with an error of 11%.

Practical significance of the results. The practical significance of the results lies in the development and validation of a methodology for predicting electric vehicle energy consumption along alternative routes by considering the route topological profile, the standardized speed cycles of the Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP), and the regenerative braking potential. The methodology provides a consistent comparison of energy consumption and enables a justified selection of the most energy-efficient route.

An algorithmic approach has been developed for ranking alternative paths according to the criterion of specific energy consumption, with the possibility of its

practical integration into energy consumption prediction software for an individual electric vehicle or a vehicle fleet.

A laboratory experimental facility has been developed and used to reproduce WLTC driving modes and simulate topological loading by generating an equivalent resistance torque. This provides experimental verification of the calculated relationships.

Parameters that are critical to prediction accuracy have been determined experimentally and may be used to calibrate the model for a specific electric vehicle platform.

The possibility of scaling the proposed approaches to different BEVs by calibrating the model parameters has been substantiated. This improves the reliability of predicting energy consumption, regenerative braking potential, and driving range when selecting a route.

The research results may be used in the development of energy-efficient routing services and vehicle fleet management systems, with the prospect of integration into navigation and digital mapping services. The research materials may also be used in the training of specialists in electrical power engineering.

Keywords: electric drive, electric vehicle, battery packs, energy efficiency, route planning, route topographic profile, energy consumption, energy recuperation, electric power, BLDC motors, power losses, minimum loss, electric motors

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. O. Beshta, D. Cichoń, O. Beshta Jr., T. Khalaimov, and E. C. Cabana, “Analysis of the Use of Rational Electric Vehicle Battery Design as an Example of the Introduction of the Fit for 55 Package in the Real Estate Market,” *Energies*, vol. 16, no. 24, Art. no. 7927, 2023, doi: 10.3390/en16247927. *(Стаття в періодичному науковому виданні Scopus, квартиль Q1(SJR). Особистий внесок здобувача: аналіз апріорної інформації про об’єкт дослідження, обробка даних, узагальнення висновки).*

2. O. S. Beshta, O. O. Beshta, S. S. Khudolii, T. O. Khalaimov, and V. S. Fedoreiko, “Electric vehicle energy consumption taking into account the route topology,” *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 2, pp. 104–112, 2024, doi: 10.33271/nvngu/2024-2/104. *(Стаття в періодичному науковому виданні Scopus, квартиль Q3(SJR). Особистий внесок здобувача: обґрунтування методології досліджень, підготовка експериментальні даних, підготовка ілюстрації та таблиць).*

3. O. S. Beshta, D. O. Beshta, T. O. Khalaimov, and V. A. Burlaka, “Impact of topographic data on electric vehicle energy prediction,” *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 5, pp. 78–85, 2025, doi: 10.33271/nvngu/2025-5/078. *(Стаття в періодичному науковому виданні Scopus, квартиль Q3(SJR). Особистий внесок здобувача: формулювання задачі досліджень, підготовка експериментальні даних, підготовка ілюстрації, формулювання висновків).*

4. О. С. Бешта і Т. О. Халаїмов, «Оцінка енергоефективності наземних мехатронних рухомих платформ з урахуванням фактору топології», *ЕІС*, вип. 108, с. 8–17, Груд 2025, <https://doi.org/10.32782/EIS/2025-108-2>. *(Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б. Особистий внесок здобувача: проведення експерименту, підготовка ілюстрацій та таблиць, математичні розрахунки та формулювання висновків).*

Опубліковані праці апробаційного характеру:

5. O. S. Beshta, O. O. Beshta, D. Beshta, S. Tkachenko, T. Khalaimov and D. Skliar, "Technologies for Increasing the Energy Efficiency of Electric Vehicles," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402470 (*Публікація у матеріалах міжнародної конференції IEEE (conference proceedings), ISBN 979-8-3503-5978-7 / 979-8-3503-5979-4; індексується у Scopus (conference paper). Особистий внесок здобувача: постановка задачі дослідження, підготовка ілюстрацій, доповідь на конференції*).

6. Бешта О., Бешта О., Халаїмов Т. "Вплив топології маршруту на витрати механічної роботи електромобіля". Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2022: Збірник тез. Дніпро. НТУ «ДП». 25 грудня 2022 р. — С. 50-51. URL: https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/EE_%202022.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень*).

7. Бешта О.О., Халаїмов Т.О, Яремчук І.С, Шегера І.П. «Штучний інтелект – як інструмент дослідження впливу фактора манери керування водія на енергоефективність електричного транспорту» Молодь: наука та інновації: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 22–24 листопада 2023 року: у 2-х т. / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2023. Том 1. С. 429-430. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2023/molod-2023-vol1.pdf> (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: формулювання постановки задачі*).

8. Ткаченко С.М., Халаїмов Т.О., Скляр Д.Є. "Використання комунікації по CAN-bus з електромобілями для збору експериментальних даних з метою підвищення їх енергоефективності" Молодь: наука та інновації: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 22–24 листопада 2023 року: у 2-х т. / Національний технічний

університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2023. Том 1. С. 424-425. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2023/molod-2023-vol1.pdf> (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: аналіз літератури, узагальнення висновків*).

9. Ципленков Д.В., Халаїмов Т.О., Лобода А.Ю. "Технології акумулювання електричної енергії для електромобілів: минуле, сучасність, майбутнє". Молодь: наука та інновації: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 22–24 листопада 2023 року: у 2-х т. / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2023. Том 1. С. 413-414. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2023/molod-2023-vol1.pdf> (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: підготовка ілюстрацій, узагальнення висновків*).

10. Бешта О.С., Халаїмов Т.О. "Дослідження інструментів оцінки енергетичної ефективності системи рекуперації електромобілів". Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2024. Збірник тез. Дніпро. НТУ "ДП". 15 грудня 2024 р. – С. 13-15. URL: https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/EE_2023.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: аналіз літератури, підготовка матеріалів доповіді*).

11. Халаїмов Т.О., Лобода А.Ю., "Спосіб оцінки енергоспоживання електричного трициклу в лабораторних умовах". «Молодь: наука та інновації» 2024: матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 13–15 листопада 2024 року (у 3-х томах) / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. Том 2. 32-33 с. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2024/molod-2024-vol2.pdf> (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задач дослідження, підготовка ілюстрацій*).

12. Халаїмов Т.О., "Виклики енергосистеми України в умовах збільшення попиту на електромобілі". Міжнародний форум «Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада» - 2024: матеріали міжнар. конф., 16-18 жовтня 2024 р., м. Дніпро. – Д.: НТУ «Дніпровська політехніка», 2024. – 45 -46 с. URL: <https://science.nmu.org.ua/ua/conferences/Forum/Zbirnyk2024.pdf> (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: тези доповіді*).

13. Халаїмов Т.О., "Компоненти стенду для дослідження енергоефективності електричного трициклу". «Наукова весна» 2025: матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 26–28 березня 2025 року Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2025. С. 164 – 165. URL: https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/Scientific_Spring_2025.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: тези доповіді*).

14. Бешта О.С., Бешта О.О., Халаїмов Т.О. "REMOTE CONTROL SYSTEM FOR A LABORATORY TEST BENCH FOR REAL-TIME ASSESSMENT OF BATTERY-ELECTRIC VEHICLE ENERGY CONSUMPTION". XX Міжнародної конференції з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості. НТУ "ДП". С. 540-544, 2025 рік. URL: https://pzks.nmu.org.ua/ua/science/2025_fin.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: аналіз літератури, підготовка ілюстрацій, формування висновків*).

15. Халаїмов Т.О., "Сучасні напрями досліджень акумуляторних батарей електромобілів та їх значення для України ". «Наукова весна» 2026: матеріали XVI міжнародної науковотехнічної конференції аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 4–6 березня 2026 року Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2026. С. 230-231. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2026/Scientific_Spring_2026.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: тези доповіді*).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ПІД ЧАС РУХУ	27
1.1. Перспективи розвитку електромобільного транспорту у світі. Переваги та експлуатаційні обмеження електромобільного транспорту	27
1.2. Актуальні методи підвищення енергоефективності електромобільного транспорту.....	38
1.3. Порівняльний аналіз моделей прогнозування енергоспоживання електромобілів	41
1.4. Планування маршрутів та методи оцінки максимального пробігу легкових електромобілів	45
1.5. Висновки за першим розділом.....	53
РОЗДІЛ 2. ФАКТОРИ ВПЛИВАЮЧІ НА ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ПІД ЧАС РУХУ	55
2.1. Вплив складу та будова електроприводу сучасних електричних транспортних засобів на витрати енергії	55
2.2. Конфігурації силової частини BEV та вплив компоновки на втрати.	59
2.3. Вплив зовнішніх факторів та обставин руху на витрати енергії EV	69
2.3.1. Температура навколишнього середовища та теплові навантаження	69
2.3.2. Аеродинамічний опір, швидкість руху та вітер	71
2.3.3. Опір коченню: шини, тиск, температура, дорожнє покриття.....	72
2.3.4. Маса транспортного засобу та корисне навантаження	73
2.3.5. Манера керування водія	73

2.3.6. Дорожня інфраструктура та трафік	74
2.3.7. Споживання допоміжних систем.....	75
2.3.8. Топологія маршруту.....	76
2.4. Сили, що діють на електромобіль під час руху	80
2.4.1. Механічна тягова сила та умови її реалізації	82
2.4.2. Нормальні реакції коліс при русі по похилій поверхні.....	84
2.4.3. Сили опору коченню.....	86
2.4.4. Сила опору повітря.	88
2.4.5. Сила скочування.....	89
2.4.6. Баланс сил та механічна робота тягової сили	90
2.4.7. Вплив поворотів вздовж маршруту руху на витрати енергії.....	98
2.4.8. Уніфікація режиму руху	99
2.5. Розрахунок витрат механічної енергії на подолання маршруту містом за циклом WLTC.....	100
2.5.1. Оцінка витрат механічної роботи на міських альтернативних маршрутах	106
2.6. Вплив кроку дискретизації маршруту на результати розрахунку механічної роботи	126
2.7. Вплив джерела топологічних даних на розрахунок витрат енергії	132
2.8. Висновки за другим розділом	138
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРУ	
ТОПОЛОГІЇ МАРШРУТУ НА ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС РУХУ	141
3.1. Конструкція експериментального електричного трицикла	141
3.1.1. Тяговий двигун та контролер.....	143
3.1.2. Джерело живлення та система керування акумуляторною батареєю	146
3.2. Лабораторна навантажувальна установка	149

3.2.1. Рама навантажувальної установки.	149
3.2.2. Навантажувальний механізм.....	151
3.2.3. Система моніторингу параметрів електричного трицикла.....	155
3.2.4. Пристрій для віддаленого керування трициклом	157
3.3. Постановка експерименту	159
3.3.1. Склад лабораторної установки та вимірювальної системи	159
3.3.2. Задачі експериментальних досліджень.....	160
3.4. Експериментальне дослідження енергетичних характеристик електричного трицикла.....	162
3.4.1. Випробування в режимі холостого ходу	162
3.4.2. Випробування трицикла на роликах	164
3.4.3. Встановлення закономірності впливу спорядженої маси трицикла на енергоспоживання.....	168
3.5. Експериментальне дослідження впливу топології маршруту на витрати енергії трицикла	171
3.5.1. Розрахункове визначення сил і еквівалентного кута топологічного профілю	172
3.5.2. Визначення коефіцієнта опору кочення мотор-колеса f_{rr} в умовах НУ	177
3.5.3. Експериментальне визначення сили скаткування F_{pl} та залежності $F_{pl}(\theta)$	179
3.5.4. Перевірка адекватності моделі за WLTC LOW на горизонтальній площині	182
3.5.5. Оцінювання відповідності мотор-колеса вимогам циклу WLTC LOW	185
3.6. Перспективні напрямки подальших досліджень та практичного використання розробленої моделі	187
3.7. Висновки за третім розділом.....	191

РОЗДІЛ 4. РОЗДІЛ. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАРШРУТУ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ З УРАХУВАННЯМ ТОПОЛОГІЇ.....	194
4.1. Методика розрахунку економічного ефекту від вибору енергоефективного шляху	195
4.2. Результати розрахунків для Шляхів № 1-3.....	196
4.2.1. Капітальні та експлуатаційні витрати на створення та підтримку інформаційної системи	199
4.2.2. Економічний ефект для користувача	201
4.2.3. Операційна ефективність для постачальника сервісу	204
4.2.4. Умови повної окупності первісних інвестицій	206
4.3. Висновки за четвертим розділом.....	208
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	210
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	213
ДОДАТОК А.....	235
ДОДАТОК Б	240

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун;

ТЗ – транспортний засіб;

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

АКБ – акумуляторна батарея;

ЕД – електричний двигун;

ЄС – Європейський Союз;

НМ – навантажувальна машина;

НУ – навантажувальна установка;

ПЧ – частотний перетворювач;

EV – electric vehicle;

BEV – battery electric vehicle;

HEV – hybrid electric vehicle;

SoC – state of charge;

SoH – state of health;

BMS – battery management system;

WLTP – Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure;

WLTC – Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle;

ML – machine learning;

HVAC – heating, ventilation, and air conditioning;

API – application programming interface;

DEM – digital elevation model;

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission;

ODP – Open Data Platform;

NPV – net present value;

ROI – return on investment;

ВСТУП

Актуальність теми роботи. На сьогодні в світі існує глобальна проблема яка пов'язана з підвищенням цін на викопні енергоносії. Це змушує провідні країни світу шукати методи більш ефективного використання ресурсів та впровадження різноманітних технологій, що сприяють енергоощадженню та підвищенню енергоефективності. За останні роки в світі спостерігається тренд відмови від викопних енергоносіїв на користь використання електроенергії отриманої від відновлюваних джерел енергії. Європейські країни на державному рівні формують законодавчі ініціативи, що сприяють «зеленому переходу» та зменшенню рівня CO₂. Подібні ініціативи спонукають громадян переходити від традиційних транспортних засобів з двигунами внутрішнього згоряння на електропилі та гібриди. Такий перехід є одним зі способів підвищення енергетичної ефективності та зменшення залежності від викопного палива.

Подібні тенденції провокують суттєве збільшення кількості електромобілів в світі, через що виникають нові проблеми.

Одним з головних недоліків використання електромобільного транспорту є їх відносно короткий пробіг, який обмежується ємністю акумуляторної батареї батареї, тривалий час заряджання, висока вартість заміни акумуляторної батареї, проблеми її утилізацією та нехватка потужності мережі. Сучасний стан національної енергетики України знаходиться під впливом руйнівних факторів, що зумовлені військовим станом. Військові дії впливають на інфраструктурні об'єкти, виробничі підприємства, побутове обслуговування населення, генерацію та розподілення електричної енергії та інше. Зарядні станції для електромобілів потребують значної потужності мережі, яку не можливо отримати в умовах графіків відключень світла, блекаутів та недостатньо розвинутої інфраструктури. В таких умовах підвищення енергоефективності електромобільного транспорту, за рахунок більш ефективного використання електроенергії під час поїздок, призведе до зменшення кількості заряджань та

навантаження на електромережу, що є однією з важливих задач забезпечення стабільності енергосистеми в цілому. Зменшення кількості зарядних циклів також позитивно вплине на стан акумуляторної батареї електромобіля або гібрида та відтермінує його заміну, що є важливим в умовах насичення ринку вживаних електромобілів.

На сьогоднішній день світовою наукою та практикою доведено, що розробка й впровадження технологій планування маршрутів дозволяє зменшити кількість палива, що витрачається на подорож. Однак існуючі системи планування маршрутів не повною мірою враховують конструктивні особливості електромобільного транспорту, а також фактори, що суттєво впливають на запас ходу. Зокрема не враховується фактор топології маршруту, що в свою чергу є, одним з найбільш перспективних, але не достатньо досліджених підходів підвищення енергоефективності.

Використання системи прогнозування найбільш енергоефективного маршруту руху за рахунок визначення питомих витрат енергії руху на кожній поїзді дозволить збільшити запас ходу електромобіля, зменшити кількість циклів заряджання та навантаження на електромережу, що матиме економічний ефект як для окремого водія так і на рівні держави.

Таким чином, розробка нових та удосконалення існуючих методів та технологій підвищення енергоефективності електромобільного транспорту в урахуванням фактору топології маршруту є актуальною задачею, оскільки зменшення питомих витрат енергії під час руху на пряму пов'язане зі збільшенням пробігу електромобіля, а отже і зменшенню навантаження на мережу та подовження строку експлуатації акумуляторної батареї. Отже, науково-практична задача розробка алгоритму вибору найбільш енергоефективного маршруту руху шляхом прогнозування витрат питомої енергії руху з урахуванням фактору топології для електромобільного транспорту, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові та експериментальні дослідження для дисертаційного дослідження проводились протягом 2022-2026 років в лабораторіях кафедр електропривода та електротехніки НТУ «Дніпровська політехніка» (Україна). Автор був виконавцем білатерального науково-дослідницького проекту «Model Predictive Dynamic Energy Efficient Control in Rotating Field Machines» (№ДР 0124U003745), що виконувався у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» (Україна) та університеті Ройтлінгена (Німеччина). Приймав участь у міжнародному проекті DAAD «LAB4All – Open Access Cyber-Physical Laboratories for Ukrainian Universities», що виконувався в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» (Україна) та університеті Ройтлінгена (Німеччина). Отримував стипендію DAAD “Ukraine-Digital: Studienerfolg in Krisenzeiten sichern” (09.2024 – 12.2024). Також є виконавцем проекту Models and means of improving the energy efficiency and reliability of microgrid systems in the context of Industry 4.0 and GreenTech concepts, JAN 2026 - DEC 2028, Funded by the Ministry of Education and Science of Ukraine at the expense of the state budget (state registration number 0126U001138).

Метою дисертаційної роботи визначення впливу фактору топології маршруту на витрати енергії електромобілів під час руху та підвищенні їх енергоефективності за рахунок вибору найбільш енергоефективного шляху руху.

Об'єкт дослідження - процеси енерговитрат електричних транспортних засобів під час руху в різних експлуатаційних умовах.

Предмет дослідження - методи та моделі прогнозування витрат енергії електричного транспортного засобу з урахуванням топологічного профілю маршруту, режимів руху та потенціалу рекуперації.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети дисертаційного дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати сучасний стан електромобільного транспорту та науково-прикладних підходів до оцінювання та прогнозування

енергоспоживання; систематизувати зовнішні та внутрішні фактори, що визначають витрати енергії під час руху, та обґрунтувати прийняті припущення щодо ККД силового агрегату електромобіля.

2. Визначити ступінь впливу фактору топології маршруту та інших найбільш вагомих факторів на витрати енергії електромобіля під час руху й обґрунтувати доцільність їх урахування, сформулювавши вимоги до математичної моделі та вхідних даних.

3. Розробити алгоритм прогнозування витрат електричної енергії уздовж альтернативних шляхів маршруту з урахуванням топології та рекуперативного гальмування, що забезпечує вибір найбільш енергоефективного шляху.

4. Дослідити вплив джерел топологічних даних та кроку їх дискретизації на точність прогнозування витрат енергії.

5. Експериментально підтвердити адекватність отриманих математичних залежностей, оцінити вплив фактору топології маршруту на витрати енергії руху та визначити області застосування моделі за прийнятих припущень.

6. Виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності використання прогновної моделі для визначення найбільш енергоефективного маршруту руху для приватного користувача та автопарку електромобілів.

Методи дослідження. Для досягнення мети використано системний аналіз і критичний огляд джерел для визначення впливу факторів на енергоспоживання електромобіля та постановки наукового завдання; методи математичного моделювання для отримання розрахункових залежностей витрат енергії руху з урахуванням топологічного профілю маршруту, опору кочення та режимів руху; чисельні методи й комп'ютерне моделювання з використанням прикладних програм MATLAB, MATHCAD та EXCEL. Для реалізації розрахункових процедур і порівняння сценаріїв при різних джерелах топологічних даних та дискретизації маршруту; експериментальні методи для валідації моделі за даними швидкості, струму та напруги; методи статистичної обробки для оцінювання похибок і відтворюваності результатів. Вибір методів обґрунтовано

необхідністю забезпечення достовірності висновків шляхом порівняння розрахункових і експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів.

У дисертаційній роботі запропоновано нові та удосконалено відомі методичні підходи, математичні залежності й експериментальні засоби прогнозування витрат енергії електромобільного транспорту з урахуванням топологічного профілю маршруту, що забезпечує обґрунтований вибір енергоефективного шляху. Основні наукові результати, які визначають новизну, полягають у такому:

1. Отримало подальшого розвитку методологія розрахунку витрат енергії руху електромобіля, що враховує топологічний профіль маршруту та теоретичний потенціал рекуперативного гальмування під час прогнозування енерговитрат уздовж маршруту.

2. Отримало подальшого розвитку методологія розрахунку витрат енергії руху електромобіля, що враховує топологічний профіль маршруту та теоретичний потенціал рекуперативного гальмування під час прогнозування енерговитрат уздовж маршруту.

3. Отримало подальшого розвитку методологія розрахунку витрат енергії руху електромобіля, що враховує топологічний профіль маршруту та теоретичний потенціал рекуперативного гальмування під час прогнозування енерговитрат уздовж маршруту.

4. Отримало подальшого розвитку методологія розрахунку витрат енергії руху електромобіля, що враховує топологічний профіль маршруту та теоретичний потенціал рекуперативного гальмування під час прогнозування енерговитрат уздовж маршруту.

Практична значимість одержаних результатів полягає у можливості практичного використання розроблених методичних і алгоритмічних рішень для оцінювання механічної роботи руху та теоретичного потенціалу рекуперації з

урахуванням топологічного профілю маршруту на основі швидкісних профілів стандартизованих випробувальних циклів. Результати дослідження можуть бути застосовані в освітній та інженерно-прикладній діяльності, зокрема:

1. У навчальному процесі підготовки здобувачів першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю G3 «Електрична інженерія» в межах освітніх програм «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та «Електромобільність та енергетична інфраструктура» під час викладання дисциплін «Управління енергією та оптимізація руху електромобіля» і «Основи гібридних та електричних транспортних засобів та їх силові агрегати» шляхом використання розробленої експериментальної стендової бази (стенд із трициклом та навантажувальною установкою), розміщеної в НТУ «Дніпровська політехніка» у лабораторії кафедри електротехніки.

2. Під час розроблення програмного забезпечення та аналітичних модулів для задач прогнозування енерговитрат і вибору енергоефективного маршруту серед альтернатив (для одного електромобіля або парку електромобілів), у тому числі як складової картографічних/навігаційних сервісів та систем керування автопарками.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові та прикладні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто або за його безпосередньої участі та відображають результати самостійного виконання теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на розв'язання науково-прикладної задачі оцінювання енерговитрат руху електричних транспортних засобів з урахуванням топологічного профілю маршруту. Особистий внесок здобувача підтверджується проведенням аналізу вихідних даних і літературних джерел, формулюванням постановки задачі дослідження, обґрунтуванням методології, виконанням математичних розрахунків і чисельних експериментів, підготовкою експериментальних даних, розробленням і виготовленням експериментальної стендової бази (трицикл та навантажувальна установка), а також узагальненням і формулюванням висновків. У наукових

працях, опублікованих у співавторстві, особисто здобувачем отримано такі результати: [1] – аналіз апріорної інформації про об’єкт дослідження, обробка даних та узагальнення висновків; [2] – обґрунтування методології досліджень, підготовка експериментальних даних, підготовка ілюстрацій та таблиць; [3] – формулювання задачі досліджень, підготовка експериментальних даних, підготовка ілюстрацій та формулювання висновків; [4] – проведення експерименту, підготовка ілюстрацій та таблиць, математичні розрахунки та формулювання висновків; [5] – постановка задачі дослідження, підготовка ілюстративних матеріалів та доповідь результатів на міжнародній конференції; [6] – постановка задачі досліджень; [7] – формулювання постановки задачі; [8] – аналіз літературних джерел та узагальнення висновків; [9] – підготовка ілюстрацій та узагальнення висновків; [10] – аналіз літератури, підготовка матеріалів доповіді; [11] – постановка задач дослідження та підготовка ілюстрацій; [12] – підготовка тез доповіді; [13] – підготовка тез доповіді; [14] – аналіз літературних джерел, підготовка ілюстраційних матеріалів та формування висновків; [15] – підготовка тез доповіді.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на таких науково-практичних заходах: Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2022 (м. Дніпро, Україна, 25 грудня 2022 р.); 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES 2023) (м. Кременчук, Україна, 2023 р.); Молодь: наука та інновації: XI Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених (м. Дніпро, Україна, 22–24 листопада 2023 р.); Міжнародний форум «Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада» (м. Дніпро, Україна, 16–18 жовтня 2024 р.); Молодь: наука та інновації: XII Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених (м. Дніпро, Україна, 13–15 листопада 2024 р.); Міжнародна науково-практична конференція Енергозбереження та енергоефективність (м. Дніпро, Україна, 15

грудня 2024 р.); «Наукова весна» 2025: XV Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів та молодих вчених (м. Дніпро, Україна, 26–28 березня 2025 р.); XX Міжнародна конференція. Проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості (м. Дніпро, Україна, 5 грудня 2025 р.); «Наукова весна» 2026: XVI Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів та молодих вчених (м. Дніпро, Україна, 4–6 березня 2026 р.).

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 15 наукових праць, серед яких 3 статті в періодичному виданні, що включене до наукометричної бази Scopus, 1 стаття у науковому фаховому виданні України категорії Б, 1 публікація в матеріалах міжнародної конференції, що індексуються в Scopus (conference paper), 10 тез доповідей на Всеукраїнських і Міжнародних конференціях. Основні науково-прикладні результати дисертаційної роботи опубліковано в періодичних наукових виданнях, вони охоплюють усі наукові положення, що виносяться на захист.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 174 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг роботи – 241 сторінок, з яких основний текст викладено на 194 сторінках машинописного тексту, включаючи 76 рисунків і 47 таблиць. Додатки містять список публікацій за темою дисертації та акти впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ПІД ЧАС РУХУ

У розділі проаналізовано фактори, що визначають витрати енергії електричного транспортного засобу (Electric Vehicle, EV) під час руху, та сучасні методи підвищення енергоефективності електромобільного транспорту. Розглянуто втрати в акумуляторній батареї (АКБ), тяговому електроприводі (ЕП) і допоміжних системах, а також вплив швидкості, прискорення, маси, температури, стану АКБ та параметрів маршруту на енергоспоживання.

Проаналізовано фізично орієнтовані, емпіричні, побудовані на основі даних і гібридні моделі прогнозування витрат енергії та запасу ходу. Визначено їхні переваги, обмеження та вимоги до вихідних даних. Обґрунтовано доцільність застосування фізично орієнтованої моделі для прогнозування енергоспоживання вздовж альтернативних шляхів з урахуванням топологічного профілю маршруту.

1.1. Перспективи розвитку електромобільного транспорту у світі. Переваги та експлуатаційні обмеження електромобільного транспорту

У світовому транспортному секторі відбувається збільшення частки електрифікованих транспортних засобів (ТЗ) і поступове заміщення ТЗ із двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). За джерелом енергії та структурою силової установки розрізняють акумуляторні електромобілі (Battery Electric Vehicle, BEV), гібридні електромобілі (Hybrid Electric Vehicle, HEV) і підзаряджувані гібридні електромобілі (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV).

У BEV рух забезпечується виключно тяговим ЕП, який отримує енергію від АКБ, що заряджається від зовнішньої електричної мережі. PHEV поєднують електричний привод і ДВЗ, а також передбачають зовнішнє заряджання АКБ. У HEV заряджання АКБ переважно здійснюється від ДВЗ і під час рекуперативного

гальмування, тому підключення до зовнішньої мережі не є штатним режимом їх експлуатації.

Розвиток сектору електромобільного транспорту визначається наступними енергетичними, екологічними та експлуатаційними перевагами.

1. Висока ефективність тягового ЕП. Електричні машини та силові перетворювачі характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) у широкому діапазоні режимів роботи порівняно з ДВЗ. У сучасних BEV застосовують синхронні машини з постійними магнітами (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM), асинхронні машини та синхронні машини з електромагнітним збудженням. [1]. Фактичний ККД тягової системи ЕП залежить не лише від типу електричного двигуна, а й від робочої точки на характеристиці моменту та швидкості, алгоритму керування, втрат в інверторі, трансмісії та АКБ. Тому паспортне (номінальне) максимальне значення ККД електродвигуна не може повністю характеризувати енергоефективність EV у змінних режимах руху.

Енергетичну ефективність транспортного засобу доцільно оцінювати на двох рівнях. Показник Tank-to-Wheel (TTW) характеризує ефективність перетворення енергії, накопиченої в АКБ або паливному баку, у механічну роботу на колесах.

Показник Well-to-Wheel (WTW) додатково враховує видобування або виробництво первинної енергії, її перетворення, передавання, накопичення та використання транспортним засобом [2].

У межах TTW електричний транспорт має суттєву перевагу над ТЗ із ДВЗ. Значення WTW для BEV залежить від структури генерації електроенергії, втрат під час її передавання і заряджання, а також характеристик АКБ. Результати WTW-оцінювання потрібно наводити із зазначенням регіону, структури енергобалансу та прийнятих меж розрахунку [2].

2. Зменшення локальних викидів під час експлуатації. BEV не мають випускної системи та не утворюють під час руху локальних викидів вуглекислого газу CO₂, оксидів азоту та продуктів згоряння палива [3], [4]. Це є важливою перевагою для міст із високою щільністю транспортних потоків. Водночас

використання BEV не усуває викиди частинок, які пов'язані зі зношуванням шин, дорожнього покриття та фрикційних гальм. Рекуперативне гальмування зменшує використання фрикційної системи, однак більша маса окремих BEV може збільшувати навантаження на шини. Тому екологічний ефект потрібно оцінювати з урахуванням повного життєвого циклу ТЗ.

3. Рекуперація енергії. Під час уповільнення тяговий електродвигун може переходити в генераторний режим і перетворювати частину кінетичної енергії ТЗ в електричну енергію, яка повертається до АКБ. Рекуперативне гальмування зменшує загальні витрати енергії та навантаження на фрикційну гальмівну систему [5].

Потенціальний обсяг відновленої енергії залежить від швидкості руху, інтенсивності гальмування, потужності електродвигуна, перетворювача та температури АКБ. Важливими обмежувальними параметрами є рівень заряду (State of Charge, SoC) та допустимий зарядний струм. За високого SoC, низької температури або перевищення допустимої зарядної потужності система керування акумуляторною батареєю (Battery Management System, BMS) обмежує струм рекуперації. У такому разі частина необхідного гальмівного моменту створюється фрикційною системою, а потенційно доступна енергія не повертається до АКБ [6], а розсіюється у тепло. Отже, ефективність рекуперації залежить не лише від конструкції ЕП, а й від швидкісного та топологічного профілів маршруту.

4. Зменшення залежності від нафтових ресурсів. Перехід на електричну тягу знижує залежність транспорту від нафтопродуктів і коливань цін на нафту [7]. Електрична енергія для заряджання може вироблятися з теплових, атомних і відновлюваних джерел. Водночас електрифікація транспорту підвищує вимоги до генерувальних потужностей, розподільних мереж і зарядної інфраструктури.

Окрім переваг експлуатація BEV має також технічні обмеження. До них належать менший запас ходу порівняно з більшістю ТЗ із ДВЗ, значна тривалість заряджання, залежність від доступності зарядної інфраструктури, висока маса АКБ, зниження її доступної ємності в ході деградації. Ці фактори впливають на питомі

витрати енергії, допустиму потужність тягового ЕП та точність прогнозування залишкового пробігу.

Розвиток електромобільності підтримується нормативними вимогами щодо скорочення викидів і розгортання зарядної інфраструктури. У Європейському Союзі (ЄС) стратегічні напрями декарбонізації визначено ініціативою European Green Deal [8]. Вимоги до розвитку інфраструктури альтернативних палив, зокрема загальнодоступних зарядних станцій, встановлено Регламентом (EU) 2023/1804[9]. Норми щодо викидів CO₂ нових легкових автомобілів і легких комерційних ТЗ визначено Регламентом (EU) 2019/631 з урахуванням змін, внесених Регламентом (EU) 2023/851 [10].

В Україні напрями розвитку безпечного, енергоефективного та екологічно чистого транспорту визначено Національною транспортною стратегією України на період до 2030 року та операційним планом її реалізації у 2025–2027 роках [11].

Світовий ринок електромобілів характеризується стійким зростанням. У 2025 році у світі було продано понад 20 млн електричних автомобілів, що приблизно на 20 % більше порівняно з 2024 роком. Частка електричних автомобілів досягла приблизно чверті загального обсягу продажів нових автомобілів [12]. Динаміку світових продажів електромобілів за регіонами наведено на рис. 1.1

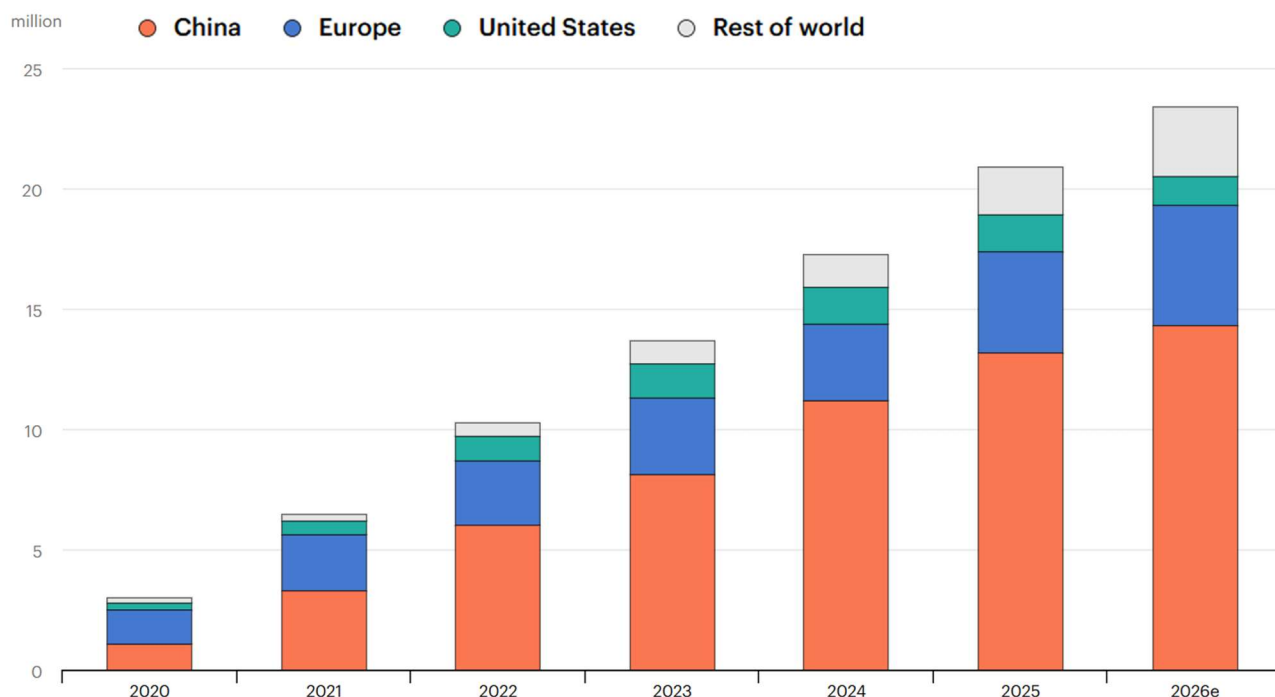


Рис. 1.1 Кількість проданих електричних автомобілів у світі в період із 2020 до 2026 року включно [12]

У ЄС у 2024 році було зареєстровано 1,45 млн нових акумуляторних легкових електромобілів. Їхня частка в загальній кількості нових реєстрацій становила 13,6 %, тоді як у 2014 році вона дорівнювала лише 0,3 %[13]. Ці дані підтверджують довгострокове збільшення частки BEV, хоча річні темпи продажів можуть змінюватися залежно від державних стимулів, вартості автомобілів і стану зарядної інфраструктури. Динаміку реєстрацій акумуляторних електромобілів у Європейському Союзі показано на рис. 1.2.

В Україні також спостерігається зростання кількості електромобілів. За перші вісім місяців 2025 року сервісними центрами Міністерства внутрішніх справ України було зареєстровано 47 307 електромобілів [14]. Особливістю українського ринку є значна частка імпортованих вживаних BEV, фактичні характеристики АКБ яких можуть відрізнятися від початкових паспортних значень [15], [16].

На рис. 1.3 наведено динаміку українського ринку електромобілів за походженням і станом ТЗ, а на рис. 1.4 динаміку реєстрацій упродовж 2024–2025 років.

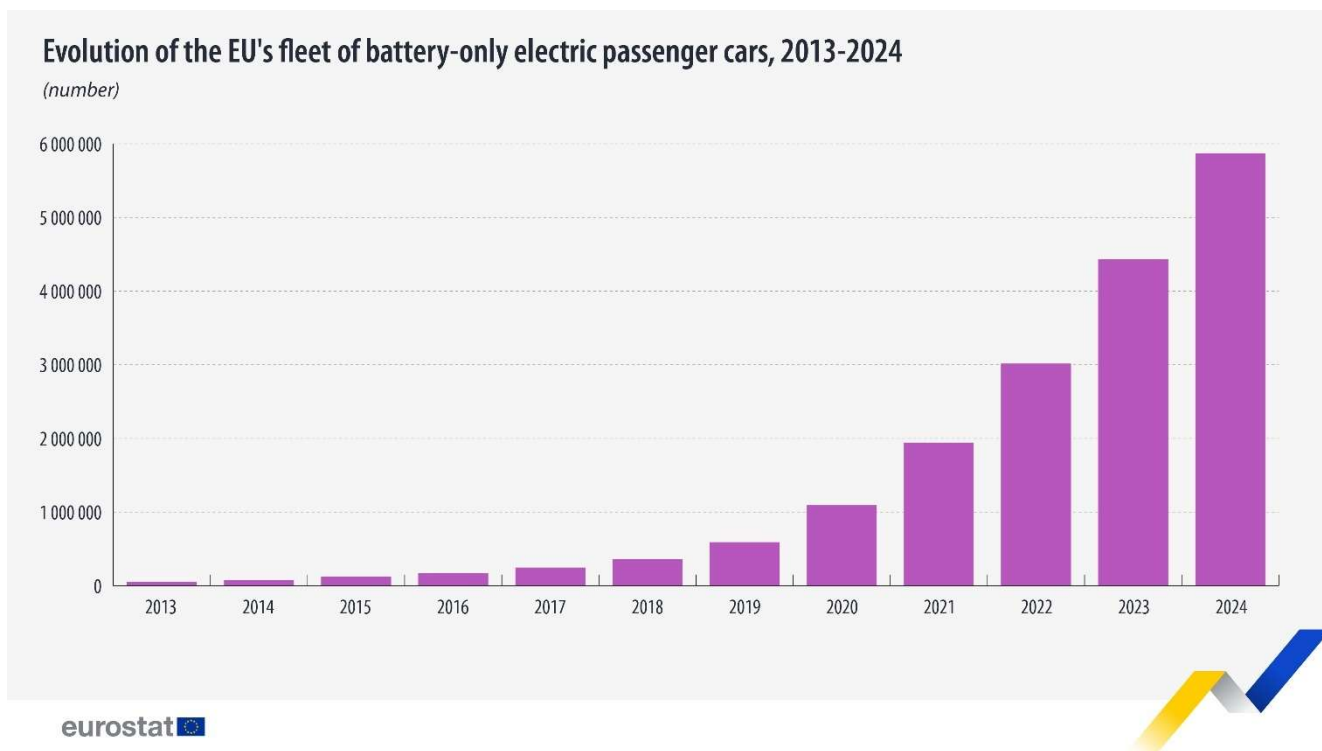


Рис. 1.2 Динаміка реєстрацій акумуляторних електромобілів у Європейському Союзі [13]

Наведені статистичні дані підтверджують збільшення кількості BEV та відповідне зростання практичного значення задач підвищення їх енергоефективності. Для користувача визначальними залишаються фактичні витрати енергії, доступний запас ходу та можливість його прогнозування для конкретних умов руху. Тому подальший аналіз доцільно спрямувати на фактори, що визначають енергоспоживання EV, та методи зменшення витрат енергії без конструктивної зміни транспортного засобу.

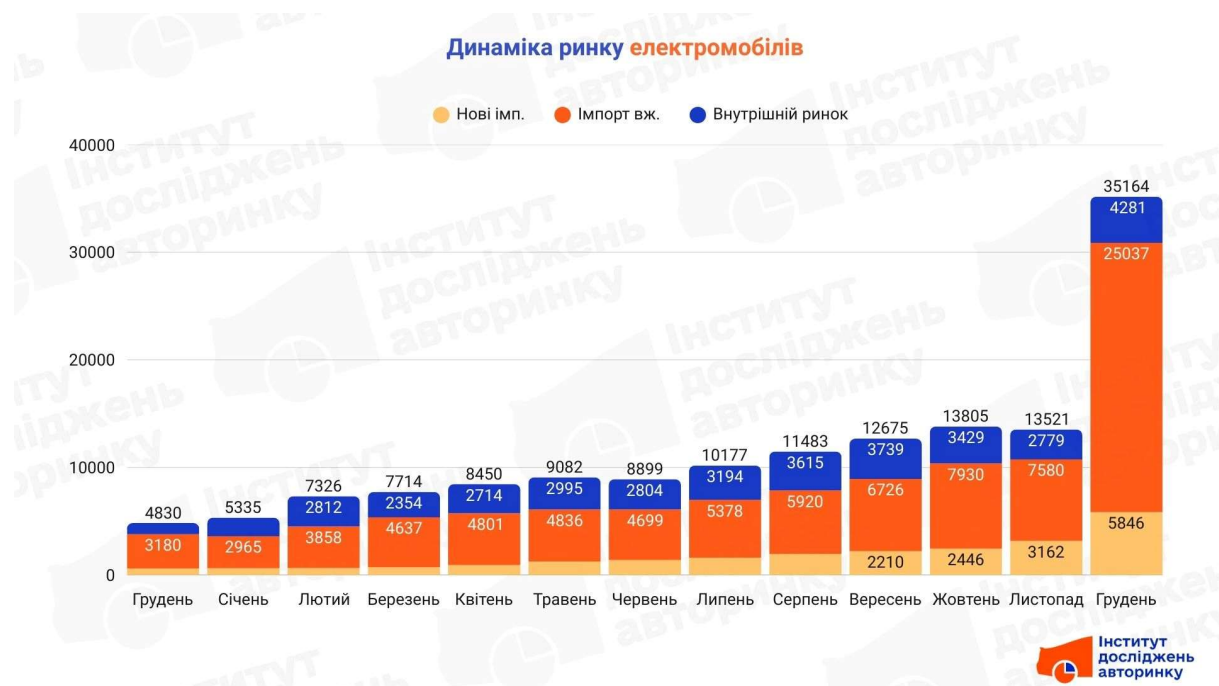


Рис. 1.3 Динаміка ринку електромобілів в Україні за 2024-2025 рік [15]

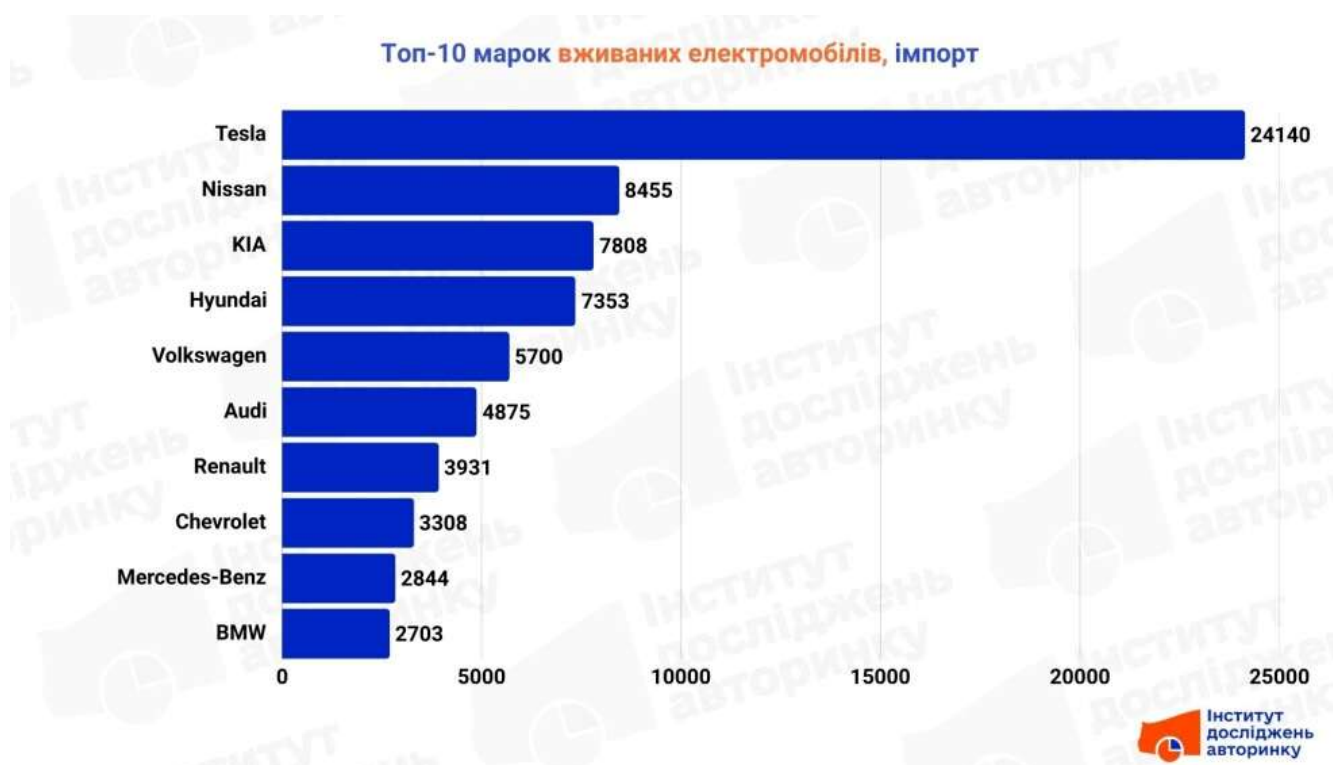


Рис. 1.4 Динаміка імпорту вживаних легкових електромобілів в Україну у 2025 році за фірмами виробниками [16]

Значна частка вживаних BEV у структурі українського автомобільного парку підвищує актуальність оцінювання фактичного стану їх АКБ. Одним з основних показників є стан технічного здоров'я батареї (State of Health, SoH), який характеризує ступінь збереження її ємності, потужності та інших експлуатаційних властивостей порівняно з початковим станом. Зниження SoH необхідно враховувати під час прогнозування запасу ходу, оцінювання доступної потужності та формування режимів керування АКБ [17], [18].

Деградація тягової АКБ впливає на експлуатаційні й енергетичні характеристики EV унаслідок таких процесів:

1. Зменшення доступної ємності АКБ, що безпосередньо скорочує запас ходу на одному заряді [17], [18].
2. Зростання внутрішнього опору, яке збільшує втрати енергії та обмежує максимальну потужність батареї у тяговому і рекуперативному режимах. Для літій-іонних акумуляторів встановлено стійкий зв'язок між зменшенням ємності та зростанням внутрішнього опору під час старіння [19].
3. Зменшення приймальної потужності АКБ під час рекуперативного гальмування. BMS обмежує зарядний струм за критеріями граничної напруги, SoC, температури та допустимої зарядної потужності. Після досягнення встановлених обмежень частина гальмівного моменту створюється фрикційною системою, а відповідна частина кінетичної енергії розсіюється у вигляді тепла [20], [21].

Обмеження рекуперативного струму за високого SoC, низької температури або підвищеного внутрішнього опору виконує також захисну функцію. Воно зменшує електричне і теплове навантаження на АКБ та запобігає прискоренню її деградації [6]. Водночас зниження допустимої зарядної потужності обмежує кількість енергії, яку можна повернути до батареї під час уповільнення, що особливо помітно у міських режимах із частими розгонами та гальмуваннями [21], [22].

Отже, деградація АКБ призводить до зменшення доступної ємності, зростання внутрішніх втрат та обмеження допустимих струмів заряду і розряду. Це впливає на запас ходу, тягову потужність, ефективність рекуперації та точність прогнозування залишкового пробігу EV [17], [19], [23].

На швидкість старіння літій-іонної АКБ впливають температура, середній рівень SoC, глибина розряду (Depth of Discharge, DoD), зарядний і розрядний струми, тривалість перебування поблизу граничних рівнів заряду та кількість циклів [17], [24], [25]. Під час завершальної стадії заряджання в діапазоні 80–100 % SoC втрати енергії можуть бути майже вдвічі більшими, ніж у середньому діапазоні SoC [26]. Це пов'язано зі зменшенням зарядного струму наприкінці процесу, збільшенням його тривалості та продовженням роботи допоміжних систем автомобіля і зарядного обладнання.

Для регулярної експлуатації поширеною рекомендацією є обмеження робочого діапазону приблизно до 20–80 % SoC [26], [28]. Такий режим зменшує глибину циклів і тривалість перебування АКБ поблизу граничної напруги. Водночас зазначений діапазон не є універсальною вимогою, оскільки допустимі режими залежать від хімічного складу батареї, температури, конструкції системи терморегулювання та алгоритмів BMS.

Швидке заряджання супроводжується підвищенням зарядного струму та теплового навантаження на АКБ. У дослідженні [28] порівнювали заряджання струмом 0,3C і 2C. Збільшення струму приблизно у 6,6 раза призвело до зростання втрат у дослідженій акумуляторній батареї приблизно у 7,4 раза, а сумарних втрат зарядної системи приблизно вдвічі. Ці результати характеризують конкретну розрахункову систему і не можуть безпосередньо поширюватися на всі сучасні BEV.

За низької температури високий зарядний струм збільшує ризик осадження металевого літію на аноді, а за підвищеної температури прискорюються побічні електрохімічні реакції [25]. Тому вплив швидкого заряджання на ресурс батареї визначається не лише потужністю зарядної станції, а й температурою АКБ, її SoC,

зарядною характеристикою та ефективністю системи терморегулювання. Сукупний вплив цих факторів зумовлює відмінність темпів деградації навіть для однотипних батарей, які працюють у різних кліматичних та експлуатаційних умовах [27], [28].

Окрім втрат в АКБ, на загальну енергоефективність EV впливають втрати в електродвигуні, інверторі, трансмісії, зарядному обладнанні та споживання допоміжних систем. Приклад розподілу енергії в електричному транспортному засобі наведено в таблиці 1.1 [29].

Таблиця 1.1 Розподіл витрат енергії в електричному транспортному засобі [29]

Витрати в електродвигуні на приведення EV в рух	E_t	49%
Втрати в батареї	$E_{Loss,Bat}$	14%
Додаткові системи EV	E_{Aux}	17%
Втрати в електричному двигуні	$E_{Loss,EM}$	10%
Решта витрат	$E_{Loss,TS},$ $E_{Loss,Inv},$ $E_{Loss,BC},$ $E_{Loss,RF}$	10%

Наведений розподіл не є універсальним для всіх BEV, оскільки співвідношення складових залежить від швидкісного циклу, конструкції силового тракту, температури, режимів роботи допоміжних систем і технічного стану АКБ. Водночас він показує, що запас ходу визначається не лише номінальною ємністю батареї, а й ефективністю перетворення та використання накопиченої енергії.

Додаткові втрати виникають під час заряджання від електричної мережі. За результатами випробувань серійних EV втрати в зарядних системах становили від 15 до 40 % залежно від моделі автомобіля, потужності та режиму [29]. Найбільші

відносні втрати характерні для режимів, у яких зарядний перетворювач працює зі значним недовантаженням. Тому між енергією, спожитою з мережі, та енергією, фактично накопиченою в АКБ, може виникати суттєва різниця.

Збільшення кількості EV підвищує вимоги до зарядної інфраструктури та пропускної здатності розподільних мереж. Станом на 1 липня 2025 року в Україні було зареєстровано 166 807 електромобілів [30]. На українському ринку представлені зарядні системи постійного струму високої потужності, зокрема обладнання EDS CHARGERS потужністю до 480 кВт [31] та рішення ТОКА потужністю до 300 кВт [32]. Наявність такого обладнання створює технічні передумови для розвитку високопотужних зарядних хабів, але їх підключення потребує оцінювання доступної приєднаної потужності, пропускної здатності кабельних ліній і теплового режиму трансформаторів [33].

Тривалість заряджання залежить від доступної ємності АКБ, початкового і кінцевого SoC, потужності зарядного обладнання та максимальної зарядної потужності автомобіля. Під час заряджання змінним струмом (Alternating Current, AC) через роз'єми Type 1 або Type 2 перетворення енергії виконується вбудованим зарядним пристроєм автомобіля. Для типових легкових BEV повне заряджання може тривати декілька годин.

Під час заряджання постійним струмом (Direct Current, DC) перетворення енергії здійснюється зовнішнім зарядним пристроєм, а напруга подається безпосередньо до високовольтної АКБ. Для систем Combined Charging System (CCS), CHAdeMO та фірмових швидкісних систем поповнення заряду в діапазоні 20–80 % SoC зазвичай триває десятки хвилин. Фактичний час визначається потужністю станції, максимальною потужністю, яку може прийняти автомобіль, температурою АКБ та формою зарядної характеристики [34].

З позицій електроенергетичної системи AC- і DC-заряджання формують різні профілі навантаження. Високопотужні DC-станції, зокрема системи швидкого заряджання високої потужності (High Power Charging, HPC), створюють значні локальні навантаження. Їх робота може спричиняти відхилення напруги,

перевантаження трансформаторів, збільшення втрат і прискорення теплового старіння ізоляції [35], [36], [37]. Домашнє АС-заряджання має меншу одиничну потужність, але за одночасного підключення значної кількості EV може створювати тривале навантаження на низьковольтні мережі [38].

Зменшити негативний вплив зарядного навантаження дає змогу кероване заряджання (smart charging), за якого час або потужність заряджання змінюються відповідно до поточного навантаження мережі, стану АКБ і заданого часу завершення зарядної сесії. Зміщення заряджання з пікових періодів знижує максимальне навантаження та сповільнює теплове старіння розподільних трансформаторів [37], [39]. Такий підхід є складовою концепції інтелектуальних електричних мереж (Smart Grid).

Для України додатковим системним чинником є нестабільність електропостачання внаслідок пошкодження енергетичної інфраструктури. Обмеження доступної потужності та перерви електропостачання впливають на працездатність зарядних станцій і можливість прогнозованого заряджання EV [40], [41], [42]. Воєнний стан також формує специфічні умови розвитку ринку електромобільності та зарядної інфраструктури [43].

Отже, в умовах України підвищення енергоефективності EV має прикладне значення для збільшення автономності пересування, скорочення частоти заряджання і зниження залежності користувача від доступності зарядної інфраструктури. Зменшення питомих витрат енергії під час руху також сприяє зниженню сукупного зарядного навантаження та підвищує ефективність використання наявної електромережевої інфраструктури.

1.2. Актуальні методи підвищення енергоефективності електромобільного транспорту

Сучасні дослідження показують, що підвищення енергоефективності EV досягається сукупністю заходів, які впливають на навантаження тягового електропривода, режими перетворення енергії в силовій електроніці та допоміжні

споживачі. Практичний ефект зазвичай оцінюють за зменшенням питомого споживання електроенергії ($\text{кВт}\cdot\text{год}/100 \text{ км}$), збільшенням запасу ходу або зростанням частки відновленої енергії при рекуперації.

Оптимізація швидкісного профілю. Еко-керування (eco-driving) та керування траєкторією швидкості зменшують інерційні втрати та частоту інтенсивних розгонів/гальмувань, що безпосередньо знижує пікові значення електричної потужності тягового електропривода. За польовими експериментами для міських маршрутів повідомляється зниження енергоспоживання EV до 30.4%. Узагальнення результатів для EV також вказує на ефект 11.7–18.4% за рахунок стилю керування та плавності режимів руху [44], [45]. Для підходів Vehicle-to-Infrastructure (V2I) та Connected and Automated Vehicles (CAV), зокрема при використанні інформації про сигнали світлофорів, показано потенціал економії до 20% електроенергії. Для електробусів наведено покращення енергоспоживання на 30–50% за рахунок узгодження руху зі світлофорними об'єктами та зупинками [46], [47].

Рекуперативне гальмування. З позицій електропривода рекуперація є керованим генераторним режимом тягового електродвигуна з обмеженнями по струму/напрузі та приймальній здатності АКБ, тому ефективність визначається алгоритмом розподілу гальмівних моментів між електричним і фрикційним гальмуванням. У роботі [48] показано, що частка відновлення гальмівної енергії може становити 27.39–43.43% залежно від режимів гальмування та стратегії керування. Для оптимізованих стратегій [49] на міських циклах наведено відновлення 294.45 кДж і частку рекуперації 48.54%. Для спеціальних важких умов (гібридні гірничі самоскиди) наводяться теоретичні межі до 65% відновлення за оптимальних параметрів процесу заряджання [50].

Тепловий менеджмент. Допоміжні споживачі та температурні умови можуть формувати значну частку енергобалансу EV. На основі аналізу реальних даних у [51] показано, що при зниженні температури нижче $+10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ споживання може зростати приблизно на $+2.4 \text{ кВт}\cdot\text{год}/100 \text{ км}$ на кожні $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ зниження температури, а

зимовий запас ходу може становити близько 64% від значення за сприятливих умов. Як приклад енергоефективного рішення для опалення наведено застосування теплових насосів: заміна РТС-нагріву на CO₂ теплові насоси для автобусів у зимових умовах забезпечує приріст запасу ходу 10.37–12.90% [52].

Зменшення сил опору руху. Зниження маси, аеродинамічного опору та опору коченню зменшує необхідний тяговий момент і, відповідно, електричну потужність, яку має забезпечити інвертор–електродвигун. Узагальнена оцінка показує, що 10% зменшення маси транспортного засобу (ТЗ) може забезпечувати 6–8% зниження енергоспоживання [53]. Також наведено, що збільшення маси на +100 кг може підвищувати енергоспоживання приблизно на 0.34 кВт·год/100 км [54]. Для групового руху ТЗ колоною продемонстровано зниження середнього коефіцієнта аеродинамічного опору до 23%, що відповідає енергозбереженню 2.5–10% залежно від умов і профілю швидкості [55]. Опір коченню є критичним у низькотемпературних режимах: при зниженні температури з 25 °С до 0 °С зафіксовано зростання енергоспоживання на 20.8%, що пояснено переважно збільшенням опору коченню. Показано, що до прогріву шин опір коченню може бути на 13.6% вищим, ніж після прогріву [55].

Оптимізація трансмісії та робочих режимів електропривода. Для EV переважають одноступеневі редуктори, однак застосування багатошвидкісних трансмісій або Continuous Variable Transmission (CVT) може зменшувати енергоспоживання в зонах високих швидкостей і навантажень. У [56] для 2–4 ступеневих коробок і CVT наведено зниження енергоспоживання на 5–12% залежно від умов руху. Для електровантажівок показано, що CVT може знижувати енергоспоживання до 10% із потенціалом оптимізації ємності батареї та параметрів електродвигуна [57]. Для багатомоторних схем електропривода у важких умовах експлуатації наведено можливість економії до 5% електроенергії при раціональному узгодженні режимів електродвигунів.

Підвищення ефективності силової електроніки. Перспективним напрямком є застосування SiC-приладів у тягових інверторах, що зменшує втрати

перетворення та покращує роботу привода у широкому діапазоні режимів. За результатами моделювання і порівняльної оцінки інверторів для EV, застосування SiC може забезпечувати ефект на рівні 3–5% за енергоспоживанням/запасом ходу залежно від умов руху та структури втрат [58].

Моделі на основі даних реальних поїздок (data-driven). Поряд із фізичними моделями поширюються підходи на базі телеметрії реальних поїздок (швидкість, прискорення, температура, трафік, допоміжні навантаження) для уточнення прогнозу енерговитрат і синтезу стратегій керування. Узагальнюючі праці з моделювання енергоспоживання EV описують спектр моделей від фізичних до ML-орієнтованих (machine learning) та їх придатність для оптимізаційних задач [59].

Узагальнення наведених результатів підтверджує, що енергоефективність EV визначається не лише паспортними характеристиками тягового електропривода та АКБ, а й умовами руху та середовища експлуатації. У цьому контексті практично значущим є врахування параметрів маршруту та режимів руху, оскільки саме вони формують профіль тягового моменту, потужності та можливостей рекуперативного гальмування, тобто безпосередньо впливають на роботу електропривода та загальний ККД силового тракту.

1.3. Порівняльний аналіз моделей прогнозування енергоспоживання електромобілів

Прогнозування енергоспоживання EV є необхідною складовою оцінювання запасу ходу, планування поїздки та вибору енергоефективного шляху. За результатами систематичного аналізу сучасних досліджень моделі прогнозування можна поділити на фізично орієнтовані, емпіричні, моделі на основі даних і гібридні [60], [61]. Кожна група відрізняється складом вихідних даних, можливістю фізичної інтерпретації результатів, точністю, обчислювальною складністю та здатністю до перенесення на інший ТЗ або маршрут.

Фізично орієнтовані моделі ґрунтуються на рівняннях руху ТЗ, балансі сил, механічної потужності та енергії. Вони враховують силу інерції, опір коченню,

аеродинамічний опір і складову сили тяжіння, яка залежить від кута нахилу дороги. Вихідними даними є маса ТЗ, коефіцієнт опору коченню, коефіцієнт аеродинамічного опору, площа фронтальної поверхні, швидкість, прискорення, топологічний профіль і ККД елементів силового тракту.

Основною перевагою фізично орієнтованих моделей є можливість установлення причинного зв'язку між окремим фактором і зміною витрат енергії. Такий підхід не потребує великого масиву даних попередніх поїздок і може застосовуватися для нового маршруту за наявності його швидкісного та топологічного профілів.

Недоліком фізичних моделей є залежність точності від коректності параметрів ТЗ і прийнятих спрощень. Використання сталого ККД, неврахування температури, вітру, допоміжних споживачів або зміни режимів роботи електропривода може спричиняти відхилення від фактичного енергоспоживання.

Емпіричні моделі встановлюють залежність між витратами енергії та визначеними факторами за результатами експериментальних досліджень. До цієї групи належать лінійні й нелінійні регресійні залежності, апроксимаційні характеристики та питомі коефіцієнти енергоспоживання.

Перевагами емпіричних моделей є відносна простота та невисока обчислювальна складність. За умови використання в межах діапазону, для якого виконано ідентифікацію, вони можуть забезпечувати прийнятну точність. Водночас зміна моделі ТЗ, стану АКБ, температури або дорожніх умов потребує повторного визначення коефіцієнтів. Тому можливість перенесення емпіричної моделі на інший ТЗ або маршрут є обмеженою.

Моделі на основі даних (data-driven models) формують залежність між вхідними факторами та енергоспоживанням без повного опису фізичних процесів. Для цього застосовують методи машинного навчання, зокрема множинну регресію, дерева рішень, випадковий ліс, метод опорних векторів, штучні нейронні мережі та ансамблеві алгоритми [60].

До вхідних даних можуть належати швидкість, прискорення, SoC, температура, дорожній ухил, трафік, режим роботи допоміжних систем і параметри стилю керування. Такі моделі дають змогу враховувати складні нелінійні залежності та взаємний вплив факторів, які важко повністю описати аналітичними рівняннями.

Основними обмеженнями моделей на основі даних є потреба в репрезентативній навчальній вибірці, залежність результату від її структури та зниження точності за умов, які не були представлені під час навчання. Крім того, для складних моделей машинного навчання часто ускладнено фізичне пояснення отриманого результату. Це обмежує їх застосування для дослідження впливу окремого фактора, зокрема топології маршруту.

Гібридні моделі поєднують фізичний розрахунок базового енергоспоживання з емпіричною або ML-корекцією неврахованих факторів. Фізична частина описує рух ТЗ і роботу силового тракту, а модель на основі даних коригує результат з урахуванням температури, стилю керування, допоміжних навантажень та інших змінних.

У дослідженні [62], виконаному на основі даних 72 реальних поїздок, середня відносна похибка фізичної моделі становила 37,9 %. Додавання статистичної корекції на основі алгоритму boosting зменшило її до 10,3 %. Це підтверджує потенційну перевагу гібридного підходу для персоналізованого прогнозування за наявності експлуатаційних даних.

У роботі [63] для гібридної моделі, інтегрованої до системи планування маршрутів, отримано абсолютну похибку прогнозування енергії 0,6 кВт·год і похибку прогнозування SoC 2,66 %. Вибір енергоефективного шляху забезпечив зниження витрат енергії до 25 % порівняно з маршрутом, оптимізованим лише за часом або відстанню. Водночас наведені результати характеризують конкретні набори даних, моделі ТЗ і маршрути, тому не можуть розглядатися як універсальна точність для всіх умов.

Під час вибору моделі необхідно враховувати потребу у вихідних даних, фізичну інтерпретованість, можливість перенесення на інший ТЗ, здатність працювати для нового маршруту та обчислювальну складність. Порівняльну характеристику основних підходів наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 Порівняльна характеристика моделей прогнозування енергоспоживання EV

Критерій	Фізично орієнтована	Емпірична	На основі даних	Гібридна
Принцип побудови	Баланс сил і енергії	Апроксимація вимірювань	Навчання за масивом даних	Фізична модель із корекцією
Потреба в експериментальних даних	Низька	Середня	Висока	Середня
Фізична інтерпретованість	Висока	Середня	Переважно низька	Висока
Застосування до нового маршруту	Без попередніх поїздок	У межах калібрування	Залежить від навчальної вибірки	Можливе після параметризації

У межах цієї роботи обрано фізично орієнтовану модель. Такий вибір визначається відповідністю поставленій науковій задачі. Метою дослідження є встановлення та кількісне оцінювання впливу топології маршруту на витрати енергії, а також порівняння альтернативних шляхів до початку поїздки.

Фізично орієнтований підхід забезпечує такі можливості:

1. безпосереднє врахування кута нахилу та зміни висоти маршруту;
2. роздільне оцінювання складових сил опору руху;

3. використання параметрів, доступних до початку поїздки;
4. перенесення моделі на інший ТЗ шляхом зміни його технічних параметрів;
5. експериментальну перевірку окремих складових моделі;
6. порівняння альтернативних шляхів без попереднього накопичення телеметричних даних для кожного з них.

Отже, фізично орієнтована модель є доцільною як базовий інструмент дослідження впливу топології маршруту. Для подальшого підвищення точності вона може бути доповнена емпіричною корекцією або моделлю на основі даних, однак така модифікація не повинна усувати фізичну інтерпретованість результату.

1.4. Планування маршрутів та методи оцінки максимального пробігу легкових електромобілів

З огляду на структуру сучасного ринку електромобільності, найбільшу частку продажів і парку становлять легкові акумуляторні електромобілі (BEV), тоді як електробуси та електровантажівки мають істотно менші частки проникнення і повільніші темпи поширення [64], [65]. Тому саме легкові BEV доцільно розглядати як репрезентативний об'єкт для аналізу енергоспоживання, оцінювання запасу ходу та задач планування поїздок у реальних дорожніх умовах.

За даними довідкових баз характеристик електротранспорту [66] (для вибірок 2020–2024 рр.) середній заявлений виробником запас ходу сучасних BEV перебуває на рівні близько 380–390 км, однак це значення є чутливим до складу вибірки (комплектації Standard-range/Long-range, клас автомобіля, ціновий сегмент), що зумовлює доцільність аналізу найбільш поширених моделей окремо. Для вибірки моделей, представлених на українському ринку (таблиця 1.4), за даними [67] середнє значення заявленого пробігу для стандартних комплектацій становить 333,4 км. Для порівняння, типові ТЗ з двигуном внутрішнього згоряння мають запас ходу орієнтовно 600–800 км на одній заправці, а за наявності газобалонного обладнання (ГБО) сумарний пробіг може сягати до 1500 км залежно від умов руху.

Разом із тим узагальнені дослідження еволюції технічних характеристик BEV на великій вибірці моделей (2011–2024) підтверджують довгостроковий тренд зростання заявленого запасу ходу та покращення ключових параметрів силової установки і накопичувача енергії [68]. Розподіл BEV за заявленим пробігом у динаміці (2011–2022) наведено на рис. 1.5, де видно зменшення частки моделей із запасом ходу менше 234 км та зростання частки моделей у діапазонах 235–384 км і 385–535 км. У цей же період спостерігається активне розширення сегмента комплектацій Long-range (понад 535 км), що відображає ринковий запит на збільшення автономності BEV [68].

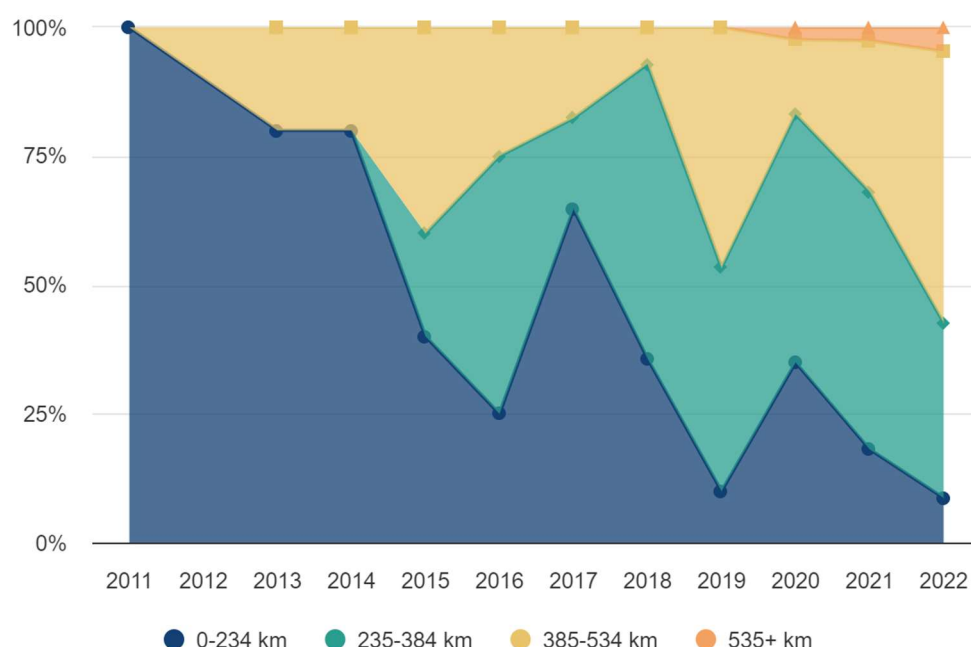


Рис. 1.5 Розповсюдження BEV електромобілів відносно заявленого пробігу за період з 2011 по 2022 роки [34]

Попри зростання номінального запасу ходу, реальна дальність пробігу в експлуатації часто є нижчою за заявлену за сертифікаційними процедурами. Для BEV показано, що розрив між лабораторними та реальними значеннями є суттєвим і має тенденцію до зростання: у 2020 році середній розрив оцінювався на рівні 13%, тоді як у 2024 році близько 22% [69]. Незалежні програми real-world testing також

демонструють відхилення реального пробігу від заявленого в діапазоні 5–23% залежно від моделі та умов руху (таблиця 1.5) [70]. Отже, задача коректного прогнозування дальності пробігу та енергоспоживання залишається актуальною навіть за умов зростання ємності АКБ і технологічного прогресу BEV.

Таблиця 1.4 Середня величина пробігу найбільш популярних електромобілів України 2024

№	Назва моделі	Заявлений пробіг на момент випуску, км	Стандарт тестування	Час зарядки від 0 до 100% (AC)	Час зарядки від 0 до 80% (DC швидка зарядка)
1	Nissan Leaf 2014	135	EPA	3.6 кВт, 8 – 12 год.	CHAdemo, 30 – 40 хв.
2	Tesla Model 3 (Standard Range)	354	EPA	11 кВт, 8 – 10 год.	Supercharger, 30 – 40 хв.
3	Volkswagen e-Golf	133	EPA	7.2 кВт, 5 – 6 год.	CCS, 40 – 50 хвилин
4	Tesla Model S (60)	334	EPA	11 кВт, 8 – 10 год.	Supercharger, 30 – 40 хв.
5	Tesla Model Y (Performance)	488	EPA	11 кВт, 8 – 10 год.	Supercharger, 30 – 40 хв.
6	Volkswagen ID.4	402	EPA	11 кВт, 8 – 10 год.	CSS, 30 – 40 хв.
7	Renault Zoe	395	WLTP	7.4 кВт, 8 – 9 год.	CSS, 30 – 40 хв.

8	Chevrolet Bolt (2021)	416	EPA	11 кВт, 10 год.	CSS, 30 – 40 хв.
9	Hundai Kona 39 kWh (2022)	305	WLTP	7.2 кВт, 6 – 8 год.	CSS, 30 – 40 хв.
10	Audi E-Tron	372	WLTP	11 кВт, 8 – 9 год.	CSS, 30 – 40 хв.
Середній діапазон		333,4	-	8 – 12 год.	30 – 50 хв.

Максимальний пробіг, споживання енергії та кількість викидів CO_2 (згідно до стандарту Euro 6) визначаються на основі стандартизованих циклів випробувань (EPA, WLTP/WLTC, NEDC, JC08, FTP-75 тощо), які реалізуються на динамометричних стендах у контрольованих лабораторних умовах [71], [72]. Основою процедури є відтворення заданої тахограми швидкості з регламентованими фазами розгону, усталеного руху та гальмування, що забезпечує відтворюваність вимірювань і зіставність результатів між транспортними засобами.

Серед зазначених процедур Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP) є однією з найбільш актуальних для оцінювання енергоспоживання та запасу ходу легкових BEV, оскільки впроваджена як сучасний стандарт типового затвердження в ЄС. Перехід від New European Driving Cycle (NEDC) до WLTP розпочато з 01.09.2017 для нових типів транспортних засобів і завершено з 01.09.2018 для всіх нових реєстрацій [72]. Енергоефективність при цьому виражається у кВт·год на 100 км або Вт/км. Тахограма руху циклу WLTC Class 3 (як складова WLTP) наведена на рис. 1.6 [73], а схема тахограми NEDC наведена на рис. 1.7.

Таблиця 1.5 Результати перших п'яти електромобілів, які пройшли програму випробувань у реальних умовах від Австралійської автомобільної компанії [70]

Модель	Варіація запасу ходу	Заявлений (лабораторний) діапазон, км	Тест в умовах реального водіння, км
Tesla Model 3	–14%	513	441
BYD ATTO3	–23%	480	369
Tesla Model Y	–8%	533	490
Kia EV6	–8%	528	484
Smart #3	–5%	455	432

До ключових причин переходу від NEDC до WLTP належать [74]:

1. недостатня репрезентативність NEDC щодо реальних режимів руху;
2. вузька градація швидкісних режимів та спрощені динамічні характеристики;
3. невідповідність сучасним умовам експлуатації й технічним параметрам автомобілів.

Основні відмінності циклів NEDC та WLTP наведено у таблиці 1.6. Процедура WLTP має переваги у частині більшої динамічності та ширшого діапазону режимів руху, що робить її ближчою до середньостатистичних умов експлуатації у порівнянні з NEDC [75]. Кількісно показано, що перехід на WLTP супроводжується більш енергомісткими режимами випробування: WLTP може демонструвати до 21% вищі значення CO_2 порівняно з NEDC та до 26% вищі енергетичні потреби транспортного засобу залежно від конфігурації й умов порівняння [76]. Це робить WLTP більш придатним для оцінювання енергоспоживання BEV як базового сценарію порівняння.

Поряд із глобальними процедурами існують приклади створення локальних циклів тестування для підвищення відповідності регіональним умовам руху. Зокрема, у роботі [77] виконано порівняння циклів NEDC та WLTC з розробленим

для Китаю циклом CLTC-P, де показано відмінності у результатах оцінювання енерговитрат залежно від профілю швидкості. Аналогічні підходи реалізуються як на основі теоретичного аналізу, так і з використанням експериментальних даних реального руху з подальшою побудовою репрезентативних циклів [78], [79]. Разом із тим, для задач міжмодельного порівняння та формування універсальної точки відліку доцільним є використання стандартизованої процедури, яка забезпечує зіставність результатів.

Хоча WLTP забезпечує уніфіковану базу порівняння, лабораторні цикли не покривають повністю варіативність реальних умов експлуатації. До факторів, які обмежено представлені або відсутні у стандартизованому тесті, належать: профіль ухилів маршруту, змінний трафік і зупинки з різною тривалістю, вплив вітру та дорожнього покриття, температура навколишнього середовища, робота допоміжних систем Heating, ventilation, and air conditioning (HVAC), а також індивідуальний стиль керування [69], [71]. Окремо показано, що врахування дорожнього ухилу суттєво підвищує точність оцінювання енергоспоживання: включення градієнта маршруту підвищує точність прогнозу приблизно на 5–8%, що підтверджує значущість топографічного чинника в задачах енергобалансу BEV [80].

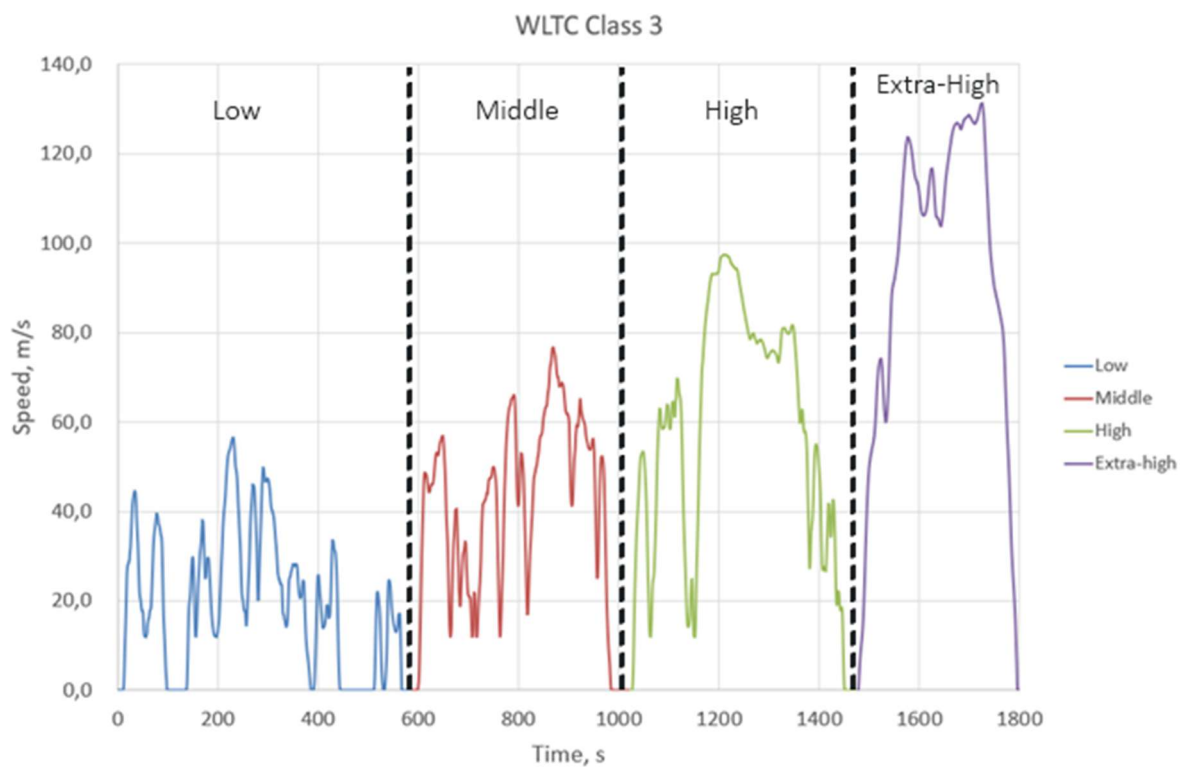


Рис. 1.6 Тахограма руху циклу WLTC Class 3 [73] процедури WLTP

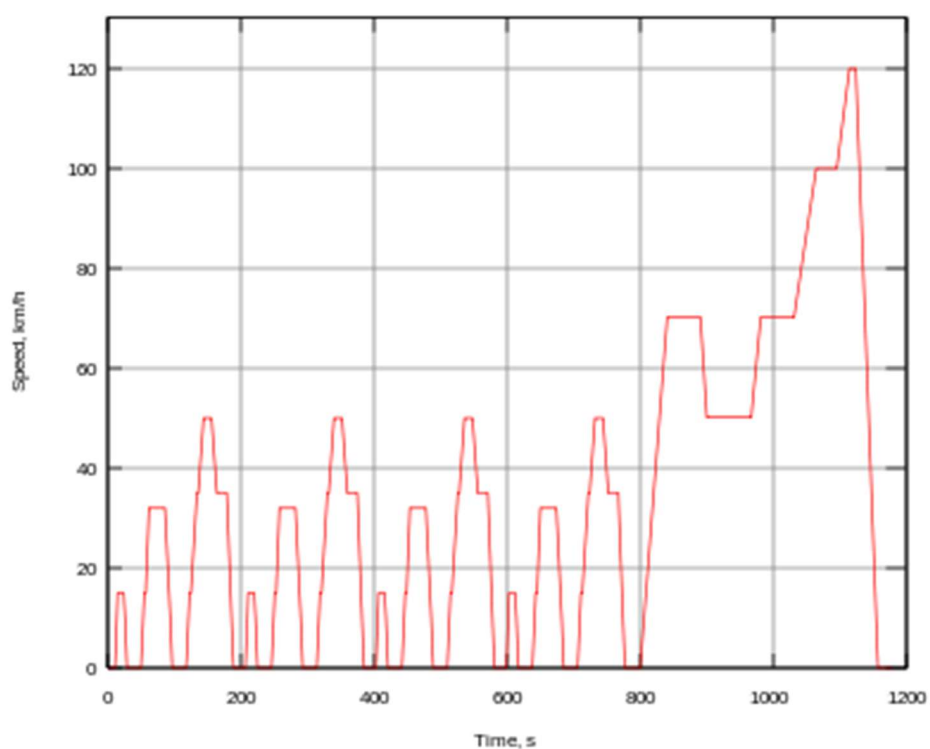


Рис. 1.7 Тахограма руху за NEDC протоколом [81]

Таблиця 1.6 Характеристики циклів NEDC та WLTP

Параметр	NEDC	WLTP
Кількість циклів випробування	Один цикл випробувань	Динамічний цикл випробувань
Тривалість циклу	20 хвилин	30 хвилин
Відстань	11 км	23,25 км
Фази водіння	2 фази, 66% містом і 34% поза містом	4 більш динамічні фази, 52% місто і 48% поза містом
Середня швидкість	34 км/год	46,5 км/год
Максимальна швидкість	120 км/год	131 км/год
Врахування додаткових факторів	Не враховується вплив на викиди CO^2 та ефективність пального	Враховується ряд додаткових факторів, що змінюються в залежності від типу досліджуваного автомобіля
Точки перемикання передач	Транспортні засоби мають фіксовані точки перемикання передач	Різні точки перемикання передач для кожного автомобіля
Тестові температури	Вимірювання при 20-30°C	Вимірювання при 23°C, значення CO^2 отримуються для температури до 14°C

З практичної точки зору користувачеві необхідно планувати поїздку між двома точками з урахуванням часу, відстані та ризику розрядження батареї. У таких задачах широко застосовуються картографічні сервіси (наприклад, Google Maps), які переважно оптимізують мінімальний час або мінімальну дистанцію, використовуючи дані про трафік і класи доріг. Однак для BEV така постановка є недостатньою, оскільки енергоспоживання залежить від енергетичних характеристик профілю руху, а також від можливості рекуперативного гальмування та специфіки витрат енергії в різних режимах руху (місто, позаміський рух, шосе). Сучасні дослідження з енергоорієнтованого планування маршрутів прямо вказують, що алгоритми маршрутизації, орієнтовані лише на час або відстань, можуть бути неадекватними для BEV і потребують переходу до оптимізації за енергетичними критеріями [82], [83]. Також підкреслюється, що топологія маршруту має суттєвий вплив на енерговитрати та режими роботи батареї, а оптимальний маршрут може відрізнятися залежно від вибраної цільової функції (час, енергія або компроміс між ними) [84].

Отже, для коректного прогнозування енергоспоживання та запасу ходу легкових BEV у задачах планування маршрутів необхідно враховувати сукупність внутрішніх і зовнішніх факторів експлуатації. Стандартизовані цикли процедури WLTP доцільно розглядати як уніфіковану базу для порівняння, яка потребує уточнення при переході до реальних маршрутів, зокрема через урахування топологічного профілю та пов'язаних із ним складових енергетичного балансу.

1.5. Висновки за першим розділом

1. Світовий ринок EV демонструє стійке зростання, однак поширення BEV стримується обмеженим запасом ходу, тривалістю заряджання, деградацією АКБ та залежністю від зарядної інфраструктури. Для України додатковим чинником є значна частка вживаних електромобілів із можливим зниженням SoH.

2. Встановлено, що фактичне енергоспоживання EV визначається не лише ємністю АКБ, а й втратами в тяговому ЕП, режимами заряджання, роботою допоміжних систем, температурою та технічним станом батареї.

3. Узагальнено актуальні методи підвищення енергоефективності EV: оптимізацію швидкісного профілю, есо-driving, рекуперативне гальмування, тепловий менеджмент, зменшення сил опору руху, оптимізацію трансмісії, режимів роботи ЕП і силової електроніки. Їх ефективність залежить від умов руху та експлуатації.

4. Моделі прогнозування енергоспоживання поділено на фізично орієнтовані, емпіричні, моделі на основі даних і гібридні. Для подальшого дослідження обрано фізично орієнтовану модель, оскільки вона забезпечує безпосереднє врахування параметрів ТЗ і топологічного профілю маршруту, не потребує попереднього накопичення телеметричних даних та зберігає фізичну інтерпретованість результатів.

5. Показано, що стандартизовані процедури EPA, NEDC і WLTP/WLTC забезпечують зіставність результатів, але не відтворюють повністю реальні умови експлуатації. Тому прогнозування запасу ходу потребує врахування температури, трафіку, стилю керування, допоміжних навантажень і параметрів маршруту.

6. Обґрунтовано, що мінімальні час або довжина маршруту не гарантують мінімальних витрат енергії. Топологічний профіль визначає додаткову роботу під час руху вгору та потенціал рекуперації під час руху вниз, що формує підґрунтя для подальшої розробки методу вибору енергоефективного шляху.

РОЗДІЛ 2. ФАКТОРИ ВПЛИВАЮЧІ НА ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ПІД ЧАС РУХУ

У розділі досліджено вплив факторів, що визначають витрати енергії електромобіля під час руху в реальних умовах експлуатації. Виокремлено найбільш вагомі фактори, які доцільно враховувати під час побудови математичної моделі енергоспоживання. Побудовано математичну модель розрахунку питомої механічної енергії руху електромобіля під час подолання маршруту. На основі запропонованої моделі виконано аналіз впливу топологічного профілю маршруту з урахуванням рекуперації енергії під час руху альтернативними шляхами між однаковими початковою та кінцевою точками. Додатково проведено оцінку впливу вибору джерела топологічних даних та частоти їх дискретизації на результати розрахунку витрат енергії під час руху, що є важливим для підвищення точності прогнозування та зниження похибок енергетичної оцінки маршруту.

2.1. Вплив складу та будова електроприводу сучасних електричних транспортних засобів на витрати енергії

На сьогодні електричні транспортні засоби застосовуються практично в усіх основних сегментах перевезень: легковому, громадському, малогабаритному індивідуальному та вантажному. У вантажному сегменті представлені електричні вантажівки Mercedes eActros, Renault D Z.E., Volvo FL Electric, BYD 8R, Tesla Semi, електричні фургони Ford e-Transit Custom, Renault Master E-Tech, Citroen e-Berlingo, а також вантажопасажирські модифікації Renault Master E-Tech, Ford E-Transit, Mercedes eSprinter. Така диверсифікація пов'язана з розвитком акумуляторних систем, силової електроніки, тягових електродвигунів та посиленням вимог до енергоефективності транспорту.

Основою сучасного EV є платформа електромобіля (Electric Vehicle Platform) – конструктивно-функціональна база, на якій інтегруються АКБ,

тяговий електропривод, силова електроніка, система керування та допоміжні модулі. Архітектура платформи визначає розміщення основних компонентів, масо-габаритні параметри, можливість масштабування, теплові режими та втрати в силовому тракті.

Залежно від підходу до проєктування, платформи EV умовно поділяють на такі типи:

1. Адаптовані платформи. Електропривод інтегрується в конструкцію, похідну від моделі з ДВЗ. Такий підхід спрощує перехід виробника до електрифікації, але обмежує оптимальність розміщення АКБ, силової електроніки та тягових модулів. Прикладами є Hyundai Kona Electric, Mini Cooper SE, Mercedes-Benz EQC.

2. Спеціалізовані платформи. Розробляються безпосередньо під BEV, що дає змогу раціональніше розмістити АКБ, знизити масу допоміжних вузлів, спростити компоновку електропривода та забезпечити різні комплектації за запасом ходу і типом привода. Прикладами є Tesla Model S, Volkswagen ID.4, Ford Mustang Mach-E.

3. Модульні платформи. Передбачають масштабування колісної бази, зміну кількості батарейних модулів і варіативність конфігурацій привода, що підвищує ефективність проєктування та виробництва лінійки моделей [86]. Прикладом є General Motors Ultium Platform, на основі якої створено Chevrolet Silverado EV та Honda Prologue.

4. Платформи типу “Skateboard”. Характеризуються плоскою несучою основою з інтегрованим акумуляторним блоком та вузлами тягового електропривода. Така компоновка підвищує гнучкість формування кузовних виконань і спрощує уніфікацію. Прикладами є Rivian R1T EV, Lucid Air, Canoo Lifestyle Vehicle.

Таким чином, тип платформи є внутрішнім фактором, що впливає на енергоефективність BEV, оскільки визначає масу, компоновку АКБ, розміщення електричних машин, довжину силових з’єднань, теплові режими та загальний

шлях перетворення енергії від батареї до коліс. У межах конкретної моделі ці параметри є переважно заданими і повинні враховуватися як вихідні дані під час моделювання витрат енергії.

Порівняно з класичною силовою частиною ТЗ з ДВЗ (рис. 2.1), електропривод BEV має меншу кількість механічних передавальних ланок та вищу частку електронного керування. Типова силова частина ТЗ з ДВЗ включає двигун внутрішнього згоряння, механізм зчеплення, коробку передач, диференціал та карданний або приводні вали, через які крутний момент передається на ведучу вісь [85].

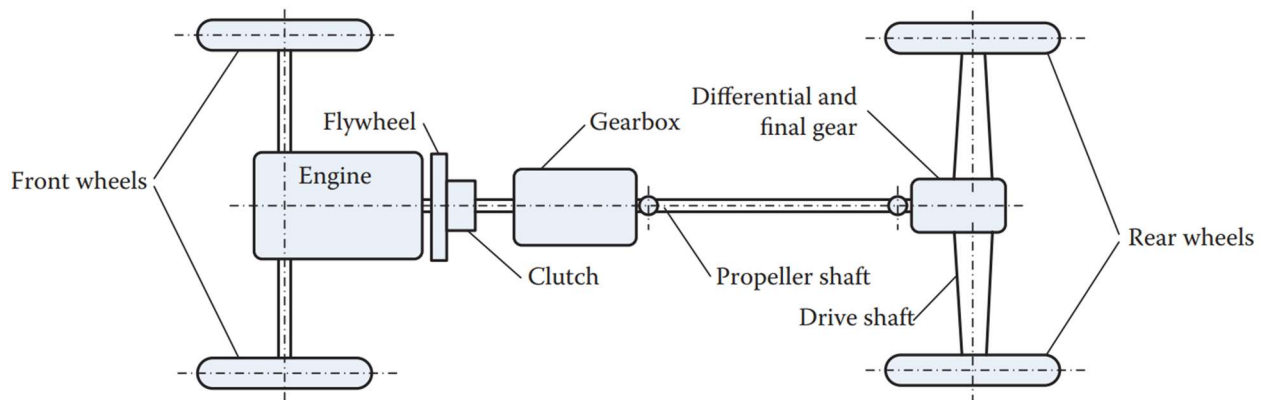


Рис. 2.1 Класична силова частина ТЗ з ДВЗ – задній привод [85]

Основними компонентами силової частини BEV (рис. 2.2) є АКБ, силова електроніка (DC/DC перетворювачі, DC/AC інвертор), електронний блок керування, BMS та тяговий електродвигун. Команди з органів керування (педалі акселератора/гальма) і сигнали зворотного зв'язку від датчиків струму, напруги, швидкості та положення ротора формують керувальні впливи на тяговий електропривод. Саме через ці сигнали реалізуються режими розгону, усталеного руху, обмеження потужності та рекуперативного гальмування, які безпосередньо визначають електричні втрати, ККД силового тракту та витрати енергії під час руху.

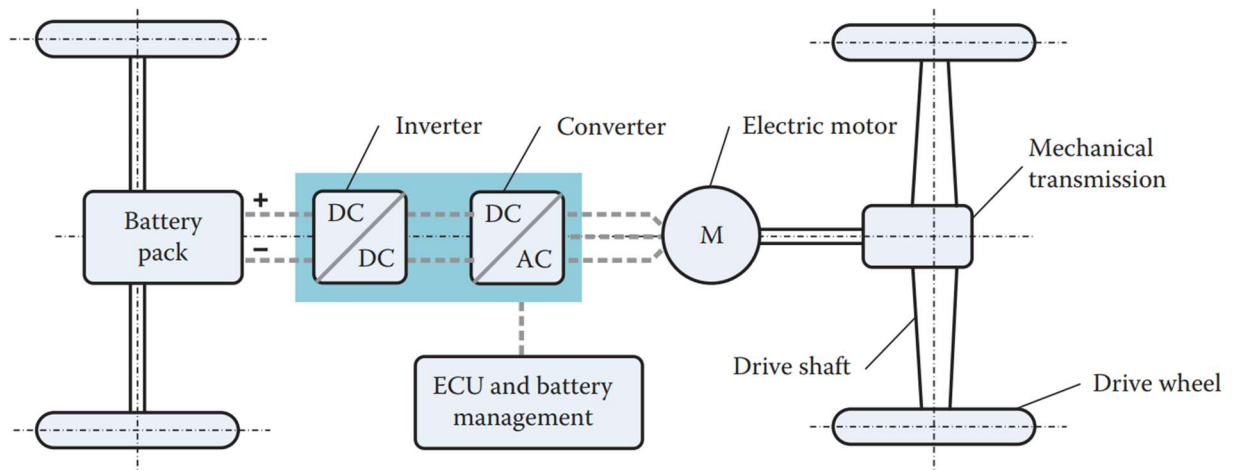


Рис. 2.2 Класична силова частина EV – задній привод [85]

У процесі руху електрична енергія, накопичена в АКБ, послідовно перетворюється в силових перетворювачах, тяговому електродвигуні та механічній передачі, після чого реалізується у вигляді тягового зусилля на колесах. Кожна з цих ланок характеризується власними втратами, тому енергія, спожита з АКБ, є більшою за корисну механічну роботу, необхідну для подолання сил опору руху. У режимі рекуперативного гальмування напрям перетворення енергії змінюється, однак ефективність повернення енергії також обмежується ККД електричної машини, інвертора, прийнятною здатністю АКБ та алгоритмами системи керування.

З позицій інженерного моделювання результуючий ККД силового тракту доцільно розглядати як добуток часткових ККД основних елементів. До них належать ККД АКБ у режимах заряджання/розряджання, ККД тягового інвертора, ККД електричної машини та ККД механічної передачі. Такий підхід дозволяє пов'язати механічну роботу на колесах із витратами електричної енергії та забезпечує зв'язок між розрахунком сил опору руху і режимами роботи електропривода.

За даними сучасних досліджень, ефективність вбудованих зарядних пристроїв EV істотно залежить від моделі автомобіля та струму заряджання. Для серійних onboard chargers у роботі [86] наведено прогнозований діапазон AC/DC

ефективності 88–95%. Для тягових електродвигунів типу Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) ККД у номінальних режимах може досягати близько 95%, однак у реальних циклах руху він змінюється відповідно до карти ефективності [87], [88]. Для тягових інверторів застосування SiC-приладів дозволяє зменшити втрати перетворення порівняно з IGBT-рішеннями та в окремих сценаріях моделювання підвищити пробіг EV приблизно на 3–5% [89]. Механічна передача також має втрати, що залежать від режиму роботи. Зокрема, експериментальні дослідження редукторів для електроприводів показують, що їх ефективність істотно змінюється залежно від швидкості, моменту та області робочого циклу [90].

У подальших розрахунках механічна робота, необхідна для руху транспортного засобу, розглядається як базова фізична величина, що визначається силами опору руху та профілем маршруту. Перехід до витрат електричної енергії виконується з урахуванням ККД силового тракту та обмежень рекуперативного гальмування. Це дозволяє врахувати вплив топології маршруту не лише на механічне навантаження, але й на режим роботи тягового електропривода.

2.2. Конфігурації силової частини BEV та вплив компоновки на втрати.

Окрім класичної схеми з редуктором і диференціалом, сучасні BEV можуть мати альтернативні конфігурації силової частини (рис. 2.3), зокрема з частковою або повною відмовою від традиційних механічних вузлів. Узагальнені варіанти побудови силової частини EV наведені в роботах [85], [91].

У схемі з постійною передачею без зчеплення (рис. 2.3, п. (b)) зменшується кількість механічних елементів порівняно з ТЗ з ДВЗ. Це дає змогу знизити втрати у зчепленні та спростити конструкцію, однак вимагає від тягового електродвигуна здатності працювати у широкому діапазоні швидкостей і моментів. До подібних за принципом побудови серійних рішень можна віднести BMW i3, Renault Zoe, Fiat 500e, Mini Cooper SE, Honda e.

Поширеним для серійних BEV є рішення, у якому тяговий електродвигун, фіксована передача та диференціал інтегровані в єдиний приводний модуль (рис. 2.3, п. (с)). Така компоновка зменшує довжину механічного тракту, спрощує конструкцію трансмісії та забезпечує можливість різних швидкостей обертання коліс під час проходження повороту. Подібна структура використовується в Tesla Model 3, Nissan Leaf, Hyundai Kona Electric, Volkswagen ID.4, Chevrolet Bolt EV.

Подальше зменшення кількості механічних вузлів можливе у схемах із двома електродвигунами, які незалежно приводять колеса однієї осі (рис. 2.3, п. (d)). У такому випадку класичний диференціал може бути замінений електронним розподілом моменту між колесами. Конструкція може бути додатково спрощена через інтеграцію фіксованої передачі безпосередньо у ведучі колеса (рис. 2.3, п. (e)). Найбільш радикальним варіантом є застосування мотор-колів, у яких електрична машина встановлюється безпосередньо в колесі (рис. 2.3, п. (f)).

Зменшення кількості механічних компонентів потенційно забезпечує зниження механічних втрат, зменшення маси та підвищення загального ККД силової частини. Разом із тим воно підвищує вимоги до тягового електродвигуна та системи керування. Електропривод повинен забезпечувати широкий діапазон швидкостей, роботу в режимі ослаблення поля, точне керування моментом та ефективну рекуперацію [92], [93]. Для розподілених приводів і схем з незалежними електродвигунами ці вимоги є особливо важливими, оскільки енергоспоживання визначається не лише сумарним тяговим зусиллям, а й розподілом моменту між окремими електричними машинами.

У пункті 2.1 було показано, що загальні втрати BEV формуються втратами в АКБ, інверторі, електродвигуні та механічній передачі. Для аналізу компоновки важливим є інший аспект: тип привода визначає, у яких робочих точках працює кожен електродвигун та які додаткові втрати виникають у неактивних або частково навантажених ланках. В одномоторних схемах FWD

або RWD кількість приводних модулів є меншою, тому зменшуються маса, втрати холостого ходу та кількість механічних з'єднань.

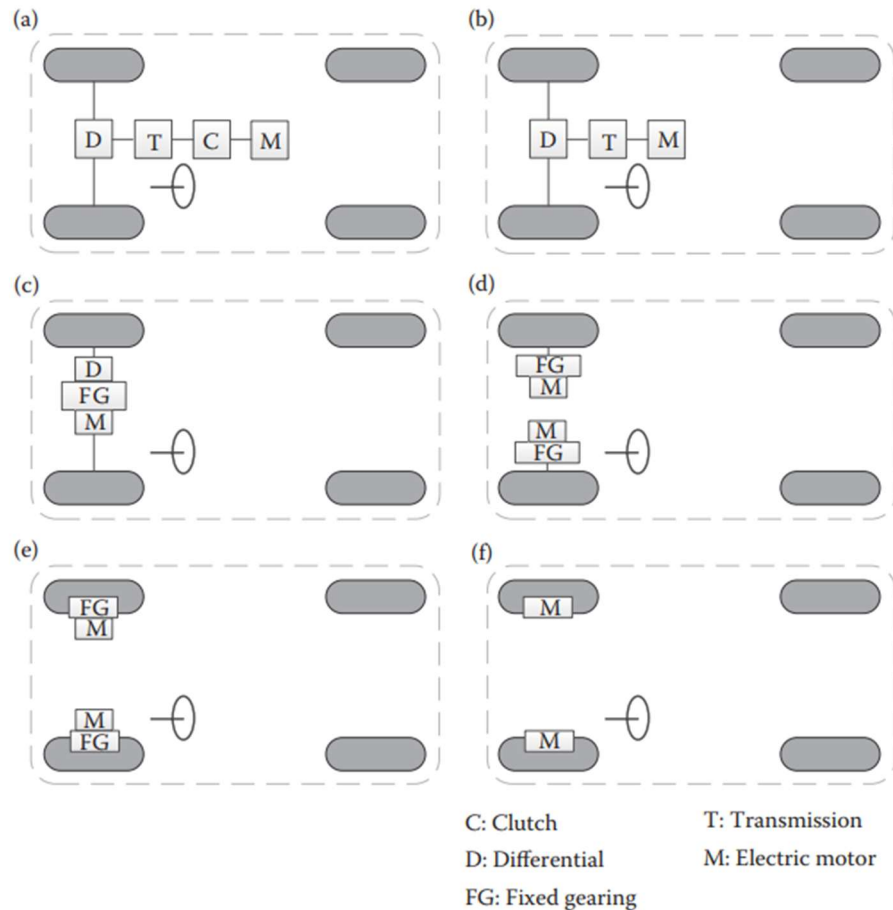


Рис. 2.3 Конфігурації силової частини BEV [85], [91], де: (а) – конфігурація з трансмісією та зчепленням, (b) – конфігурація з постійною передачею без зчеплення, (c) – постійна передача та диференціал, інтегровані у приводний модуль, (d) – окремі електричні двигуни з фіксованою передачею на ведучі колеса, (e) – прямий привод з окремими електричними двигунами та фіксованою передачею, (f) – привод на базі мотор-коліс

Однак один електродвигун не завжди працює в зоні найвищого ККД, особливо при значній зміні швидкості, навантаження та дорожнього профілю. У багатомоторних схемах з'являється можливість розподілу моменту між осями або колесами так, щоб електродвигуни працювали у більш енергоефективних

областях карти ККД. Водночас такі схеми мають додаткову масу, втрати в неактивних приводних модулях і потребують складніших алгоритмів керування [92], [93], [94].

Для незалежного привода передньої та задньої осей важливими є втрати холостого ходу електричних машин, які можуть зростати у високошвидкісних режимах, зокрема в області ослаблення поля. У роботі [94] запропоновано адаптивну схему з можливістю відключення переднього або заднього електроприводного модуля залежно від режиму руху. Для циклу WLTC показано зменшення енергоспоживання з 22,17 до 20,50 кВт·год/100 км, що відповідає зниженню приблизно на 7,5%. Це підтверджує, що в багатомоторних BEV підвищення енергоефективності може досягатися не лише за рахунок високого ККД окремого електродвигуна, але й за рахунок вибору кількості активних приводних модулів у конкретний момент руху.

Для розподілених електроприводів також актуальним є врахування втрат на рівні окремого колеса. У роботі [92] запропоновано підхід до енергоефективного керування розподіленим EV з урахуванням втрат енергії в колесах та використанням багатоагентної архітектури керування. Такий підхід дозволяє розглядати кожне колесо як окремий об'єкт керування і змінювати розподіл моменту відповідно до поточного режиму руху. У роботі [93] для BEV з незалежним приводом передньої та задньої осей показано доцільність застосування керування моментом на основі Model Predictive Control (MPC), що дає змогу у реальному часі узгоджувати вимоги до тяги, стійкості та енергоефективності.

Застосування мотор-колів дає змогу майже повністю усунути механічну трансмісію, диференціал і частину проміжних передач. Це потенційно зменшує механічні втрати та забезпечує незалежне керування кожним колесом. Разом із тим прямий привод на базі мотор-колів має суттєві обмеження: збільшення невіднесеної маси, ускладнення тепловідведення, підвищені вимоги до надійності підшипників та більшу чутливість до ударних і вібраційних

навантажень від дорожнього профілю [95]. Тому потенційне підвищення ККД за рахунок вилучення механічних передач повинно оцінюватися разом із динамічними та конструктивними обмеженнями такої компоновки.

Тип приводу BEV також впливає на енергоефективність. За результатами власного узагальнення вибірки сучасних BEV за відкритою базою характеристик [96] спостерігається такий розподіл: Front-Wheel Drive (FWD) – 29,05%, Rear-Wheel Drive (RWD) – 25,45%, All-Wheel Drive (AWD) – 45,5%. Наведені значення доцільно розглядати як характеристику конкретної вибірки моделей, а не як універсальну структуру світового ринку, оскільки співвідношення типів приводу залежить від регіону, класу автомобіля, цінового сегмента та методики формування вибірки.

FWD (1F-0R та 2F-0R, рис. 2.4) зазвичай характеризується конструктивною простотою, меншою масою приводу та меншою кількістю механічних елементів у силовому тракті. Це може знижувати базові механічні втрати в типових міських режимах руху. Передній привід також дає змогу реалізувати компактний front e-axle, що спрощує інтеграцію силової частини в адаптовані та спеціалізовані платформи [97].

RWD (0F-1R та 0F-2R, рис. 2.4) у багатьох випадках забезпечує кращу реалізацію тягового моменту під час прискорення за рахунок перерозподілу навантаження на задню вісь. Така компоновка може мати переваги з погляду динаміки та керованості, але сама по собі не гарантує нижчого енергоспоживання порівняно з FWD. Результат залежить від робочих точок електродвигуна, передавального числа, маси приводу та алгоритмів керування. Окремо слід враховувати, що під час рекуперативного гальмування задньопривідна компоновка має обмеження за стійкістю, що може впливати на допустимий рекуперативний момент [98].

AWD та Front and rear axle independently driven (FRID) (1F-1R, 2F-1R тощо) забезпечують підвищене зчеплення, динаміку та гнучкість розподілу моменту між осями. Їхня енергоефективність залежить від алгоритму розподілу моменту

між електродвигунами. За наявності оптимального керування можна обирати такі режими роботи електричних машин, які зменшують сумарні втрати в силовій частині [92], [93], [94]. Водночас збільшення кількості приводних модулів підвищує масу та може створювати додаткові втрати холостого ходу, тому для AWD необхідне застосування алгоритмів оптимального або векторного розподілу моменту.

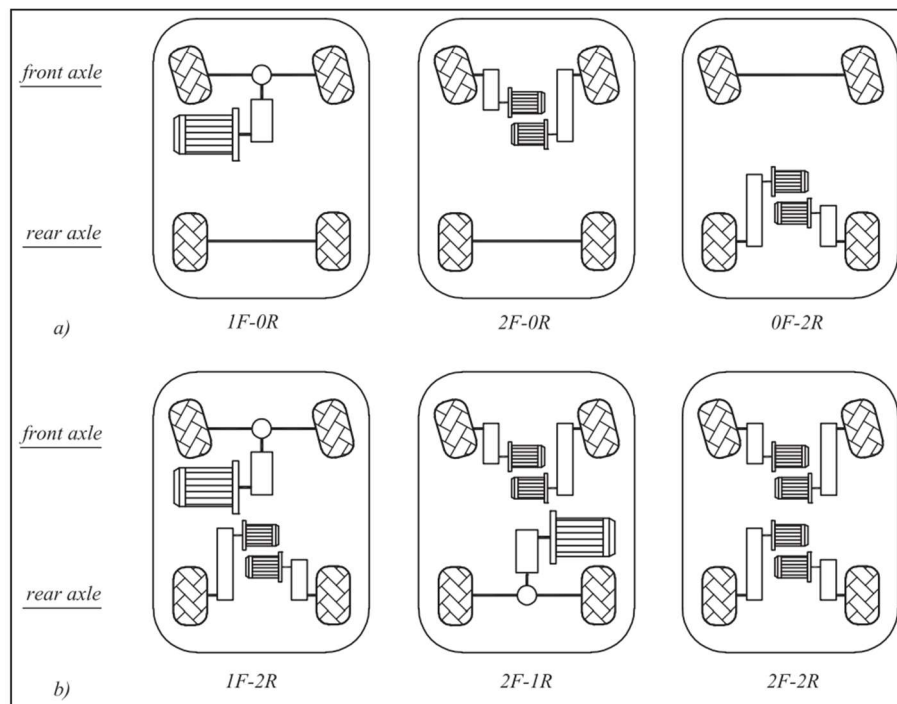


Рис. 2.4 Типи приводу сучасних BEV [97]. Цифра біля літери F – кількість приводних двигунів, що встановлені на передній осі (front axle), цифра біля літери R – кількість приводних двигунів, що встановлені на задній осі (rear axle)

Таким чином, при порівнянні конфігурацій силової частини та типів приводу BEV конструкцію доцільно розглядати як внутрішній фактор енергоефективності. Вона визначає структурні втрати, масу, доступні режими роботи та можливості рекуперації. Реалізація максимальної ефективності залежить не тільки від компоновки, але й від алгоритмів керування електроприводом та режиму використання окремих приводних модулів.

Вплив системи живлення EV на масу та енергоефективність

Енергоспоживання електричного транспортного засобу визначається не лише типом привода, але й архітектурою системи живлення (рис. 2.5). Для масових легкових BEV базовою є структура з однією силовою АКБ. Разом із тим у ширшому класі EV застосовуються або досліджуються розширені системи живлення, що можуть містити додаткові АКБ, паливні комірки, суперконденсатори або маховики. Такі рішення спрямовані на підвищення запасу ходу, покращення динаміки, підвищення ефективності рекуперації або зменшення пікових навантажень на основний накопичувач енергії [85].

1. Базова система з однією АКБ (рис. 2.5, п. (а)) є найбільш поширеною для BEV. У цій схемі АКБ забезпечує живлення тягового електропривода, допоміжних систем та приймання енергії рекуперативного гальмування. Для живлення низьковольтних споживачів зазвичай використовується окрема 12 В система. На рис. 2.5 перетворювачі позначено літерою С. Вони забезпечують перетворення електричної енергії до необхідного рівня напруги або типу струму (DC/AC чи DC/DC).

2. Система з двома АКБ B_1 та B_2 (рис. 2.5, п. (b)) може застосовуватися для функціонального розділення енергетичних і потужнісних навантажень. У такій архітектурі одна батарея з високою питомою потужністю покриває пікові навантаження під час розгону та інтенсивної рекуперації, а друга батарея з високою питомою енергією використовується переважно для забезпечення дальності пробігу в квазіусталених режимах. Це дає змогу зменшити пікові струми в основній батареї та відповідні теплові втрати, але може збільшувати масу системи. Hardware-in-the-Loop (HIL) випробування для Nissan Leaf показують, що використання батареї з високою питомою потужністю може знижувати енергоспоживання в окремих циклах за рахунок нижчих втрат і кращого приймання/віддачі потужності, хоча при цьому можливе збільшення маси батарейного блоку [99]. Як перспективний напрям також розглядається

застосування натрій-іонних акумуляторів (Sodium-ion batteries (SIB)) з метою зниження вартості та залежності від критичних матеріалів [100].

3. Поєднання АКБ з паливними елементами (рис. 2.5, п. (с)) характерне не для класичних BEV, а для паливно-електричних гібридних транспортних засобів. У такій системі паливний елемент забезпечує вироблення електроенергії для усталених режимів руху, а АКБ виконує роль буферного накопичувача для пікових навантажень і рекуперації. Для Fuel-Cell Hybrid Electric Vehicle (FCHEV) із реалістичними циклами руху показано доцільність енергоменеджменту, який координує потоки потужності між РЕМ-паливним елементом, Li-ion батареєю та суперконденсатором [101]. В окремих концепціях розглядається отримання водню з інших видів палива за допомогою реформера (рис. 2.5, п. (d)), однак такі рішення мають високу складність, інерційність та вимоги до очищення газу, що обмежує їх застосування у легковому електротранспорті [102], [103].

4. Поєднання АКБ із суперконденсаторами (рис. 2.5, п. (е)) застосовується у гібридних накопичувачах енергії (Hybrid Energy Storage System (HESS)). Суперконденсатори мають високу питому потужність і можуть приймати значні пікові струми під час рекуперації, зменшуючи навантаження на АКБ і теплові втрати. Оглядові роботи показують, що інтеграція HESS може покращувати рекуперацію, динаміку розгону та ресурс АКБ, але потребує додаткових перетворювачів і складніших алгоритмів енергоменеджменту [104], [105]. У дослідженнях енергорозподілу між АКБ і суперконденсаторами також показано, що відповідні стратегії керування можуть максимізувати відбір рекуперативної енергії та знижувати пікові навантаження на спільній шині постійного струму [106].

Найбільш поширеною для масових легкових BEV залишається базова система з однією АКБ (рис. 2.5, п. (а)), яка забезпечує живлення тягового електропривода та накопичення енергії рекуперації. Розширені структури з двома АКБ, паливними елементами, суперконденсаторами або маховиками можуть покращувати динаміку, приймання рекуперативної енергії або ресурс

основної батареї в специфічних режимах. Проте такі системи ускладнюють силову частину, підвищують масу, вартість та вимоги до керування, тому для масових легкових BEV вони мають обмежене або нішеве застосування.

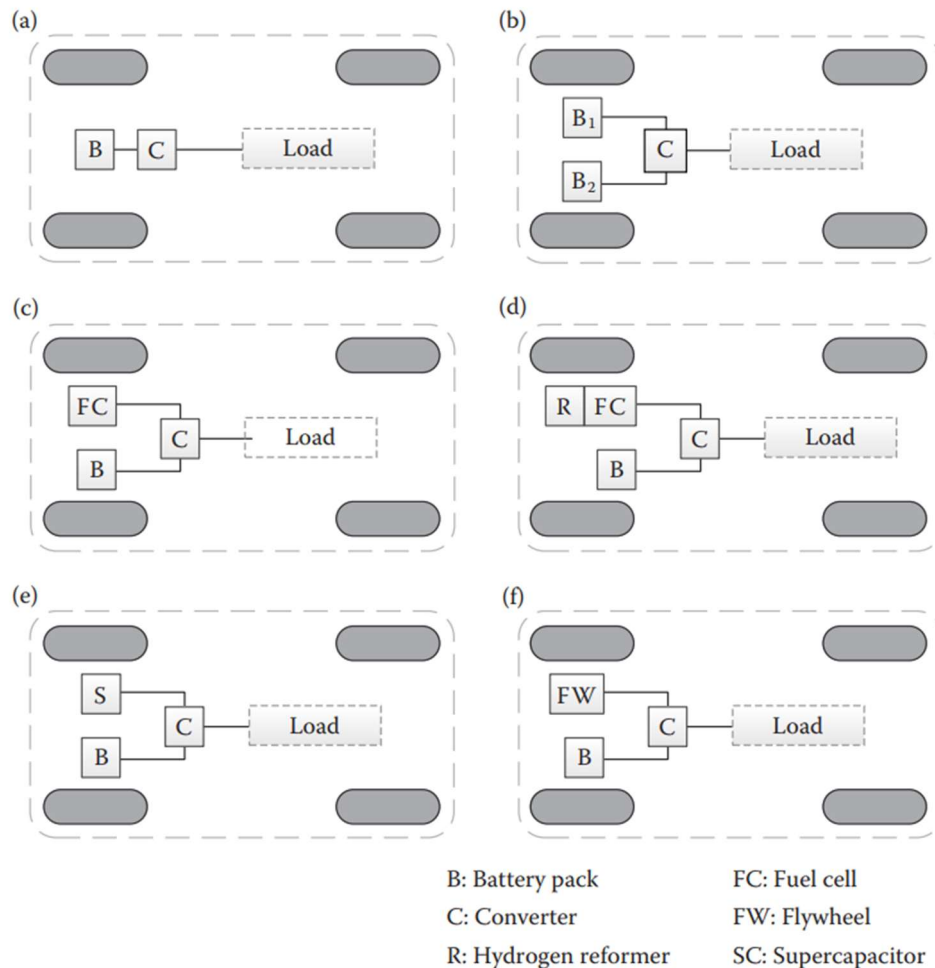


Рис. 2.5 Різновиди системи живлення в EV [85], де: (a) – базова система на основі однієї акумуляторної батареї, (b) – структура на основі двох акумуляторних батарей, (c) – система на основі паливних комірок, (d) – система на основі паливних комірок з водневим перетворювачем, (e) – система на основі суперконденсаторів, (f) – система на основі маховика

Гібридні електромобілі HEV та підзаряджувані гібриди PHEV зберігають помітну частку в структурі сучасного автомобільного ринку, оскільки частково компенсують обмеження BEV, пов'язані із запасом ходу, тривалістю заряджання

та доступністю зарядної інфраструктури. За підсумками 2024 року в ЄС частка BEV становила 13,6% від загальної кількості нових реєстрацій легкових автомобілів, а PHEV залишалися окремим вагомим сегментом електрифікованого транспорту [107], [108]. При цьому HEV та PHEV доцільно розглядати як проміжні рішення між транспортними засобами з ДВЗ і повністю акумуляторними електромобілями.

З позицій оцінювання енергоефективності електропривода найбільш близькими до BEV є саме PHEV, оскільки вони можуть заряджатися від зовнішнього джерела електроенергії та частину маршруту проходити в режимі електричної тяги. Водночас енергоспоживання PHEV має значно вищу невизначеність порівняно з BEV, оскільки залежить від частоти зовнішнього заряджання, частки руху в електричному режимі, стратегії енергоменеджменту та алгоритмів взаємодії ДВЗ з електроприводом. За даними моніторингу реальних показників у ЄС [109], середні реальні викиди CO₂ для PHEV можуть бути у 3,5 раза вищими за лабораторні значення. Оцінки ICCT/Fraunhofer також показують, що реальна витрата пального PHEV може бути приблизно у 3 рази вищою за WLTP для приватних автомобілів та у 5 разів – для корпоративних [110].

Для подальшого дослідження енергоспоживання та запасу ходу доцільно зосередитися саме на BEV, оскільки їх енергетичний баланс є більш однозначним: витрати енергії визначаються запасом електричної енергії в АКБ, втратами у силовій електроніці та тяговому електроприводі, механічною роботою на колесах і можливістю рекуперативного гальмування. Така структура дозволяє безпосередньо пов'язати умови руху, профіль маршруту та питомі витрати електроенергії на основі моделей поздовжньої динаміки [111], [112].

На відміну від BEV, у HEV та PHEV сумарна витрата енергії формується одночасною або послідовною роботою електричного та паливного контурів. У такому випадку результат значною мірою залежить від алгоритмів розподілу потужності, режимів запуску/зупинки ДВЗ, стану заряду АКБ та поведінки

користувача [113], [114]. Тому концентрація на BEV забезпечує вищу відтворюваність результатів і спрощує інтерпретацію впливу топологічного профілю маршруту на енергоспоживання.

2.3. Вплив зовнішніх факторів та обставин руху на витрати енергії EV

Енергоспоживання BEV у реальних умовах експлуатації формується сукупністю внутрішніх факторів, пов'язаних із параметрами силової установки та конструкцією транспортного засобу, а також зовнішніх факторів, що визначають умови середовища та руху. До найбільш впливових зовнішніх чинників належать температура навколишнього середовища, режим роботи допоміжних систем, швидкість руху, вітер, дорожнє покриття, тиск і температура шин, маса транспортного засобу, інтенсивність трафіку та топологічний профіль маршруту. Практично значущою задачею є не лише прогноз питомих витрат енергії, але й оцінювання внеску окремих факторів у сумарне енергоспоживання, що дозволяє визначати пріоритети підвищення енергоефективності.

2.3.1. Температура навколишнього середовища та теплові навантаження

Температура є одним із найбільш впливових зовнішніх факторів, оскільки одночасно змінює електрохімічні втрати АКБ, потребу в опаленні або охолодженні салону, параметри дорожнього опору через зміну властивостей шин і покриття, а також аеродинамічні втрати через зміну густини повітря [115], [116], [117]. Зниження температури зазвичай призводить до зростання питомого енергоспоживання та зменшення запасу ходу BEV.

У роботі [115] показано, що при зниженні температури навколишнього середовища з 25 °C до 0 °C витрати енергії можуть зростати на 20,8%, причому суттєвим механізмом є збільшення складової, пов'язаної з опором коченню та температурною залежністю характеристик шин. Узагальнені результати інших досліджень також підтверджують, що холодні кліматичні умови можуть призводити до помітного зростання енергоспоживання порівняно з режимами за

температури близько 20–25 °С, особливо за значного навантаження системи HVAC [118], [116], [119].

Для забезпечення ефективної та безпечної роботи Li-ion АКБ необхідно підтримувати її температуру в рекомендованому робочому діапазоні. У сучасних роботах із теплового менеджменту АКБ вказується, що для більшості Li-ion систем доцільним є підтримання температури приблизно в межах 15–35 °С, оскільки вихід за ці межі супроводжується зростанням втрат, погіршенням потужнісних характеристик і прискоренням деградаційних процесів [117], [120]. Для цього застосовуються системи Battery Thermal Management System (BTMS), які забезпечують охолодження або підігрів батареї залежно від умов експлуатації.

BTMS є необхідною складовою забезпечення ККД, ресурсу та безпеки АКБ. У сучасних оглядах такі системи поділяють на повітряні, рідинні, системи з фазозмінними матеріалами, термоелектричні рішення та комбіновані структури [117], [120], [121]. При цьому BTMS зменшує температурно-зумовлені втрати в батареї, але водночас створює додаткове споживання енергії, яке повинно враховуватись у прогнозних моделях енергоспоживання.

Кількісно вплив температури та HVAC добре ілюструється на прикладі Nissan Leaf. За результатами моделювання та зіставлення з експериментальними даними [119], для циклів FUDS, SFUDS і NEDC запас ходу перевищує 150 км при температурі 20 °С, тоді як при 0 °С і –15 °С зменшується приблизно до 85 км і 60 км відповідно. Для умов від +23 °С до –7 °С у різних їздових циклах також фіксується зміна питомого енергоспоживання: орієнтовно від 130 до 190 Вт·год/км при +23 °С та від 140 до 270 Вт·год/км при –7 °С залежно від циклу, припущень моделі та режиму роботи допоміжних систем [119].

Отже, температура навколишнього середовища, робота HVAC та BTMS формують один із найвагоміших внесків у варіативність запасу ходу BEV. У холодних умовах ефект є особливо помітним через одночасне зростання

внутрішніх втрат АКБ, зміну опору коченню та збільшення енергоспоживання допоміжних систем.

2.3.2. Аеродинамічний опір, швидкість руху та вітер

Аеродинамічний опір є одним із найбільш значущих факторів енергоспоживання BEV у високошвидкісних режимах. Його величина залежить від геометрії кузова, площі лобової проєкції, густини повітря та відносної швидкості повітряного потоку. Зі збільшенням швидкості частка енергії, необхідної для подолання аеродинамічного опору, зростає, тому енергоспоживання під час руху автомагістраллю зазвичай є вищим, ніж за помірних швидкостей у приміському режимі.

Результати досліджень показують, що зменшення коефіцієнта аеродинамічного опору є дієвим засобом підвищення енергоефективності транспортного засобу. У роботі [122] зміна форми електромобіля, яка включала подовження задньої частини, зміну нахилу лобового скла та геометрії дифузора, забезпечила зниження коефіцієнта аеродинамічного опору на 8,4%. У дослідженні [123] застосування системи керування потоком зменшило коефіцієнт опору на 6,18%. За результатами CFD-моделювання електричного хетчбека [124] комплексне застосування переднього сплітера, заднього дифузора, спойлера та напрямних елементів забезпечило зниження коефіцієнта аеродинамічного опору на 10%.

Наведені значення C_d не є універсальними, оскільки результат залежить від початкової геометрії кузова, швидкості повітряного потоку, конструкції окремих елементів і прийнятих умов моделювання. Водночас вони підтверджують практичну доцільність урахування аеродинамічних параметрів при оцінюванні енергоспоживання BEV.

На фактичну величину аеродинамічного опору також впливає вітер. Зустрічний вітер збільшує відносну швидкість повітряного потоку, тоді як попутний вітер її зменшує. У дослідженні [123] чутливості енергоспоживання

EV до зовнішніх факторів швидкість вітру була другим за значущістю фактором після температури. Зростання енергоспоживання зі збільшенням швидкості транспортного засобу та зустрічного вітру також підтверджено результатами моделювання і випробувань у реальних умовах [124], [125].

Отже, для прогнозування енергоспоживання BEV необхідно враховувати коефіцієнт аеродинамічного опору, площу лобової проекції, швидкісний режим, напрямок і швидкість вітру.

2.3.3. Опір коченню: шини, тиск, температура, дорожнє покриття

Опір коченню BEV визначається характеристиками шин, тиском, температурним станом, типом і шорсткістю дорожнього покриття. Ця складова є одним із базових компонентів тягових витрат у широкому діапазоні швидкостей, особливо в міських і приміських режимах руху [126], [127].

Експериментальні дані показують, що при зниженні температури внесок опору коченню зростає через зміну еластичних властивостей гуми та умов контакту шини з покриттям. У роботі [115] показано, що зниження температури з 25 °C до 0 °C може збільшувати сумарне енергоспоживання EV на 20,8%, причому істотна частина цього приросту пов'язана саме зі зростанням опору коченню. У дослідженні [127] також підтверджено зв'язок між опором коченню радіальних шин і енергоспоживанням електромобіля.

Тиск у шинах є окремим експлуатаційним фактором. Його зменшення призводить до зростання деформаційних втрат у шині, підвищення коефіцієнта опору коченню та відповідного збільшення витрат енергії. Тому контроль тиску в шинах доцільно розглядати як простий, але важливий інструмент підтримання енергоефективності BEV

Стан дорожнього покриття також впливає на витрати енергії. У сучасних дослідженнях показано, що шорсткість дороги може формувати додаткове енергоспоживання та повинна враховуватись під час оцінювання витрат енергії у дорожньому транспорті [128], [129]. Це особливо актуально для регіонів з

неоднорідною якістю дорожньої інфраструктури. Отже, опір коченню доцільно враховувати як змінну складову моделі енергоспоживання, залежну від температури, стану шин і дорожнього покриття.

2.3.4. Маса транспортного засобу та корисне навантаження

Маса BEV впливає на енергоспоживання через інерційні витрати під час прискорення, а також через збільшення сили опору коченню. У міських режимах цей фактор проявляється сильніше через часті цикли розгону та уповільнення [111], [130]. Кількісно вплив навантаження добре простежується для легкого комерційного електротранспорту. У роботі [131] показано, що збільшення маси електричного доставного автомобіля на 850 кг призводило до зменшення запасу ходу майже на 14% у реальних умовах руху. У дослідженні [130] також показано, що вплив навантаження залежить від їздового циклу: у міських режимах він може бути помірним, але зростає за наявності підйомів, частих прискорень та більш динамічного профілю руху.

Отже, маса транспортного засобу та корисне навантаження є важливими змінними для прогнозування запасу ходу, особливо у задачах комерційних перевезень, поїздок з пасажирами або багажем, а також для маршрутів зі значною кількістю розгонів і підйомів.

2.3.5. Манера керування водія

Манера керування є одним із найбільш варіативних експлуатаційних факторів енергоспоживання BEV. У моделі руху вона проявляється через інтенсивність прискорень, частоту різких розгонів і гальмувань, середню швидкість, тривалість зупинок та характер взаємодії водія з транспортним потоком [132], [133].

За незмінних параметрів маршруту й температури різна динаміка розгону та гальмування може формувати помітну різницю у витратах енергії, особливо в

міських режимах. Для BEV цей ефект частково компенсується рекуперативним гальмуванням, однак рекуперація не повертає всю кінетичну енергію. Її ефективність обмежується станом заряду АКБ, допустимими струмами, температурою батареї, можливостями силової електроніки та алгоритмами керування.

Таким чином, різкі прискорення та гальмування залишаються чинником підвищених втрат. Тому стиль керування доцільно враховувати як важливу змінну при емпіричному прогнозуванні запасу ходу та при розробці стратегій енергоефективного руху.

2.3.6. Дорожня інфраструктура та трафік

Дорожня інфраструктура і трафік визначають часову структуру профілю швидкості. Світлофори, затори, обмеження швидкості, частота зупинок і тривалість простоїв впливають на співвідношення режимів розгону, усталеного руху, уповільнення та зупинки. Часті зупинки збільшують інерційні витрати, але водночас створюють умови для рекуперативного гальмування.

У міських режимах також зростає відносний внесок допоміжних систем, оскільки час поїздки на одиницю дистанції збільшується. До таких систем належать HVAC, освітлення, електронні блоки керування, мультимедійні системи та інші низьковольтні споживачі. У роботі [134] показано, що енергоспоживання допоміжних систем електромобіля може бути суттєвим і повинно враховуватись окремо від тягової складової.

Отже, для міських маршрутів важливо розділяти тягову і допоміжну складові енергоспоживання, оскільки інфраструктурні параметри маршруту змінюють не тільки механічну роботу руху, але й тривалість роботи допоміжних споживачів.

2.3.7. Споживання допоміжних систем

Окрім енергії, що витрачається безпосередньо на створення тягового зусилля, у BEV наявна окрема складова енергоспоживання, пов'язана з роботою допоміжних систем. До них належать система опалення, вентиляції та кондиціонування салону (HVAC), система терморегулювання АКБ, освітлення, мультимедійні пристрої, електронні блоки керування, насоси, вентилятори, бортова мережа низької напруги та інші споживачі.

Особливістю допоміжних систем є те, що їх енергоспоживання значною мірою залежить не тільки від довжини маршруту, а й від тривалості поїздки. Тому в умовах заторів, частих зупинок, низької середньої швидкості або тривалого очікування на світлофорах їх відносний внесок у загальні витрати енергії зростає. Це відрізняє допоміжне навантаження від тягової складової, яка безпосередньо визначається силами опору руху, прискореннями, швидкістю та профілем дороги.

У роботі [134] показано, що енергоспоживання допоміжних систем електромобіля може бути суттєвим і повинно враховуватись окремо від витрат енергії на рух. Такий підхід є важливим для коректного прогнозування запасу ходу, оскільки за однакової довжини маршруту, але різної тривалості поїздки, частка допоміжних витрат може істотно змінюватися. Це особливо характерно для міських режимів руху, де середня швидкість є нижчою, а тривалість роботи допоміжних споживачів на одиницю шляху більшою.

Узагальнені дослідження енергоспоживання EV також підтверджують необхідність урахування допоміжного навантаження в моделях прогнозування, оскільки реальні витрати енергії визначаються не тільки параметрами силового тракту, але й умовами експлуатації, тривалістю поїздки та режимом роботи бортових систем [111], [120], [121]. При цьому вплив HVAC і системи терморегулювання АКБ найбільш виражений у несприятливих температурних умовах, що було розглянуто у попередньому підпункті. У цьому контексті допоміжні системи доцільно розглядати як окрему складову енергетичного

балансу, яка змінює зв'язок між механічною роботою руху та фактичними витратами електричної енергії з АКБ.

Для прогнозних моделей енергоспоживання допоміжне навантаження може бути враховане через середню потужність допоміжних систем та тривалість їх роботи на маршруті. У спрощеному вигляді відповідна складова енергії може бути подана як:

$$E_{aux} = P_{aux} \cdot t \quad 2.1$$

де E_{aux} - енергія, спожита допоміжними системами, Вт·год; P_{aux} - середня потужність допоміжних систем, Вт; t - тривалість поїздки або роботи допоміжних систем, год.

Таким чином, допоміжні системи формують додаткову складову енергоспоживання BEV, яка не пов'язана безпосередньо з подоланням сил опору руху, але впливає на фактичний запас ходу. Їх урахування є особливо важливим для міських маршрутів, коротких поїздок, заторів і режимів із тривалою роботою HVAC або системи терморегулювання АКБ.

2.3.8. Топологія маршруту

Топологічний профіль маршруту є одним із найбільш фізично обґрунтованих факторів, що впливає на енергоспоживання BEV. Під час руху на підйомі збільшується механічна робота проти сили тяжіння, тоді як на спусках виникає потенціал часткового повернення енергії за рахунок рекуперативного гальмування. Тому, на відміну від багатьох інших факторів, вплив топології є двоспрямованим: вона може як збільшувати витрати енергії, так і частково компенсувати їх у режимах рекуперації [80], [135].

Для практичних задач моделювання важливим є не лише загальний перепад висот між початковою та кінцевою точками маршруту, а й розподіл ухилів уздовж дистанції, чергування підйомів і спусків, швидкісний режим та ефективність рекуперативного гальмування. Навіть помірні ухили можуть

суттєво змінювати миттєву потужність на колесах, оскільки складова сили тяжіння безпосередньо входить до рівняння поздовжньої динаміки транспортного засобу [80], [136].

Експериментальні та розрахункові дослідження підтверджують, що неврахування дорожнього ухилу призводить до систематичних похибок у прогнозуванні енергоспоживання. Зокрема, у роботі [80] показано, що включення градієнта дороги підвищує точність оцінювання енергоспоживання приблизно на 5–8% порівняно з моделями, у яких ухил не враховується. Для гірських маршрутів вплив рельєфу є ще більш вираженим: у роботі [135] показано, що транспортне енергоспоживання на дорогах зі значними перепадами висот істотно залежить від рельєфу, а перевага EV порівняно з ТЗ з ДВЗ значною мірою визначається ефективністю рекуперації. При низькій ефективності рекуперативного гальмування, зокрема менше 20% від потенційно доступної енергії, енергетичні витрати на маршрутах зі складним рельєфом можуть переважати очікуваний ефект від відновлення енергії на спусках [135].

У прикладних роботах також наведені показові оцінки чутливості енергоспоживання до зміни ухилу. Зокрема, показано, що збільшення градієнта дороги може спричиняти зростання енергоспоживання на десятки відсотків, а для окремих розглянутих умов – до 49% [137]. Це підкреслює, що вплив ухилу може бути домінуючим на коротких ділянках зі значним підйомом, навіть якщо середній перепад висот у межах усього маршруту є помірним.

У задачах планування маршрутів топологія дороги розглядається як один із ключових параметрів енергоефективної маршрутизації BEV [138], [139]. Оптимальний за енергоспоживанням маршрут не завжди збігається з найкоротшим або найшвидшим, оскільки довший шлях із меншими ухилами може потребувати менших витрат енергії, ніж коротший маршрут із вираженими підйомами. В оглядових роботах із планування маршрутів EV наведено, що енергоефективні маршрути в середньому можуть забезпечувати близько 4,5% та 12,4% економії енергії порівняно відповідно з найкоротшим і найшвидшим

маршрутами за умов конкретної постановки задачі [140]. Для задач міської еко-маршрутизації також показано, що врахування параметрів руху конкретного транспортного засобу дозволяє зменшувати енергоспоживання порівняно з базовими підходами, орієнтованими лише на час або довжину маршруту [141].

Окремим питанням є якість вхідних висотних даних. Для врахування топології необхідно використовувати цифрову модель рельєфу (Digital Elevation Model (DEM)) або цифрову модель поверхні (Digital Surface Model (DSM)), а також коректно задавати крок дискретизації висотного профілю вздовж маршруту. У роботах [142], [143] показано, що якість DEM і спосіб вибірки висотних точок можуть суттєво впливати на похибку оцінювання енерговитрат EV. Це особливо важливо для маршрутів зі складним рельєфом або частою зміною ухилів.

У прикладних моделях енергоспоживання, які використовують дорожню інформацію, зокрема дані OpenStreetMap у поєднанні з Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), показано можливість підвищення точності прогнозування за умови коректного опису профілю дороги, швидкісного режиму та параметрів транспортного засобу [136], [144]. Водночас похибки висотних даних або надто груба дискретизація профілю можуть спотворювати реальний вплив ухилу та призводити до некоректного порівняння альтернативних маршрутів [142], [143].

У сучасній літературі для прогнозування енергоспоживання з урахуванням рельєфу застосовуються як фізично обґрунтовані моделі, так і data-driven та ML-моделі з багатофакторним входом. Огляд [145] систематизує такі підходи та вказує на зростання ролі моделей, що використовують дорожні, транспортні та середовищні параметри. У роботах на основі реальних даних руху також показано, що включення дорожніх ознак, зокрема ухилу, може зменшувати похибку прогнозування витрат енергії [146]. Для маршрутно-орієнтованих задач оптимізації додатково підкреслюється, що врахування ухилу разом зі швидкістю та рекуперацією підвищує реалістичність оцінки енергоспоживання і прогнозу стану заряду АКБ наприкінці маршруту [147].

Таким чином, урахування топології маршруту є необхідною умовою підвищення точності прогнозування енергоспоживання та запасу ходу BEV, особливо для позаміських маршрутів, доріг зі складним рельєфом та задач вибору енергоефективного шляху. Разом із тим, літературний аналіз показує, що залишаються недостатньо уніфікованими підходи до вибору джерел висотних даних, кроку дискретизації профілю маршруту та оцінювання впливу рекуперації на спусках. Тому поглиблене дослідження фактора топології маршруту, зокрема з позицій якості DEM-даних і дискретизації висотного профілю, є актуальним для підвищення достовірності прогнозування енерговитрат BEV.

У задачах планування маршрутів топологія дороги розглядається як один із ключових параметрів енергоефективної маршрутизації BEV [138], [139]. Оптимальний за енергоспоживанням маршрут не завжди збігається з найкоротшим або найшвидшим, оскільки довший шлях із меншими ухилами може потребувати менших витрат енергії, ніж коротший маршрут із вираженими підйомами. В оглядових роботах із планування маршрутів EV показано, що енергоефективна маршрутизація може забезпечувати помітну економію енергії порівняно з критеріями мінімальної довжини або мінімального часу поїздки [140], [141].

Окремим питанням є якість вхідних висотних даних. Для врахування топології необхідно використовувати цифрову модель рельєфу (Digital Elevation Model (DEM)) або цифрову модель поверхні (Digital Surface Model (DSM)), а також коректно задавати крок дискретизації висотного профілю вздовж маршруту. У роботах [142], [143] показано, що якість DEM і спосіб вибірки висотних точок можуть суттєво впливати на похибку оцінювання енерговитрат EV. Це особливо важливо для маршрутів зі складним рельєфом або частою зміною ухилів.

У прикладних моделях енергоспоживання, які використовують дорожню інформацію, зокрема дані OpenStreetMap у поєднанні з Shuttle Radar Topography

Mission (SRTM), показано можливість підвищення точності прогнозування за умови коректного опису профілю дороги, швидкісного режиму та параметрів транспортного засобу [136], [144]. Водночас похибки висотних даних або надто груба дискретизація профілю можуть спотворювати реальний вплив ухилу та призводити до некоректного порівняння альтернативних маршрутів [142], [143].

2.4. Сили, що діють на електромобіль під час руху

Для кількісної оцінки впливу топологічного профілю маршруту на енерговитрати BEV необхідно визначити сили, що діють на ТЗ, та механічну роботу, яку тяговий електропривод повинен забезпечити на колесах під час подолання заданої ділянки маршруту.

На рівні поздовжньої динаміки склад зовнішніх сил не залежить від будови електропривода. Водночас витрати електричної енергії з АКБ додатково визначаються ККД інвертора, тягового електродвигуна і механічної передачі, а в режимі гальмування можливістю повернення частини енергії до АКБ. Вплив цих складових розглянуто в пункті 2.1.

Необхідна тягова сила формується з урахуванням аеродинамічного опору, опору коченню, поздовжньої складової сили тяжіння та інерційної складової, що виникає під час зміни швидкості. За рівномірного руху тягове зусилля компенсує суму сил опору, під час розгону додатково забезпечує збільшення кінетичної енергії транспортного засобу, а під час уповільнення напрямок потоку механічної енергії може змінюватися відповідно до режиму гальмування (рекуперативного або фрикційного) [29], [85].

Розподіл нормальних реакцій між передньою та задньою осями визначається з рівнянь рівноваги сил і моментів з урахуванням положення центра мас, колісної бази та кута нахилу дороги. Отримані нормальні реакції використовуються для оцінювання максимальної тягової або гальмівної сили ТЗ, яка може бути реалізована за певних умов зчеплення шин із дорожнім покриттям.

Схеми сил, що діють на BEV при русі вгору та під гору, наведено на рис. 2.6 і рис. 2.7 відповідно. Позначення основних сил та геометричних параметрів транспортного засобу наведено в таблиці 2.1.

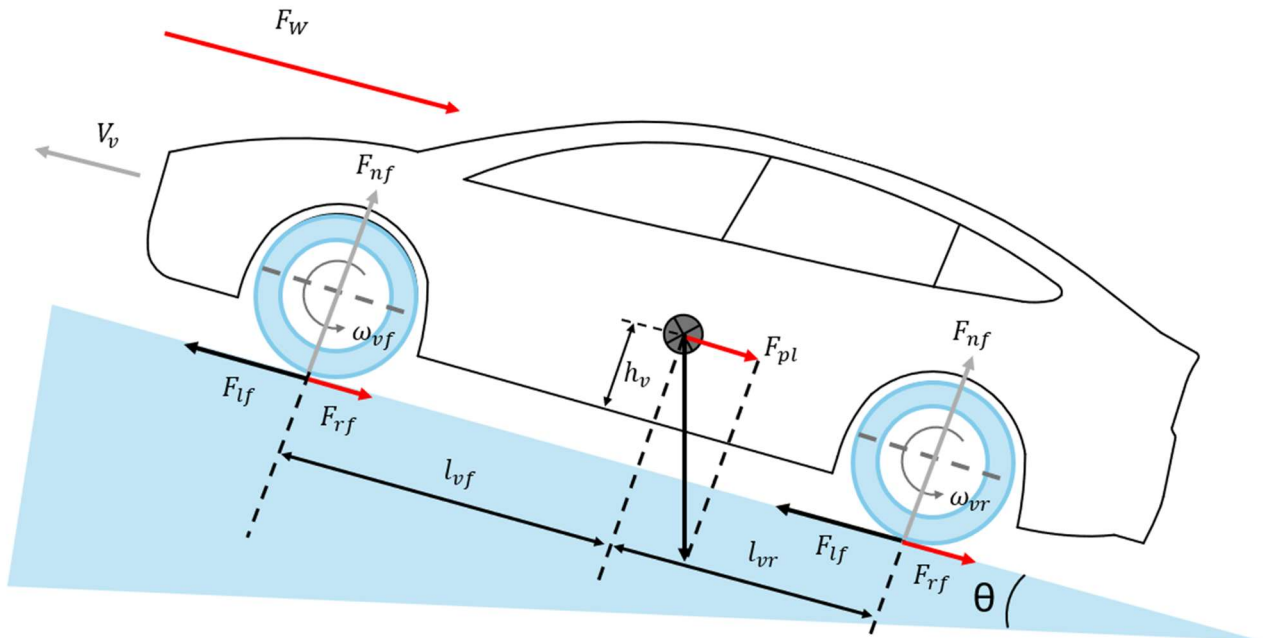


Рис. 2.6 Сили, що діють на BEV ТЗ при русі вгору

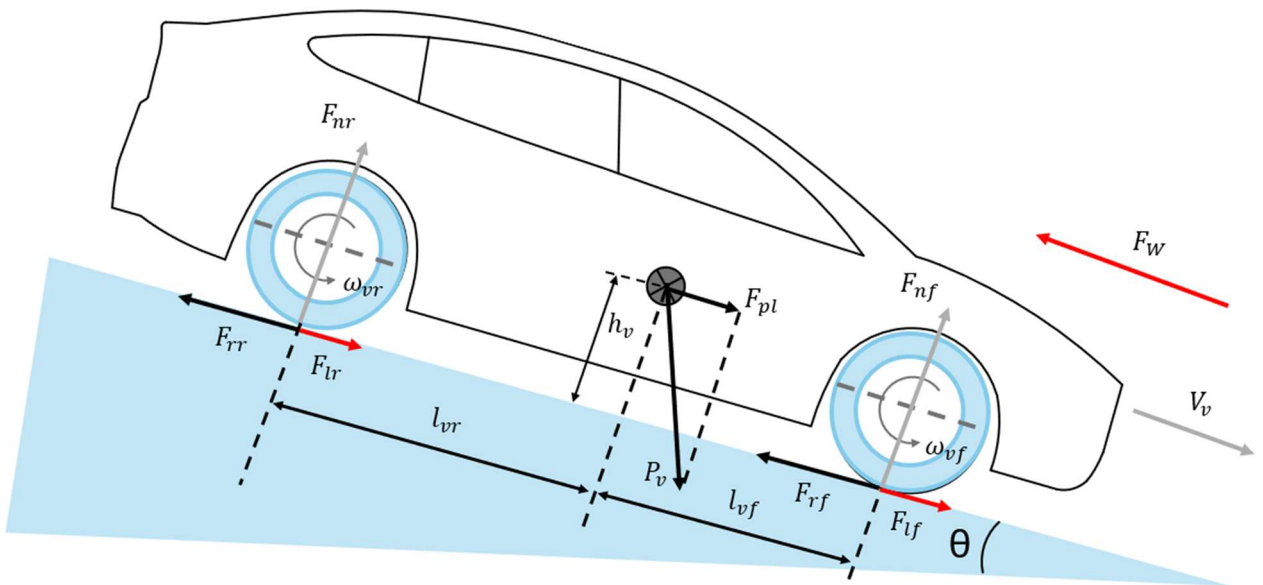


Рис. 2.7 Сили, що діють на BEV ТЗ при русі під гору

Таблиця 2.1 Перелік сил та змінних, що діють на ТЗ

Позначення	Визначення
P_v	Вага транспортного засобу
h_v	Висота центру ваги транспортного засобу
l_{vf}	Відстань між передньою віссю та центром ваги автомобіля
l_{vr}	Відстань між задньою віссю та центром ваги автомобіля
V_v	Швидкість транспортного засобу
F_w	Аеродинамічний опір
F_{nf}	Нормальна сила на передніх шинах
F_{nr}	Нормальна сила на задніх шинах
F_{lf}	Поздовжні сили тяги на передні шини
F_{lr}	Поздовжні сили тяги на задні шини
F_{pl}	Сила скочування
F_{rf}	Сила опору тертя передніх колес
F_{rr}	Сила опору тертя задніх колес
θ	Кут нахилу дороги
ω_{vf}	Кутова швидкість передніх коліс
ω_{vr}	Кутова швидкість задніх коліс

2.4.1. Механічна тягова сила та умови її реалізації

З розрахункових схем, наведених на рис. 2.6, рис. 2.7 випливає, що поступальний рух ТЗ забезпечується поздовжніми силами, які виникають у контакті передніх F_{lf} і задніх F_{lr} коліс із дорожнім покриттям (незалежно від типу привода та кількості ведучих осей). Для узагальненого випадку максимальна механічна тягова сила на колесах визначається як:

$$F_{mt} = F_{lf} + F_{lr}, \text{ Н} \quad (2.2)$$

Для ТЗ з однією ведучою віссю відповідна складова тягової сили на неведучій осі дорівнює нулю. У повноприводній конфігурації сумарна сила формується обома ведучими осями.

Поздовжня сила, яку може реалізувати кожна вісь, обмежується зчепленням шин із дорожнім покриттям. На межі зчеплення максимальні сили визначаються як [85]:

$$F_{lf} = \mu_f \cdot F_{nf}, \text{ Н} \quad (2.3)$$

$$F_{lr} = \mu_r \cdot F_{nr}, \text{ Н} \quad (2.4)$$

де μ_f, μ_r – коефіцієнти зчеплення передніх та задніх коліс відповідно; F_{nf}, F_{nr} – нормальні реакції на передній і задній осях відповідно, Н.

У спрощеній моделі за однакового стану шин і дорожнього покриття допускається прийняти $\mu_f = \mu_r = \mu$. Нормальні реакції передньої та задньої осей при цьому можуть відрізнятися через положення центра мас, поздовжнє прискорення та кут нахилу дороги. У реальних умовах значення μ_f і μ_r можуть бути різними внаслідок неоднакового стану шин, локальної неоднорідності покриття, наявності води, снігу або льоду, а також різних значень поздовжнього ковзання.

Коефіцієнт зчеплення залежить від стану дорожнього покриття та поздовжнього ковзання колеса [85].

$$s_v = \frac{r_d \omega_v - V_v}{r_d \omega_v} \quad (2.5)$$

де s_v – коефіцієнт поздовжнього ковзання; r_d – радіус колеса; ω_v – кутова швидкість ведучого колеса, рад/с; V_v – лінійна швидкість транспортного засобу, м/с.

Залежність між коефіцієнтом зчеплення та ковзанням є нелінійною. Зі збільшенням ковзання позовжня сила спочатку зростає, досягає максимального значення, після чого зменшується. Положення максимуму залежить від характеристик шини та стану дорожнього покриття [85].

Середні значення та діапазони зміни коефіцієнта зчеплення для різного стану покриття наведено в таблиці 2.2. Наведений коефіцієнт зчеплення не слід ототожнювати з коефіцієнтом опору коченню, розглянутим у пункті 2.3.3: перший визначає граничну позовжню силу, тоді як другий характеризує втрати енергії під час кочення колеса.

Якщо середнє значення для сухого покриття $\mu = 0,95$ прийняти за 100 %, то для мокрого покриття воно зменшується приблизно на 21 %, для засніженого – на 69 %, а для вкритого льодом – на 89 %. Таке зниження обмежує максимальну тягову силу та допустиме гальмівне зусилля. У режимі рекуперативного гальмування це впливає на допустимий електромагнітний момент тягового двигуна та на розподіл гальмівних сил між осями [85], [98].

Таблиця 2.2 Діапазони зміни коефіцієнта зчеплення шин із дорожнім покриттям

Кліматичні умови шляху	$\mu_{f/r}$	Середнє значення
Нормальні	0,9...1,0	0,95
Дощ	0,65...0,85	0,75
Сніг	0,275...0,3	0,29
Лід	0,09...0,11	0,1

2.4.2. Нормальні реакції коліс при русі по похилій поверхні

Нормальні реакції на передній F_{nf} та задній F_{nr} осях, які входять до умов зчеплення (2.3) і (2.4), визначаються з рівнянь моментів сил відносно точок контакту коліс з опорною поверхнею, з урахуванням дії аеродинамічного опору,

складової сили тяжіння на похилій ділянці, сил опору руху та інерційних складових при прискоренні/уповільненні [85]

Для режиму руху вгору нормальні реакції можуть бути представлені у вигляді:

$$F_{nf} = \frac{-F_w h_w - F_{pl} h_v + P_v \cos(\theta) l_{vr} - (m_v a_v) h_v}{l_{vf} + l_{vr}}, \text{ Н} \quad (2.6)$$

$$F_{nr} = \frac{F_w h_w + F_{pl} h_v + P_v \cos(\theta) l_{vf} + (m_v a_v) h_v}{l_{vf} + l_{vr}}, \text{ Н} \quad (2.7)$$

Для режиму руху під гору нормальні реакції визначаються:

$$F_{nf} = \frac{-F_w h_w + F_{pl} h_v + P_v \cos(\theta) l_{vr} + (m_v a_v) h_v}{l_{vf} + l_{vr}}, \text{ Н} \quad (2.8)$$

$$F_{nr} = \frac{F_w h_w - F_{pl} h_v + P_v \cos(\theta) l_{vf} - (m_v a_v) h_v}{l_{vf} + l_{vr}}, \text{ Н} \quad (2.9)$$

де a_v – прискорення, м/с²; $m_v = P_v/g$ – маса електромобіля, кг; $g = 9,81$ м/с²; θ – кут нахилу дорожнього профілю, рад.

Сума нормальних реакцій коліс (ра відсутності відриву коліс від дорожнього покриття) визначається нормальною складовою ваги ТЗ на похилій поверхні:

$$F_{nf} + F_{nr} = P_v \cos(\theta), \text{ Н} \quad (2.10)$$

Для повноприводного ТЗ за умови $\mu_f = \mu_r = \mu$ максимальна сумарна тягова сила, обмежена зчепленням шин із дорожнім покриттям, визначається як:

$$F_t = \mu P_v \cos(\theta), \text{ Н} \quad (2.11)$$

де μ – узагальнений коефіцієнт тертя (зчеплення) шина–дорога; P_v – вага ТЗ, Н; θ – кут нахилу дорожнього профілю, рад.

Таким чином, на похилій ділянці маршруту максимальна реалізована тягова сила зменшується пропорційно до $\cos(\theta)$, а фактична реалізація тяги

додатково залежить від кліматичних умов через варіацію μ (таблиця 2.2). Це створює прямий зв'язок між топологічним профілем маршруту та межами керованості тягових/гальмівних режимів, що є принципово важливим як для оцінки механічної роботи руху, так і для аналізу потенціалу рекуперації на спусках [80], [132], [138].

2.4.3. Сили опору коченню.

Під час руху електромобіля виникає сила опору коченню, зумовлена деформацією шини, гістерезисними втратами в її матеріалі, мікросковзанням елементів протектора та деформацією дорожнього покриття. Під дією нормального навантаження формується пляма контакту «шина–дорога», у межах якої розподіл тиску є несиметричним. Унаслідок цього лінія дії результуючої нормальної реакції зміщується відносно геометричного центра контакту на відстань b_{sh} , що створює момент опору коченню [85]. Схему формування сили опору коченню наведено на рис. 2.8.

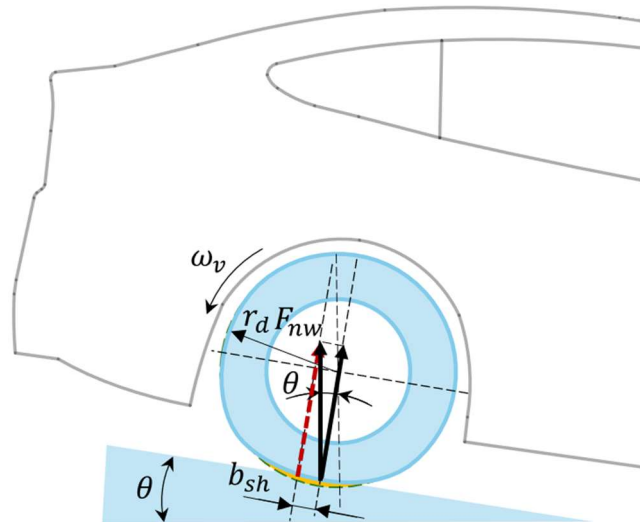


Рис. 2.8 Схема формування сили опору коченню шини

Сила опору коченню для одного колеса може бути подана через коефіцієнт опору коченню ξ_r з урахуванням проекції нормальної реакції на напрямок перпендикуляра до опорної поверхні при русі по ухилу [85].

$$F_r = F_{nw} \xi_r \cos(\theta), \text{ Н} \quad (2.12)$$

де F_r – сила опору коченню, Н; F_{nw} – нормальна реакція опорної поверхні на колесо, Н; $\xi_r = b_{sh}/r_d$ – коефіцієнт опору коченню.

Коефіцієнт опору коченню визначається геометрією зміщення нормальної реакції та ефективним радіусом колеса [85].

$$\xi_r = b_{sh}/r_{de} \quad (2.13)$$

де r_{de} – ефективний радіус колеса, м.

Для повнопривідного електромобіля (або для випадку урахування двох осей) сумарний опір коченню визначається як сума складових від переднього та заднього мостів із можливістю різних коефіцієнтів опору коченню для осей [85], [126], [127].

$$F_r = F_{rf} + F_{rr} = (F_{nf} \xi_{rf} + F_{nr} \xi_{rr}) \cos(\theta), \text{ Н} \quad (2.14)$$

де F_{rf} – сила опору коченню переднього моста, Н; F_{rr} – сила опору коченню заднього моста, Н; F_{nf} – нормальна сила на передніх колесах (передня вісь), Н; F_{nr} – нормальна сила на задніх колесах (задня вісь), Н; ξ_{rf} – коефіцієнт опору коченню для переднього моста; ξ_{rr} – коефіцієнт опору коченню для заднього моста.

Якщо на передній і задній осях встановлено шини однакового типу та прийнято однакові умови їх експлуатації, допускається наближення $\xi_{rf} \approx \xi_{rr} \approx \xi_r$, а також враховується співвідношення сумарних нормальних реакцій $F_{nf} + F_{nr} = P_v \cos(\theta)$ (2.10), отримуємо узагальнену оцінку сумарного опору коченню [85].

Сумарна сила опору коченню визначається як:

$$F_r = P_v \xi_r \cos(\theta)^2, \text{ Н} \quad (2.15)$$

де P_v – вага транспортного засобу, Н; ξ_r – коефіцієнт опору коченню.

Однакові коефіцієнти опору коченню передньої та задньої осей не означають рівності сил F_{rf} і F_{rr} , оскільки їх значення залежать від розподілу нормальних реакцій між осями. Під час прискорення, уповільнення та руху по похилій поверхні цей розподіл змінюється відповідно до рівнянь (2.6)–(2.9).

Коефіцієнт опору коченню визначається експериментально та залежить від конструкції шини, тиску, температури, швидкості руху і стану дорожнього покриття [126], [127]. Вплив зазначених факторів на енергоспоживання BEV розглянуто в пункті 2.3.3. У подальших розрахунках значення ξ_r може прийматися сталим для окремого сегмента маршруту відповідно до заданих умов руху.

2.4.4. Сила опору повітря.

Під час руху EV на нього діє сила аеродинамічного опору, яка визначається аеродинамічними параметрами кузова, густиною повітря та відносною швидкістю повітряного потоку. За відсутності вітру відносна швидкість потоку дорівнює швидкості транспортного засобу. Зустрічний або попутний вітер відповідно збільшує або зменшує її значення.

Сила аеродинамічного опору визначається за залежністю [85], [148]:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho S_{vfront} C_d (v_v + v_w)^2, H \quad (2.16)$$

де F_w – сила аеродинамічного опору, Н; ρ – густина повітря, кг/м^3 ; S_{vfront} – ефективна фронтальна площа транспортного засобу, м^2 ; C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору; v_w – проєкція швидкості вітру вздовж напрямку руху, м/с ; v_v – швидкість транспортного засобу, м/с .

Коефіцієнт C_d є емпіричним параметром, який визначається за результатами випробувань в аеродинамічній трубі або чисельного моделювання для конкретної геометрії транспортного засобу [122], [148], [149]. При відомій силі аеродинамічного опору він може бути визначений за виразом:

$$C_d = \frac{2 \cdot F_w}{\rho \cdot v_{rel}^2 \cdot S_{vfront}} \quad (2.17)$$

де $v_{rel} = v_v + v_w$, м/с.

Сила аеродинамічного опору пропорційна квадрату відносної швидкості повітряного потоку. Тому її подвоєння збільшує силу опору у 4 рази. За відсутності вітру подвоєння швидкості транспортного засобу збільшує механічну потужність, необхідну для подолання аеродинамічного опору, у 8 разів. Ця залежність пояснює різке зростання енергоспоживання BEV у високошвидкісних режимах.

2.4.5. Сила скочування

Сила скочування F_{pl} є проєкцією ваги транспортного засобу на напрямок траєкторії руху та визначається залежністю [85]:

$$F_{pl} = P_v \sin(\theta) \quad (2.18)$$

Для руху вгору сила F_{pl} спрямована протилежно руху та збільшує необхідне тягове зусилля. Під час руху під гору її напрямок збігається з напрямком руху, унаслідок чого потреба у тяговому зусиллі електропривода зменшується.

Під час руху під гору частина потенціальної енергії транспортного засобу перетворюється на механічну енергію руху. За використання рекуперативного гальмування частина цієї енергії може бути перетворена на електричну та повернена до тягової АКБ [5], [22]. Фактичний обсяг відновленої енергії залежить від швидкості руху, інтенсивності гальмування, характеристик електропривода, допустимої зарядної потужності АКБ та умов зчеплення коліс із дорожнім покриттям.

За незмінного кута нахилу сила F_{pl} прямо пропорційна масі транспортного засобу. Тому збільшення маси підвищує витрати енергії під час руху вгору. Під

час подальшого руху під гору ця енергія може бути відновлена лише частково через втрати в тяговому електродвигуні, силовому перетворювачі, механічній передачі та АКБ [22], [138].

Допустимий рекуперативний момент також залежить від розподілу нормальних реакцій між осями та типу привода (FWD/RWD/AWD). За недостатнього зчеплення гальмівний момент тягового електродвигуна повинен бути обмежений для збереження стійкості транспортного засобу [85], [98].

2.4.6. Баланс сил та механічна робота тягової сили

Механічна тягова сила F_t забезпечує зміну швидкості транспортного засобу і визначається з поздовжнього балансу сил відповідно до другого закону Ньютона [85]. Для електромобіля, що рухається вздовж похилого дорожнього профілю, рівняння руху в проєкції на напрямок траєкторії для режиму прискорення можна подати у вигляді:

рух угору

$$F_t - F_{pl} - F_w - F_r = m_v a_v \quad (2.19)$$

рух під гору

$$F_t + F_{pl} - F_w - F_r = m_v a_v \quad (2.20)$$

де a_v – прискорення, м/с^2 , F_t – механічна тягова сила на ведучих колесах, Н.

Співвідношення (2.19 – 2.20) відображають баланс сил уздовж напрямку руху та дозволяють безпосередньо пов'язати режим руху електромобіля (розгін, рівномірний рух, гальмування) з параметрами дорожнього профілю й опору руху. Зокрема, за заданих m_v, θ , швидкості та відомих складових F_{pl}, F_w, F_r можна визначити необхідну тягову силу F_t для реалізації заданого a_v . При цьому швидкість і прискорення можуть задаватися профілями стандартизованих випробувальних циклів, зокрема WLTP/WLTC, що забезпечує відтворюваність розрахунків на дискретних відрізках маршруту.

Умови забезпечення необхідної механічної тягової сили. Згідно з рівняннями (2.19) і (2.20), забезпечення заданого прискорення можливе лише за умови, що потрібна тягова сила не перевищує максимально допустиму за умовами зчеплення коліс із дорогою. Для руху угору умова зчеплення має вигляд:

$$\mu P_v \cos(\theta) \geq F_{pl} + F_w + F_r + m_v a_v \quad (2.21)$$

Підставляючи залежності для складових опору руху (2.15)–(2.18) отримаємо критерій можливості реалізації тягового режиму при русі угору:

$$\mu F_n \geq P_v \sin(\theta) + \frac{1}{2} \rho S_{vfront} C_d (V_v + V_w)^2 + F_n \xi_r \cos(\theta)^2 + m_v a_v \quad (2.22)$$

Умова (2.21) формально є справедливою і для руху під гору, однак у цьому випадку складова F_{pl} переважно сприяє руху та зменшує необхідну величину F_t , що підвищує реалізованість тяги.

Якщо приводним є лише один міст (передній або задній), то доступна за зчепленням тягова сила визначається нормальним навантаженням саме на ведучу вісь, що знижує потенціал реалізації тяги та погіршує виконання умови (2.21). Тоді критерій можна подати у вигляді:

$$\mu P_v \cos(\theta) \geq P_v \sin(\theta) + \frac{1}{2} \rho S_{vfront} C_d (V_v + V_w)^2 + P_v \xi_r \cos(\theta)^2 + m_v a_v \quad (2.23)$$

де $F_n = F_{nf}$ – для переднього мосту, Н; $F_n = F_{nr}$ – для заднього мосту, Н.

Робота механічної тягової сили. При зміні режиму руху електромобіля змінюється і тягова сила F_t . Для оцінювання механічної роботи на колесах маршрут поділяється на окремі i -ті фрагменти. У межах кожного фрагмента виділяються ділянки прискорення, круїзного режиму та гальмування. Розрахункові схеми руху вгору та під гору наведено відповідно на рис. 2.9 і рис. 2.10, а прийняті позначення у таблиці 2.3.

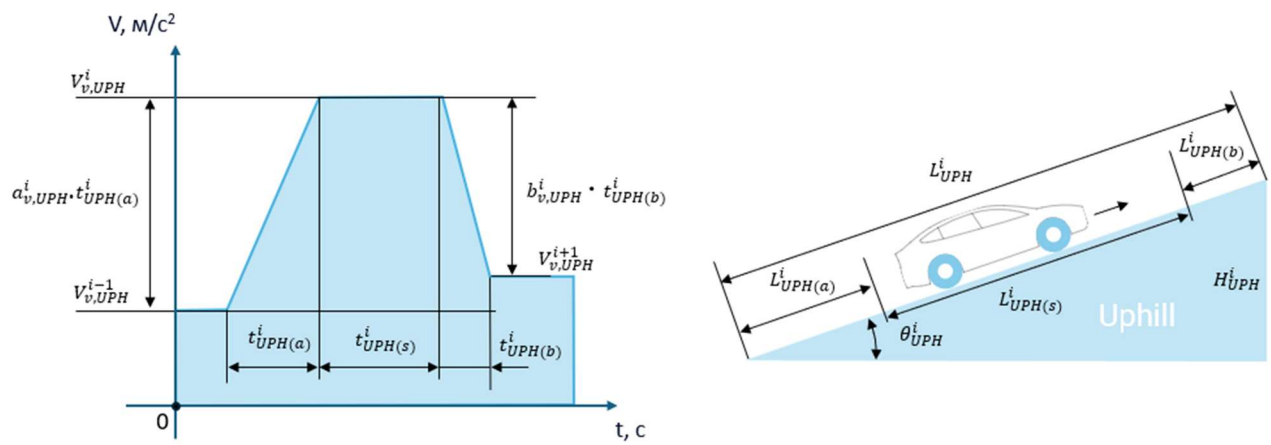


Рис. 2.9 Фрагмент маршруту EV при русі вгору

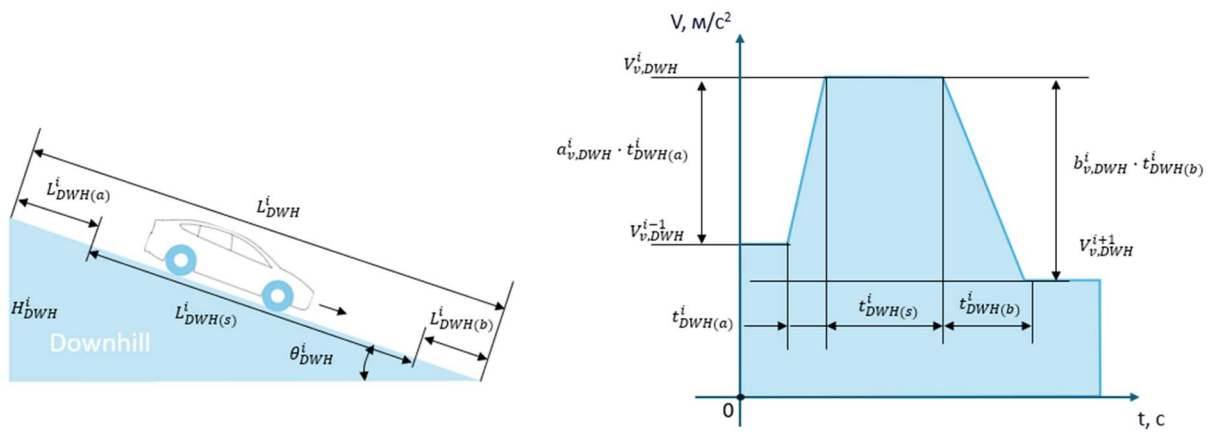


Рис. 2.10 Фрагмент маршруту EV при русі під гору

Таблиця 2.3 Позначення *i*-го фрагменту маршруту

L_{UPH}^i	Довжина маршруту вгору	L_{DWH}^i	Довжина маршруту під гору
$L_{UP(a)}^i$	Довжина маршруту вгору з прискоренням	$L_{DW(a)}^i$	Довжина маршруту під гору з прискоренням
$L_{UP(b)}^i$	Довжина маршруту вгору з гальмуванням	$L_{DW(b)}^i$	Довжина маршруту під гору з гальмуванням

Продовження таблиці 2.3

$L_{UP}^i(s)$	Довжина круїзного режиму вгору	$L_{DWH}^i(s)$	Довжина круїзного режиму під гору
θ_{UPH}^i	Кут підйому	θ_{DWH}^i	Кут спуску
H_{UPH}^i	Висота підйому	H_{DWH}^i	Висота спуску
$a_{v,UPH}^i$	Прискорення на підйомі	$a_{v,DWH}^i$	Прискорення на спуску
$b_{v,UPH}^i$	Уповільнення на підйомі	$b_{v,DWH}^i$	Уповільнення на спуску
$V_{v,UP}^{i-1}$	Швидкість електромобіля перед підйомом	$V_{v,DW}^{i-1}$	Швидкість електромобіля на початку спуску
$V_{v,UP}^i$	Максимальна швидкість електромобіля після розгону на підйомі	$V_{v,DWH}^i$	Максимальна швидкість електромобіля після розгону на спуску
$V_{v,UP}^{i+1}$	Швидкість електромобіля після гальмування на підйомі	$V_{v,DWH}^{i+1}$	Швидкість електромобіля після гальмування на спуску
$t_{UPH(a)}^i$	Час руху вгору з прискоренням	$t_{DWH(a)}^i$	Час руху під гору з прискоренням
$t_{UPH(s)}^i$	Час круїзного режиму вгору	$t_{DWH(s)}^i$	Час круїзного режиму під гору
$t_{UPH(b)}^i$	Час руху вгору з гальмуванням	$t_{DWH(b)}^i$	Час руху під гору з гальмуванням

Загальна довжина динамічного відрізка:

$$L_v^i = L_{UPH}^i + L_{DWH}^i, \text{ м} \quad (2.24)$$

Загальна довжина i -го відрізка при русі угору:

$$L_{UPH}^i = L_{UPH(a)}^i + L_{UPH(s)}^i + L_{UPH(b)}^i, \text{ м} \quad (2.25)$$

Загальна довжина i -го відрізка при русі під гору:

$$L_{DWH}^i = L_{DWH(a)}^i + L_{DWH(s)}^i + L_{DWH(b)}^i, \text{ м} \quad (2.26)$$

Довжина круїзного відрізка при русі угору:

$$L_{UPH(s)}^i = L_{UPH}^i - L_{UPH(a)}^i - L_{UPH(b)}^i, \text{ м} \quad (2.27)$$

Довжина круїзного відрізка при русі під гору:

$$L_{DWH(s)}^i = L_{DWH}^i - L_{DWH(a)}^i - L_{DWH(b)}^i, \text{ м} \quad (2.28)$$

Тоді механічна робота тягової сили на i -му фрагменті маршруту визначається сумою робіт на ділянках прискорення, усталеного руху та гальмування.

Робота тягової сили при русі угору на i -му фрагменті при русі вгору:

$$A_{UPH}^i = F_{t,UPH(a)}^i L_{UPH(a)}^i + F_{t,UPH(s)}^i L_{UPH(s)}^i + F_{t,UPH(b)}^i L_{UPH(b)}^i, \text{ Дж} \quad (2.29)$$

Робота тягової сили на i -му фрагменті при русі під гору:

$$A_{DWH}^i = F_{t,DWH(a)}^i L_{DWH(a)}^i + F_{t,DWH(s)}^i L_{DWH(s)}^i + F_{t,DWH(b)}^i L_{DWH(b)}^i, \text{ Дж} \quad (2.30)$$

Сумарна механічна робота на i -му динамічному відрізку:

$$A_v^i = A_{UPH}^i + A_{DWH}^i, \text{ Дж} \quad (2.31)$$

Якщо вважати прискорення/уповільнення сталими на відповідних ділянках, то довжини відрізків розгону та гальмування можуть бути визначені через кінематичні співвідношення:

Довжина відрізка прискорення при русі вгору:

$$L_{UPH(a)}^i = \frac{(v_{v,UPH}^i)^2 - (v_{v,UPH}^{i-1})^2}{2a_{v,UPH}^i}, \text{ м} \quad (2.32)$$

Довжина відрізка гальмування при русі вгору:

$$L_{UPH(b)}^i = \frac{(v_{v,UPH}^i)^2 - (v_{v,UPH}^{i+1})^2}{2b_{v,UPH}^i}, \text{ м} \quad (2.33)$$

Довжина відрізка прискорення при русі під гору:

$$L_{DWH(a)}^i = \frac{(v_{v,DWH}^i)^2 - (v_{v,DWH}^{i-1})^2}{2a_{v,DWH}^i}, \text{ м} \quad (2.34)$$

Довжина відрізка гальмування при русі під гору:

$$L_{DWH(b)}^i = \frac{(v_{v,DWH}^i)^2 - (v_{v,DWH}^{i+1})^2}{2b_{v,DWH}^i}, \text{ м} \quad (2.35)$$

Сили тяги F_t , що входять у рівняння (2.29) і (2.30), визначаються за балансом сил (2.19)–(2.20) з урахуванням напрямку руху та режиму на відповідній ділянці:

Сила тяги на ділянці розгону при русі вгору:

$$F_{t,UPH(a)}^i = F_{pl,UPH}^i + F_{w,UPH(a)}^i + F_{r,UPH}^i + m_v a_{v,UPH}^i, \text{ Н} \quad (2.36)$$

Сила тяги на ділянці круїзного режиму при русі вгору:

$$F_{t,UPH(s)}^i = F_{pl,UPH}^i + F_{w,UPH(s)}^i + F_{r,UPH}^i, \text{ Н} \quad (2.37)$$

Сила тяги на ділянці гальмування при русі вгору:

$$F_{t,UPH(b)}^i = F_{pl,UPH}^i + F_{w,UPH(b)}^i + F_{r,UPH}^i, \text{ Н} \quad (2.38)$$

Сила тяги на ділянці розгону при русі під гору:

$$F_{t,DWH(a)}^i = -F_{pl,DWH}^i + F_{w,DWH(a)}^i + F_{r,DWH}^i + m_v a_{v,DWH}^i, \text{ Н} \quad (2.39)$$

Сила тяги на ділянці круїзного режиму при русі під гору:

$$F_{t,DWH(s)}^i = -F_{pl,DWH}^i + F_{w,DWH(s)}^i + F_{r,DWH}^i, \text{ Н} \quad (2.40)$$

Сила тяги на ділянці гальмування при русі під гору:

$$F_{t,DWH(b)}^i = -F_{pl,DWH}^i + F_{w,DWH(b)}^i + F_{r,DWH}^i - m_v b_{v,DWH}^i, \text{ Н} \quad (2.41)$$

При цьому силу аеродинамічного опору на ділянках прискорення та гальмування доцільно враховувати за середнім значенням швидкості на відповідному інтервалі руху, що підвищує стійкість інженерних оцінок при дискретному розрахунку енергії на маршруті.

Загальні вирази для механічної роботи при підйомі та спуску

Якщо ділянка підйому має сталий нахил θ та складається з $n = a + s + b$ ланок, a – кількість ланок прискорення, b – кількість ланок уповільнення, s – кількість ланок усталеного руху, тоді загальна механічна робота на підйом може бути представлена як сума робіт на подолання складових опору руху:

$$A_{UPH} = A_{UPH}^{pl} + A_{UPH}^r + A_{UPH}^w, \text{ Дж} \quad (2.42)$$

Механічна робота на подолання сил скочування на підйом:

$$A_{UPH}^{pl} = P_{vh} L_{UPH} \sin(\theta), \text{ Дж} \quad (2.43)$$

Механічна робота на подолання опору коченню та інерційної складової при підйомі:

$$A_{UPH}^r = L_{UPH} \xi_r \cos(\theta)^2 + \sum_{i=1}^a a_{v,U}^i L_{UPH(a)}^i, \text{ Дж} \quad (2.44)$$

Механічна робота на подолання опору повітря на підйом:

$$\begin{aligned} A_{UPH}^w = & \sum_{i=1}^a k_{w,UPH(a)}^i L_{UPH(a)}^i + \sum_{i=1}^s k_{w,UP(s)}^i L_{UP(s)}^i \\ & + \sum_{i=1}^b k_{w,UPH(b)}^i L_{UPH(b)}^i), \text{ Дж} \end{aligned} \quad (2.45)$$

де $L_{UPH} = \sum_{i=1}^n L_{UPH}^i$, м; коефіцієнти: $k_{w,UP(s)}^i = \frac{0,5\rho S_{vfront} C_d}{P_v} (V_{v,UP}^i + V_w)^2$;
 $k_{w,UP(a)}^i = \frac{0,5\rho S_{vfront} C_d}{P_v} (0,5(V_{v,UP}^{i-1} + V_{v,UP}^i) + V_w)^2$; $k_{w,UPH(b)}^i =$
 $\frac{0,5\rho S_{vfront} C_d}{P_v} (0,5(V_{v,UPH}^i + V_{v,UPH}^{i+1}) + V_w)^2$;

Аналогічно для спуску:

$$A_{DWH} = -A_{DWH}^{pl} + A_{DWH}^r + A_{DWH}^w, \text{ Дж} \quad (2.46)$$

Механічна робота на подолання сил скочування на спуск (для спуску має протилежний знак):

$$A_{DWH}^{pl} = -P_v L_{DWH} \sin(\theta), \text{ Дж} \quad (2.47)$$

Механічна робота на подолання опору коченню та інерційної складової при спуску:

$$A_{DWH}^r = L_{DWH} \xi_r \cos(\theta)^2 + \sum_{i=1}^a a_{v,DWH}^i L_{DWH(a)}^i, \text{ Дж} \quad (2.48)$$

Механічна робота на подолання опору повітря при спуску:

$$A_{DW}^w = \sum_{i=1}^a k_{w,DW(a)}^i L_{DWH(a)}^i + \sum_{i=1}^s k_{w,DWH(s)}^i L_{U(s)}^i \quad (2.49)$$

$$+ \sum_{i=1}^b k_{w,D(b)}^i L_{D(b)}^i, \text{ Дж}$$

Тобто, можна представити загальну формулу для визначення механічної роботи електромобіля при підйомі і спуску через постійну складову, що визначається горизонтальним рухом, і – змінну складову, що залежить від кута нахилу дороги.

Механічна робота електромобіля при підйомі:

$$A_{UPH} = A_{UPH}(0) + A_{UPH}[\theta], \text{ Дж} \quad (2.50)$$

Механічна робота електромобіля на спуск:

$$A_{DWH} = A_{DWH}(0) + A_{DWH}[\theta], \text{ Дж} \quad (2.51)$$

де $A_{UPH}[\theta] = (dA_{UPH}/d\theta)\theta$, Дж; $A_{DWH}[\theta] = (dA_{DWH}/d\theta)\theta$, Дж.

Наведені залежності визначають механічну роботу на колесах. Для переходу до електричної енергії, спожитої або поверненої до АКБ, необхідно враховувати ККД тягового електродвигуна, силового перетворювача, механічної передачі, АКБ та обмеження системи рекуперативного гальмування.

2.4.7. Вплив поворотів вздовж маршруту руху на витрати енергії

У межах розробленої моделі додаткові втрати, пов'язані з поперечною динамікою транспортного засобу під час проходження поворотів, окремо не розраховуються. Основний вплив поворотів ураховується опосередковано через заданий профіль швидкості, який відображає уповільнення перед поворотом і подальший розгін.

Поперечне прискорення транспортного засобу під час руху по криволінійній траєкторії визначається залежністю [150]:

$$a_y = \frac{v_y^2}{R}, \text{ м/с}^2 \quad (2.53)$$

де a_y - поперечне прискорення транспортного засобу, м/с²; v_y – швидкість руху транспортного засобу, м/с; R – радіус повороту, м.

Доцентрова сила при цьому визначається добутком маси ТЗ на поперечне прискорення. Зі збільшенням швидкості або зменшенням радіуса повороту зростають поперечні сили в контактї шин із дорожнім покриттям, деформаційні втрати та ймовірність мікросковзання.

За результатами дослідження електричних міських автобусів додаткові втрати, пов'язані з проходженням поворотів, у середньому становили 3,1% енергії силового тракту, а для маршрутів у центральній частині міста досягали 5,8% [151]. Для електромобіля з розподіленим приводом застосування оптимального розподілу моменту між колесами забезпечило максимальне

зменшення енергоспоживання в повороті на 3,78% при швидкості 80 км/год і куті повороту передніх коліс близько 3° [152]. Важливо відмітити, що наведені дані не є універсальними та повинні перераховуватись під конкретну модель BEV.

У цій роботі прийнято припущення про нехтування окремою складовою втрат у поворотах, оскільки дослідження зосереджене на впливі висотного профілю маршруту, а зміни швидкості під час проходження поворотів ураховуються тахограмою руху. Таке спрощення є прийнятним для маршрутів із помірними швидкостями, плавною зміною траєкторії та відсутністю різких маневрів. Для високошвидкісного руху або поворотів малого радіуса необхідно додатково враховувати складові поперечної динаміки.

2.4.8. Уніфікація режиму руху

Манера керування водія (інтенсивність розгонів і гальмувань, вибір швидкості, частота змін режимів) є одним із ключових чинників варіативності енергоспоживання електромобіля, оскільки вона безпосередньо визначає часовий профіль швидкості $v(t)$ та прискорення $a(t)$, а отже і миттєву потребу в тязі та потужності. В дослідженні [133] показано істотний вплив параметрів стилю водіння (зокрема прискорень) на енергетичні показники транспортного засобу. Оскільки метою даного дослідження є оцінювання внеску саме маршрутних факторів (зокрема топології) за умов однакового режиму руху, доцільним є уніфікування динаміки шляхом використання відтворюваного профілю швидкості, що дозволяє коректно порівнювати альтернативні маршрути. Додатково слід враховувати, що точність оцінювання витрат пального або викидів CO_2 (для ТЗ з ДВЗ) у лабораторних умовах залежить від методики дослідження та обладнання, яке використовується для фіксації показників [153]. Таким чином, нормування динаміки руху є важливою передумовою порівняльного аналізу.

У даній роботі як уніфікований базис для опису режиму руху використовується міжнародна гармонізована процедура випробувань WLTP,

зокрема цикл WLTC Class 3b, який застосовується для оцінювання транспортних засобів категорії M1 (у т.ч. EV) у рамках чинних норм Euro 6. Використання однакового профілю швидкості $v_v(t)$ забезпечує однакову функцію керування рухом $u(t)$ і відповідно прискорення $a_v(t) = dv_v/dt$. За таких умов різниця у витратах енергії зумовлюється переважно силами опору, що діють на електромобіль, а також довжиною та топологічним профілем маршруту. Механічна робота визначається інтегруванням механічної потужності в часі. Разом із тим стандартні цикли не претендують на повне відтворення конкретних умов реального трафіку, погодних факторів чи індивідуальної поведінки водія; у сучасній літературі це розглядається як відоме обмеження методики стандартизованих випробувань [154].

У даному дослідженні цикл WLTC Class 3b застосовано саме як відтворюваний еталонний профіль швидкості для подальшого порівняння механічної роботи на альтернативних маршрутах.

2.5. Розрахунок витрат механічної енергії на подолання маршруту містом за циклом WLTC

Для розрахунку механічної енергії розглянуто тестовий цикл WLTC Class 3b, тахограма швидкості якого зображена на рис. 2.11, а основні параметри фаз наведено в таблиці 2.4 [73].

Для оцінки ступеня впливу топології маршруту на витрати механічної роботи електромобіля вирішуються такі задачі:

- 1) визначити вплив ухилу дороги (підйом/спуск) на витрати механічної енергії електромобіля;
- 2) оцінити потенційну кількість механічної енергії, яка може бути рекуперована під час руху на підйомі та на спуску;
- 3) оцінити можливість забезпечення необхідного зчеплення з дорогою під час реалізації циклу WLTP Class 3b на підйомах.

Для ілюстрації використано дані електромобіля Nissan Leaf AZE0 (2014), зовнішній вид якого наведено на рис. 2.12, а геометричні та аеродинамічні параметри у таблиці 2.5.

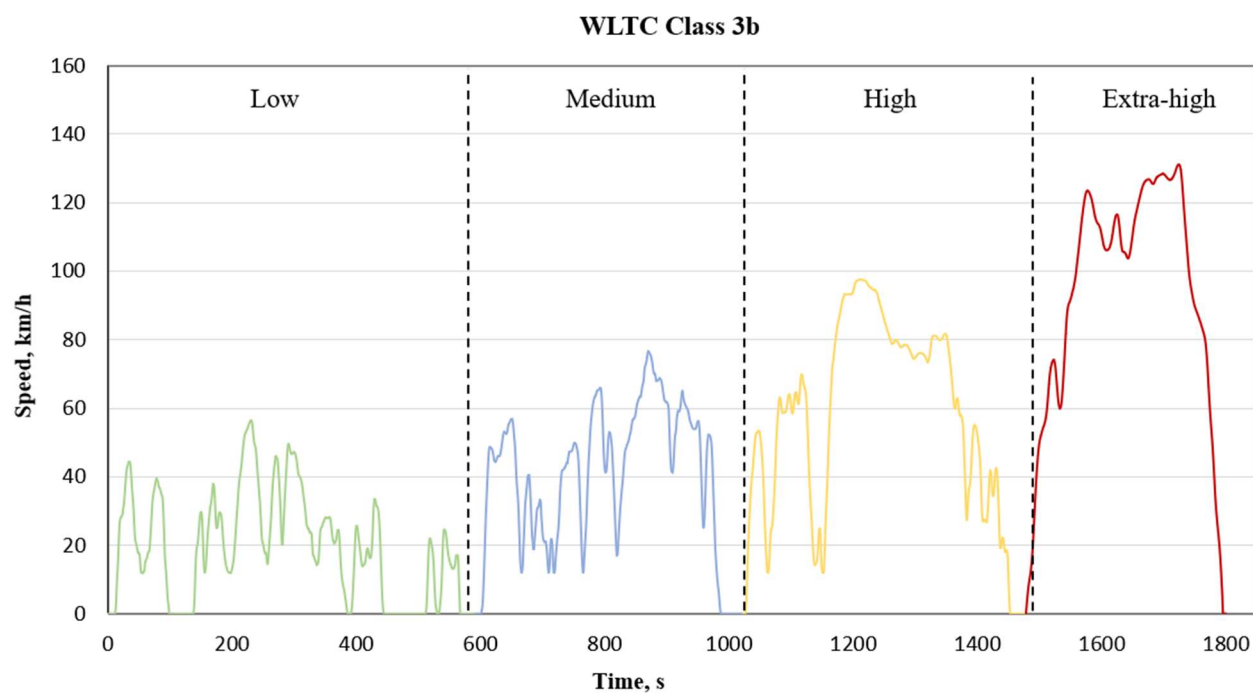


Рис. 2.11 Стандартний тестовий цикл WLTC, class 3

Таблиця 2.4 WLTP Class 3b cycle [73]

Phase	Duration	Stop duration	Distance	p_{stop}	v_{max}	v_{ave} w/o stops	v_{ave} w/ stops	a_{min}	a_{max}
	s	s	m	%	km/h	km/h	km/h	m/s ²	m/s ²
Low 3	589	156	3095	26,5	56,5	25,7	18,9	-1,47	1,47
Medium 3-2	433	48	4756	11.1%	76.6	44.5	39.5	-1.49	1.57
High 3-2	455	31	7162	6,8	97,4	60,8	56,7	-1,49	1,58
Extra-High -3	323	7	8254	2,2	131,3	94,0	92,0	-1,21	1,03
Total	1800	242	23266						

Продовження таблиці 2.4

де Low_3, Medium 3-2, High 3-2, Extra-High 3 – позначки, що відповідають відрізкам на графіку тахограми Low, Medium, High, Extra-High;
Duration – загальна тривалість кожного з відрізків, с;
Stop Duration – тривалість повних зупинок на відрізку, с;
Distance – дистанція відрізку, м;
P_{stop} – відношення тривалості повних зупинок до тривалості всього відрізку, %;
v_{max} – максимальна швидкість на відрізку, км/год;
v_{ave} w/o stops – середня швидкість без врахування повних зупинок, км/год;
v_{ave} w/ stops – середня швидкість з врахуванням зупинок, км/год;
a_{min} – мінімальне прискорення на відрізку, м/с ² ;
a_{max} – максимальне прискорення на відрізку, м/с ² .

Таблиця 2.5 Nissan Leaf AZE0 (2014)

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Маса	m_v	1498	кг
Максимальна вантажопідйомність	—	440	кг
Колісна база, м	$l_{vfront} + l_{vrear}$	2,7	м
Відстань від центру мас до задньої осі	l_{vrear}	1,17	м
Відстань від центру мас до передньої осі	l_{vfront}	1,53	м
Фронтальна ефективна площа	S_{vfront}	2,27	м ²
Радіус колеса	r_d	0,3162	м
Висота прикладення аеродинамічної сили	h_w	0,75	м

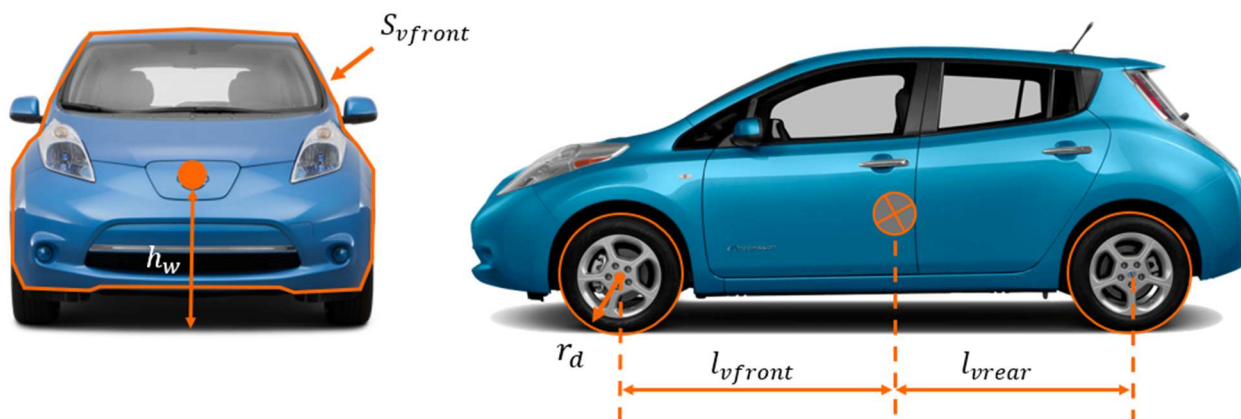


Рис. 2.12 Зовнішній вигляд Nissan Leaf AZE0 (2014)

Початкові умови розрахунку.

Приймаються такі умови:

- транспортний засіб завантажено до максимально допустимої маси;
- швидкість вітру дорівнює нулю ($v_w=0$);
- коефіцієнт тертя (зчеплення) шин з покриттям однаковий для всіх коліс і відповідає сухому асфальту;
- коефіцієнт зчеплення колес з поверхнею дороги є максимальним;
- цикл виконується за сталого ухилу (рух вгору, або під гору);
- маршрут прямолінійний (без поворотів);
- коефіцієнт аеродинамічного опору прийнято $C_d = 0,29$ (легковий автомобіль);
- довжини ділянок підйому та спуску рівні для коректного порівняння.

Умови забезпечення необхідної механічної тягової сили за ідеальної сухої погоди при різних кутах підйому отримано шляхом розрахунку відносних сил опору руху, нормованих на вагу електромобіля, згідно з умовою (2.23). Результати наведено в таблиці 2.6.

З таблиці 2.6 видно, що граничний кут, за якого виконання окремих фаз циклу WLTC Class 3b стає неможливим, розташований у діапазоні від 10° до 15° . При $\theta = 15^\circ$ умова зчеплення не виконується для фаз Low 3, Medium 3-2 і High

3-2, тоді як для фази Extra-High 3 необхідна відносна сила залишається меншою за максимально доступну. При $\theta = 17^\circ$ умова зчеплення не виконується для всіх розглянутих фаз. При цьому сам рух вгору залишається можливим, однак фактичні прискорення будуть меншими за задані циклом.

Таблиця 2.6 Перевірка умов зчеплення для WLTP Class 3b

θ°	max	Low 3	Medium 3-2	High 3-2	Extra-High - 3
0	0,42	0,1767	0,1782	0,1822	0,1214
5	0,4184	0,2629	0,2644	0,2684	0,2076
10	0,4136	0,3483	0,3498	0,3538	0,293
15	0,406	0,4321	0,4336	0,4376	0,3768
17	0,401	0,4651	0,4666	0,4666	0,4098
де max – максимально можлива відносна сила тяги за заданих умов зчеплення, в.о; Low 3, Medium 3-2, High 3-2, Extra-High -3 – відносні сили опору руху для відповідних фаз WLTP Class 3b, в.о.					

Середню механічну силу опору руху електромобіля Nissan Leaf AZE0 під час виконання WLTP Class 3b на прямолінійній ділянці без вітру залежно від кута ухилу наведено в таблиці 2.7. Від’ємні значення F_{DWH} відповідають режимам, у яких механічна складова може потенційно бути використана як джерело рекуперації.

З отриманих даних впливають такі проміжні висновки:

1. Наявність від’ємних значень F_{DWH} вказує на потенціал рекуперації, однак він не реалізується повністю через обмеження тягового інвертора, допустимої потужності рекуперації, характеристик заряду АКБ та відсутності швидкодіючих буферів енергії (наприклад, суперконденсаторів);

2.5.1. Оцінка витрат механічної роботи на міських альтернативних маршрутах

У світі широко застосовуються картографічні сервіси, які будують кілька альтернативних маршрутів між точками А та В за критеріями часу або довжини. Одним із найпоширеніших є Google Maps [155]. У контексті використання EV більш енергоефективним слід вважати маршрут, що потребує меншої механічної роботи та/або забезпечує більший потенціал рекуперації.

Нехай за даними карти відомі висоти точок маршруту h_{i-1} та h_i і довжина відрізка Δl_i між ними (рис. 2.13). Тоді кут ухилу на відрізку можна визначити як:

$$\theta_i = \arcsin\left(\frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta l_i}\right). \quad (2.53)$$

де θ_i – кут ухилу на i -му відрізку, рад; h_i, h_{i-1} – висоти сусідніх точок, м; Δl_i – горизонтальна довжина відрізка, м.

Далі, залежно від знака θ_i , вибирається середня сила опору руху:

- при $\theta_i > 0$: $F_{UPH,i}$, кН;
- при $\theta_i < 0$: $F_{UPH,i}$, кН.

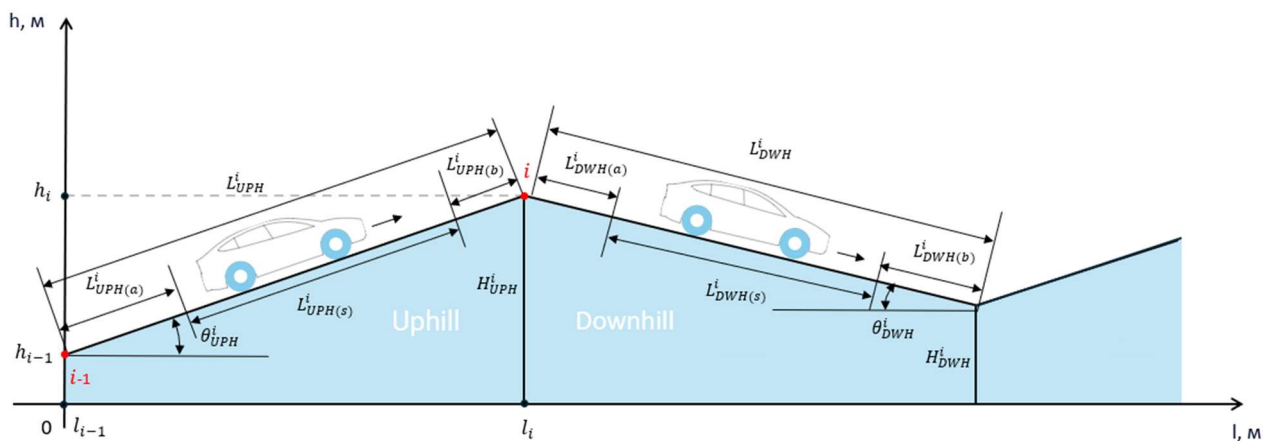


Рис. 2.13 Фрагмент шляху з врахуванням топологічного профілю

Механічна робота на i -му відрізку:

$$A_i = F_i \Delta l_i, \text{ Дж} \quad (2.54)$$

де A_i – робота на i -му відрізку, Дж; $F_i \in \{F_{UPH,i}, F_{DWH,i}\}$ – середня сила опору руху, Н; Δl_i – довжина відрізка, м.

Сумарна робота на маршруті визначається як:

$$A_r = \sum_{i=1}^N A_i = \sum_{i=1}^n F_i \Delta l_i, \text{ Дж} \quad (2.55)$$

де A_r – сумарна механічна робота на маршруті, Дж; N – кількість відрізків.

Питома механічна робота на довжині маршруту визначається як:

$$w_r = \frac{1}{L_r} \sum_{i=1}^N A_i = \frac{1}{L_r} \sum_{i=1}^N F_i \Delta l_i, \text{ Дж/м} \quad (2.56)$$

де w_r – питома механічна робота, Дж/м; $L_r = \sum_{i=1}^N \Delta l_i$ – горизонтальна довжина маршруту, м.

Розглянемо альтернативні маршрути М1–М3 у межах міського режиму руху, прокладені між точками: А (48,456114397, 35,061369162) та В (48,402689292, 35,035176273), країна Україна, м. Дніпро, як показано на рис. 2.14. Для порівняння обрано маршрути М1 і М2 однакової довжини $L = 8.1$ км, що мають різні топологічні профілі, наведені на Рис. 2.15.

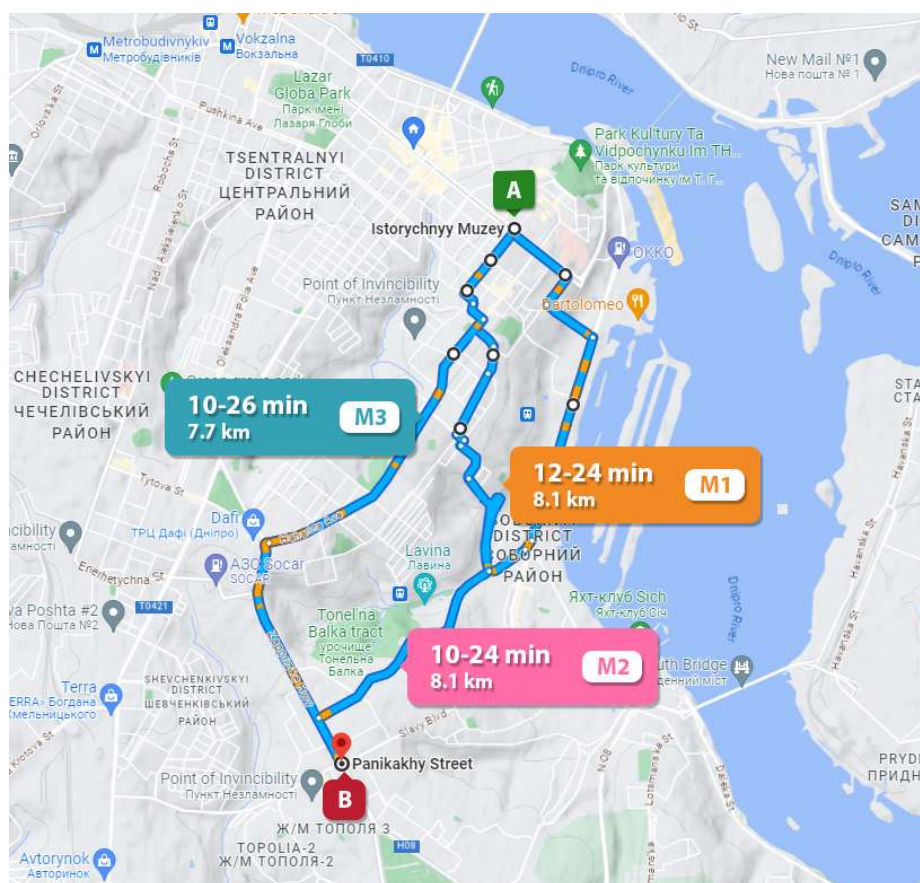


Рис. 2.14 Маршрути руху, країна Україна, м. Дніпро [155]

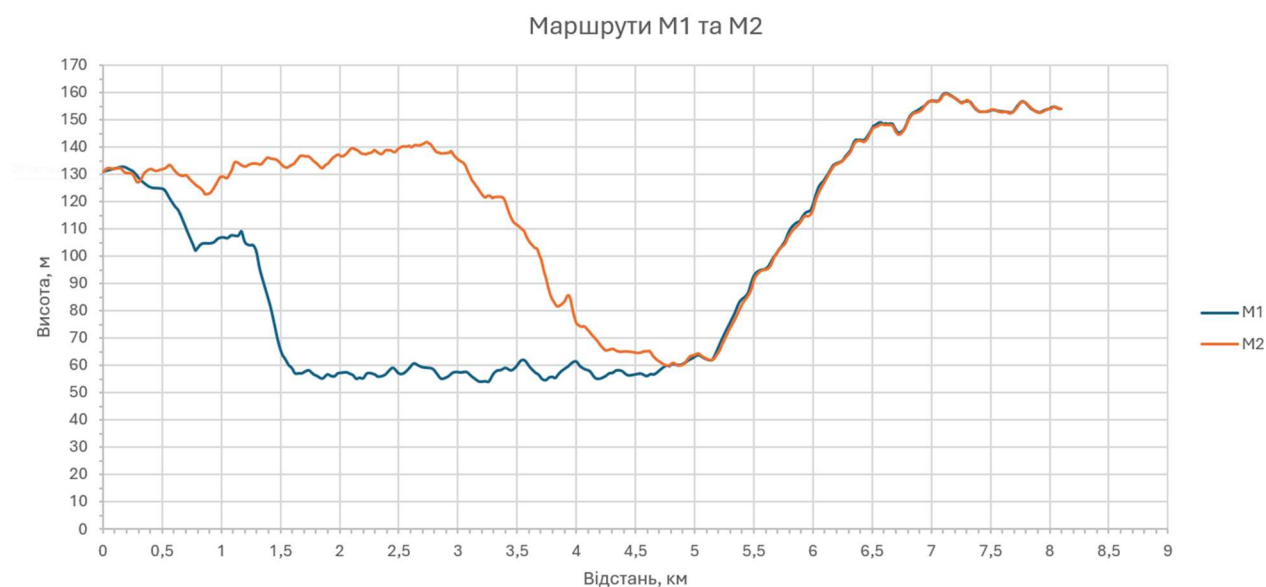


Рис. 2.15 Графік топології шляхів М1 та М2

Оскільки рух відбувається у міському режимі, для оцінювання використано суміжну фазу WLTP Low-3 + Medium-3-2. Результати розрахунків для маршрутів М1 та М2 наведено на Рис. 2.16 і Рис. 2.17, де ділянки потенційної рекуперації позначено червоним кольором.

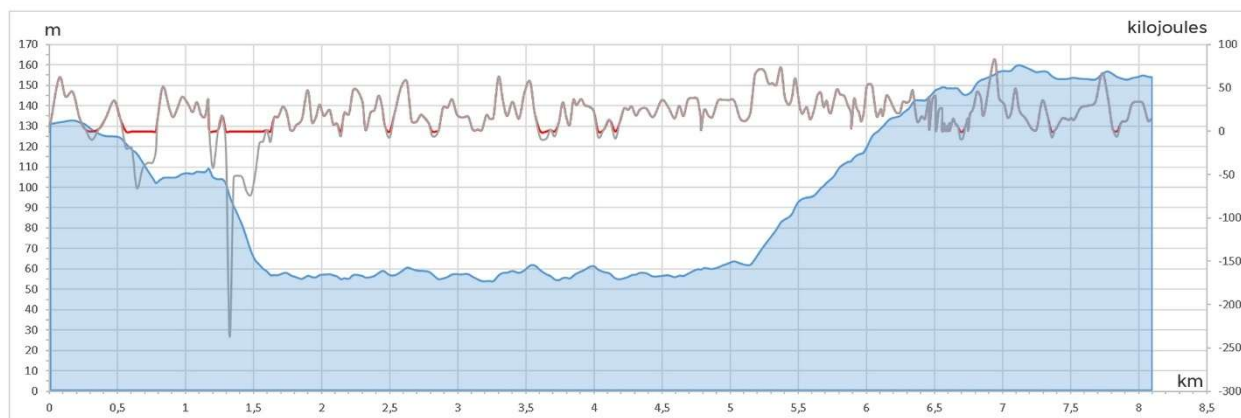


Рис. 2.16 Результати розрахунків для шляху М1



Рис. 2.17 Результати розрахунків для шляху М2

Таблиця 2.8 Механічна робота на подолання шляхів М1 та М2

Маршрут	Робота А без урахування рекуперації, кДж	Робота А з урахуванням рекуперації, кДж
М1	5927,1	4898,2
М2	5787,11	5068,6

Отримані результати показують, що без урахування рекуперації маршрут М1 потребує більшої механічної роботи порівняно з маршрутом М2. Водночас за урахування потенціалу рекуперації результуюче значення механічної роботи для маршруту М1 є меншим, ніж для маршруту М2. Для маршруту М1 потенційне зменшення становить 1028,9 кДж, а для маршруту М2 – 718,51 кДж. У реальному електроприводі BEV кількість поверненої до АКБ енергії буде меншою через втрати під час перетворення та обмеження системи рекуперації.

Алгоритм розрахунку питомої енергії електромобіля зображено на Рис. 2.18 – Рис. 2.20.

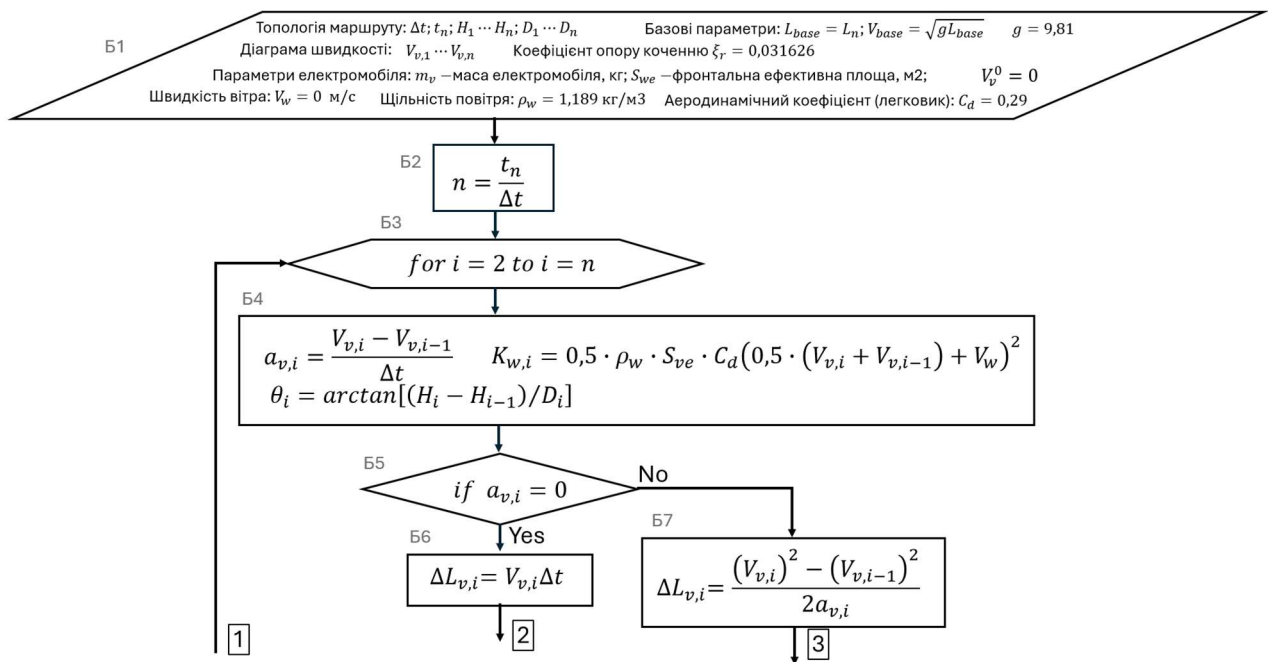


Рис. 2.18 Алгоритм розрахунку питомої енергії електромобіля (частина № 1)

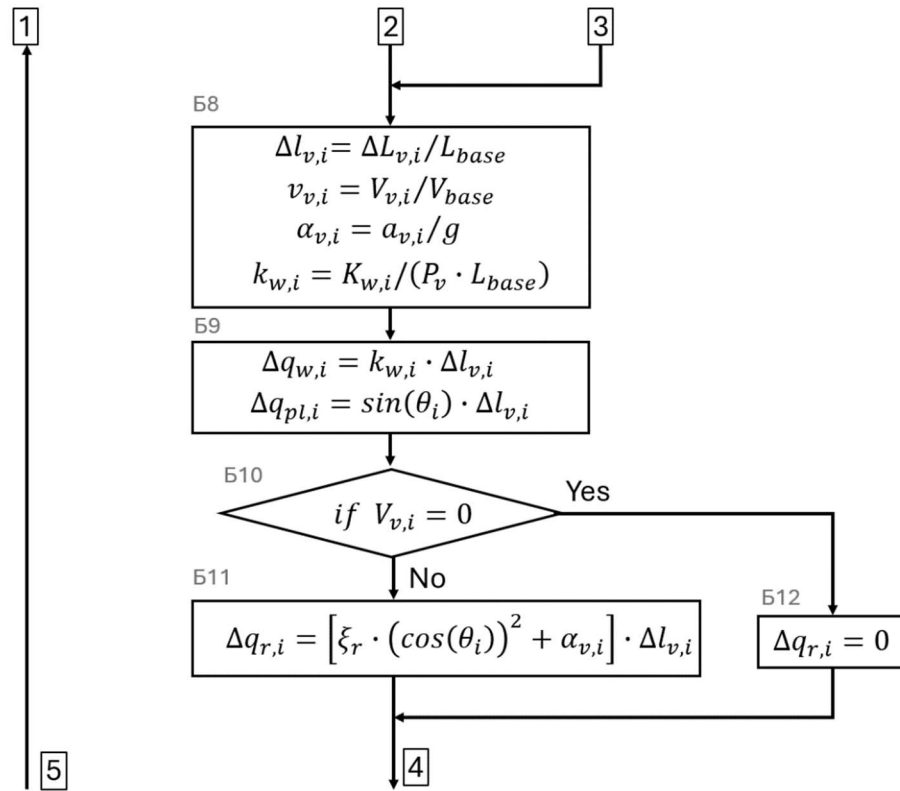


Рис. 2.19 Алгоритм розрахунку питомої енергії електромобіля (частина № 2)

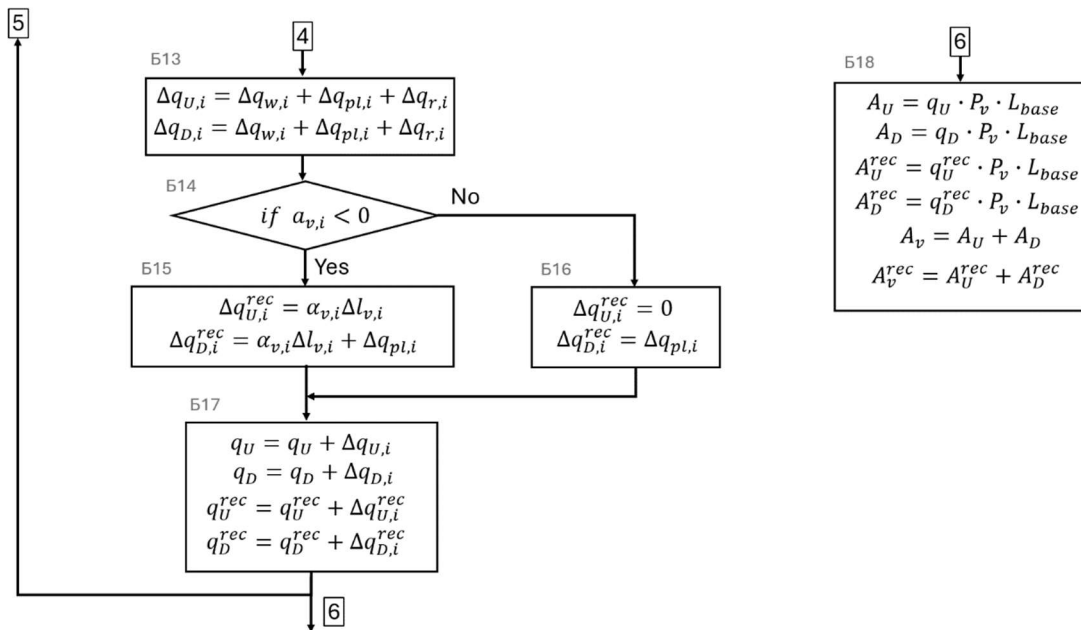


Рис. 2.20 Алгоритм розрахунку питомої енергії електромобіля (частина № 3)

Далі виконано розрахунок витрат механічної енергії руху електромобіля на довгих міжміських маршрутах європейськими дорогами з використанням альтернативних шляхів, запропонованих сервісом Google Maps [155]. У

наведених прикладах сервіс рекомендує передусім шлях із мінімальним часом руху, що переважно пов'язано з вищою середньою швидкістю, тоді як енергетичний вплив топологічного профілю маршруту окремо не відображається в рекомендації. Водночас наявність підйомів і спусків може суттєво змінювати баланс механічної роботи та потенціал рекуперації, що є особливо важливим для електромобілів.

Розрахунки виконано для електромобіля Nissan Leaf AZE0 за уніфікованих режимів руху, прийнятих відповідно до фаз циклу WLTC Class 3b. Для кожного з маршрутів аналізовано абсолютну механічну роботу руху A_r та питому механічну енергію руху w_r , приведену до 1 км шляху.

Маршрут №1 наведений на рис. 2.21. Він містить три альтернативні шляхи між точками А (43.71789929392304, 10.947922298009528) і В (43,878485734425404, 11,064863491157336), країна Італія, м. Флоренція. Шлях №1 рекомендований як найшвидший, однак є найдовшим: $L_1 = 42,155$ км при середній швидкості $V_{md} = 70$ км/год. Для Шляху №2 $L_2 = 28,748$ км та $V_{md} = 45$ км/год, для Шляху №3 $L_3 = 31,128$ км та $V_{md} = 40$ км/год. Таким чином, рекомендація сервісу формується переважно за критерієм часу, який узгоджується із більшою середньою швидкістю.

Значення питомої механічної роботи w_r наведено в таблиці 2.9, а результати розрахунку сумарної механічної роботи A_r для шляхів маршруту № 1 – у таблиці 2.10. Розподіл енергії вздовж профілю кожного зі шляхів показано на Рис. 2.22–Рис. 2.24.

Аналіз локальних ділянок (Рис. 2.25) демонструє, що топологічні зміни спричиняють характерну нерівномірність енерговитрат: на підйомах спостерігаються зони підвищення механічної роботи, а під час руху під гору потенційні зони рекуперації. За формою розподілу енергії вздовж траєкторії не завжди можливо однозначно визначити найбільш економічний шлях, тому доцільно порівнювати маршрути за інтегральними показниками A_r та w_r .

З даних таблиці 2.10 видно, що найменша сумарна механічна робота в межах маршруту № 1 відповідає шляху № 2, що пояснюється його меншою довжиною. Однак для коректного порівняння шляхів різної довжини доцільно використовувати питому механічну роботу w_r , наведену в таблиці 2.9. З її значень випливає, що мінімальне значення w_r спостерігається на шляху № 1, а найбільше на шляху № 3.

Отже, для маршруту № 1 шлях № 1 є найкращим за критеріями мінімального часу руху та найменших питомих витрат механічної енергії, однак потребує найбільшої сумарної механічної роботи через максимальну довжину. Компромісним варіантом з погляду поєднання часу руху та витрат механічної енергії може бути шлях № 2.

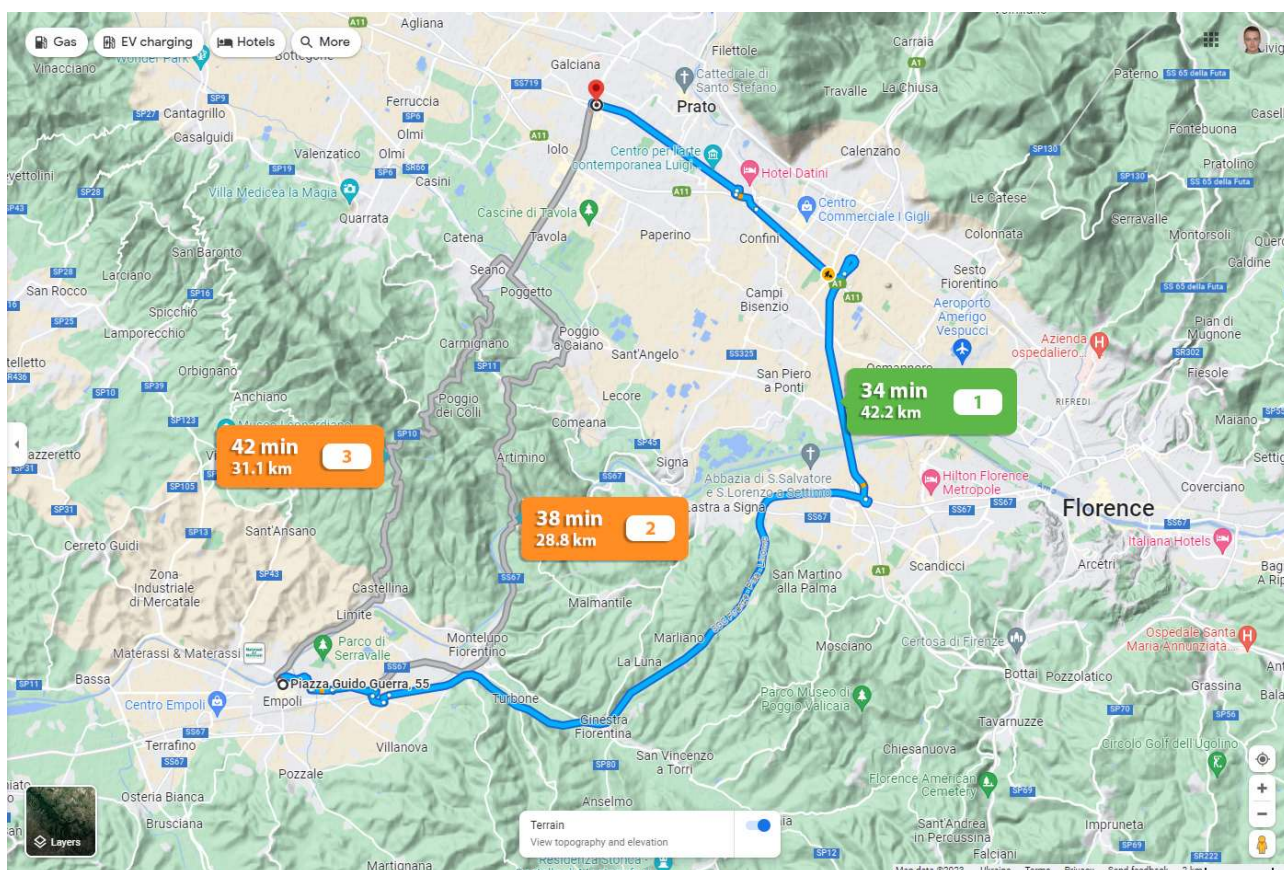


Рис. 2.21 Маршрут № 1 [155]

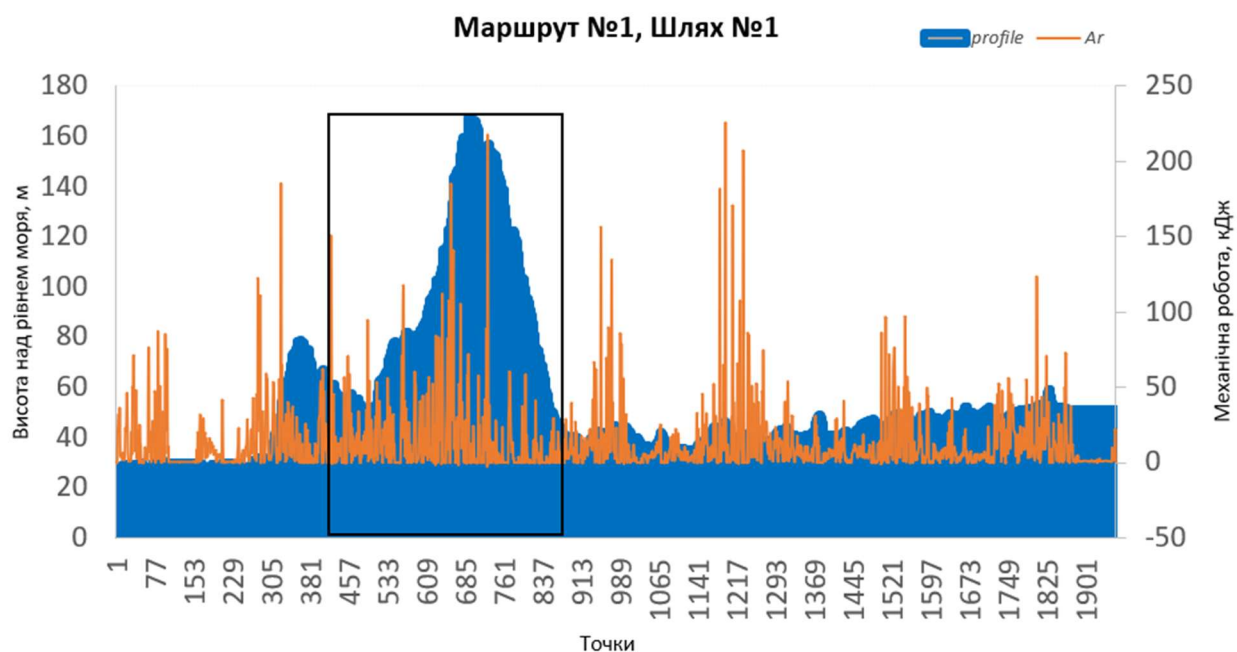


Рис. 2.22 Розподіл енергії руху вздовж маршруту № 1 шляху № 1

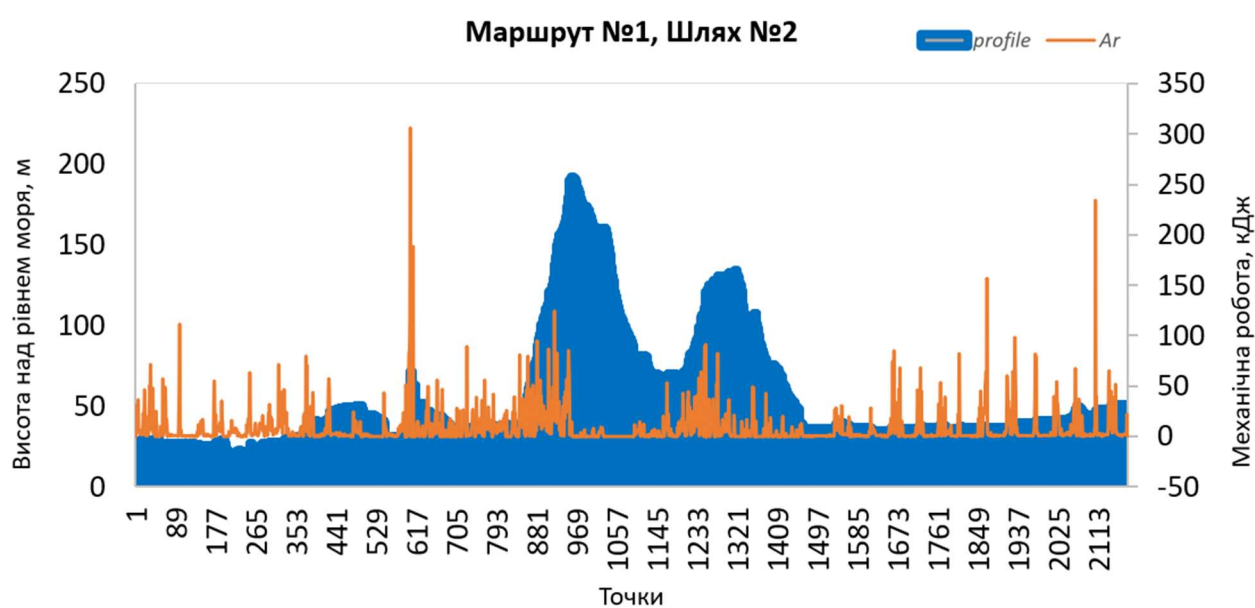


Рис. 2.23 Розподіл енергії руху вздовж маршруту № 1 шляху № 2

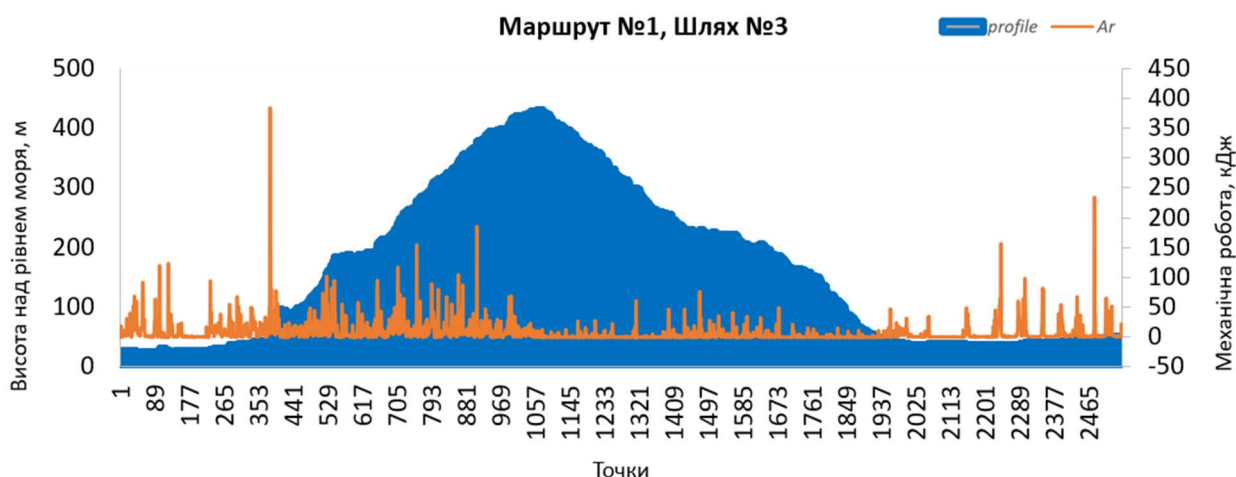


Рис. 2.24 Розподіл енергії руху вздовж маршруту № 1 шляху № 3

Аналіз рис. 2.22 – рис. 2.24 у більшому масштабі (наприклад, для рис. 1.7 – прямокутник) показує (рис. 2.25), що топологічний профіль шляху суттєво впливає на витрати енергії руху, але при цьому сказати однозначно, який шлях є найбільш економічним, неможливо.

Аналіз фрагмента рис. 2.22, виділеного прямокутником, у більшому масштабі на рис. 2.25 показує, що топологічний профіль шляху суттєво впливає на витрати енергії руху. Водночас лише за графічним розподілом енергії неможливо однозначно встановити найбільш економічний шлях без порівняння інтегральних показників.

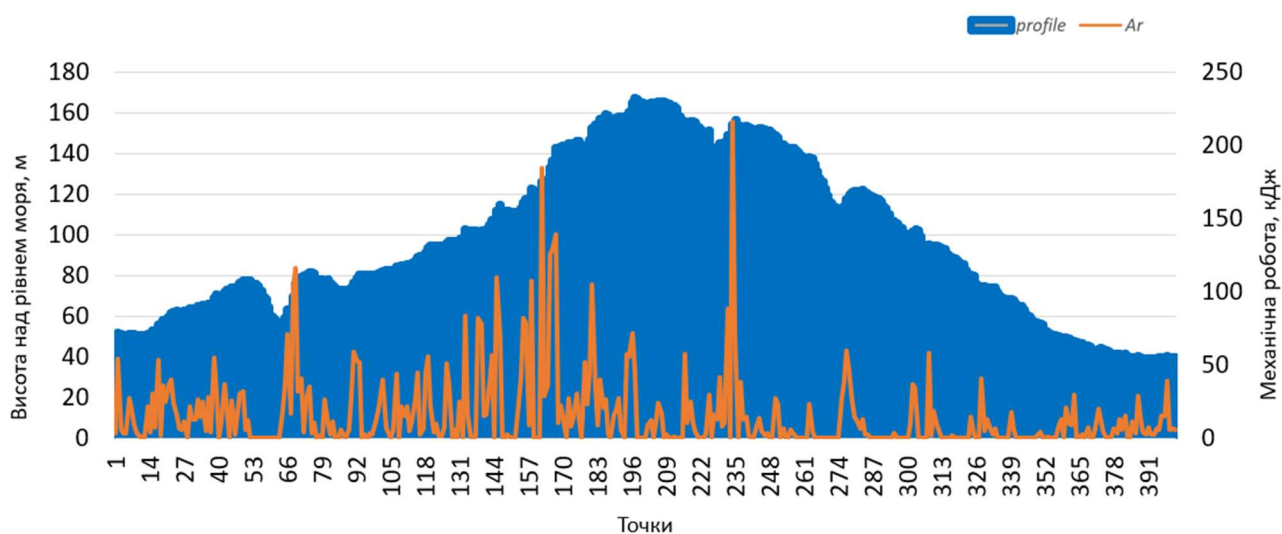


Рис. 2.25 Фрагмент розподілу енергії вздовж маршруту № 1 шляху № 1

Маршрут № 2 (Рис. 2.26) включає три альтернативні шляхи між точками А (46.963999175925174; 7,471610161254633) і В (47.11315221212322; 6,847009722281449), країна Швейцарія, м. Берн. На відміну від Маршруту № 1, цей випадок характеризується суттєво вираженим рельєфом (гірський профіль), що потенційно може радикально змінювати величини механічної роботи та рекуперації.

Шлях №1 рекомендований як найшвидший і найкоротший: $L_1 = 74,4$ км, при $V_{md} = 82$ км/год. Для Шляху № 2: $L_2 = 88,3$ км при $V_{md} = 79$ км/год. Для Шляху № 3: $L_3 = 80,8$ км при $V_{md} = 72$ км/год. Результати розрахунків механічної роботи подані в Таблиця 2.10, а розподіл енергії вздовж профілю на рис. 2.27–рис. 2.29.

Аналіз таблиці 2.9 та таблиці 2.10 показує, що для гірського маршруту рекомендований шлях № 1 не завжди є оптимальним з позиції енерговитрат. Для більшості режимів руху менші значення A_r та w_r забезпечуються іншими варіантами, а найменші питомі витрати механічної енергії у представлених даних відповідають Шляху №3. Водночас цей шлях характеризується найбільшим часом руху, оскільки має найнижчу середню швидкість серед розглянутих альтернатив.

Цей результат підтверджує, що у випадку вираженої топології критерій мінімального часу, якому переважно відповідає більша V_{md} , може бути недостатнім для оптимізації енергоефективності, оскільки внесок підйомів і спусків у механічну роботу є суттєвим.

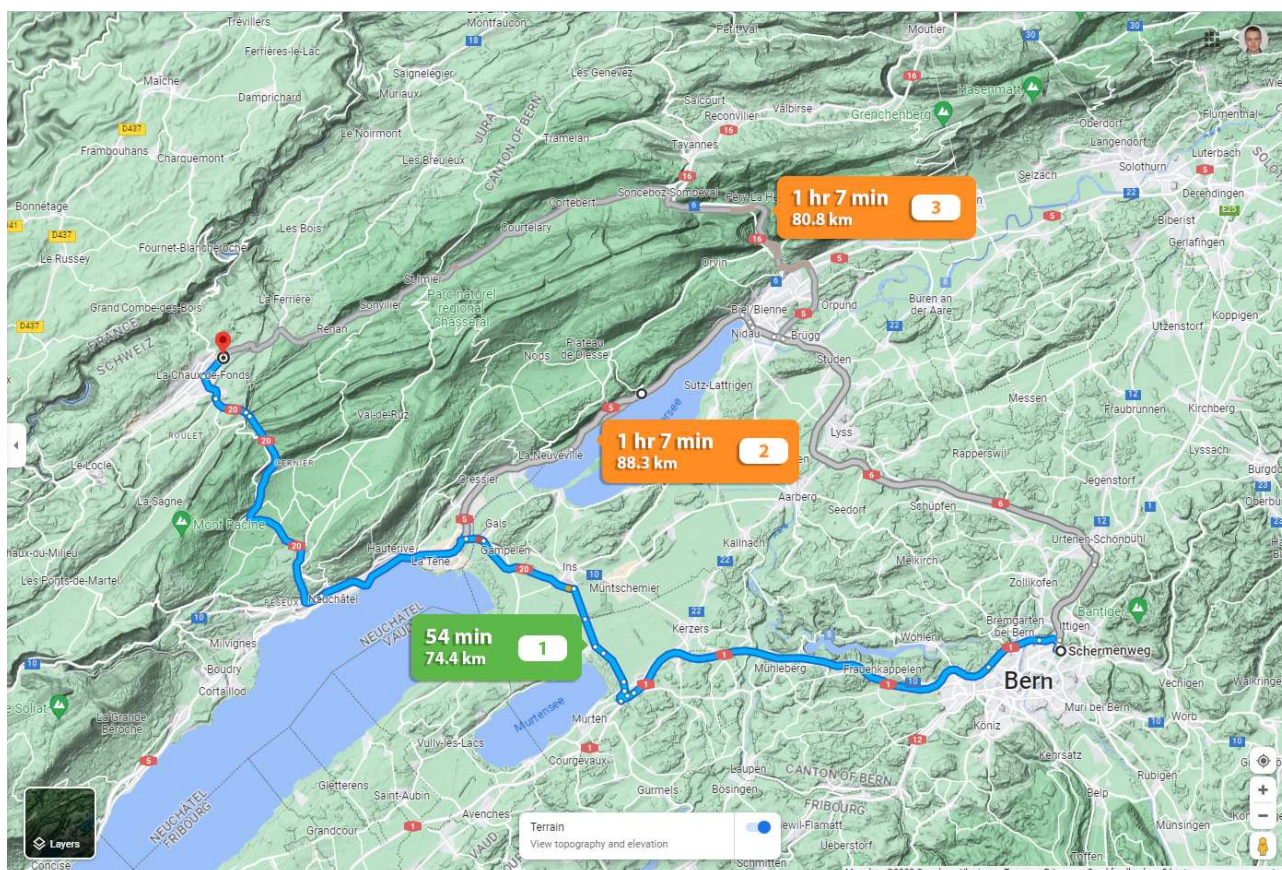


Рис. 2.26 Маршрут № 2 [155]

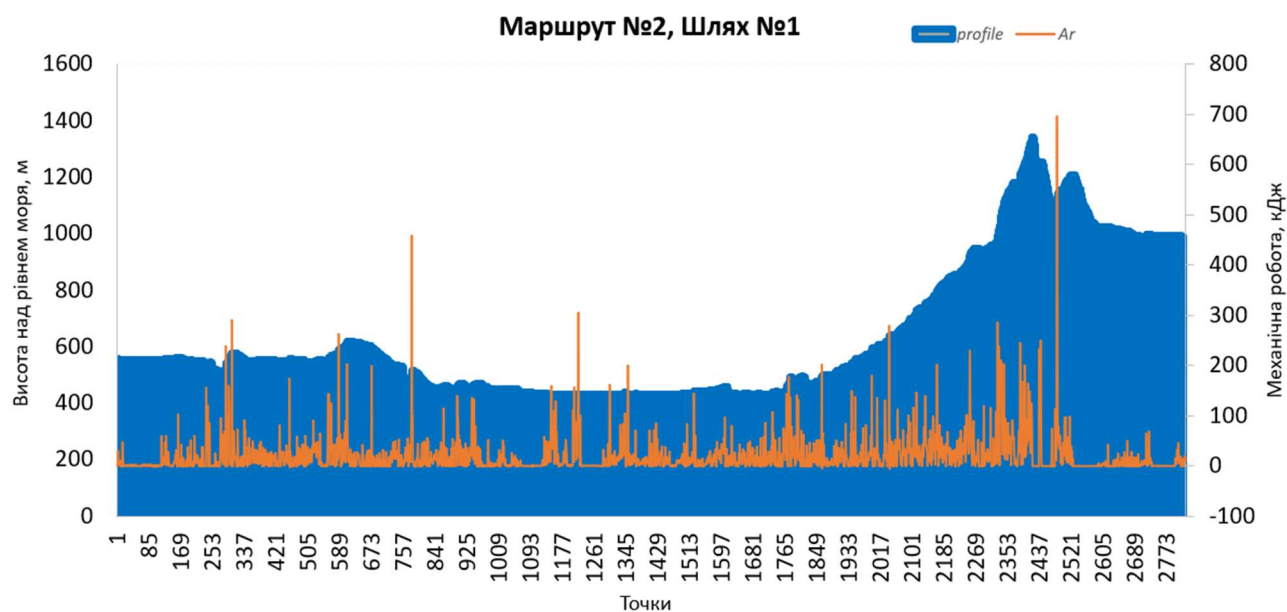


Рис. 2.27 Розподіл енергії руху вздовж маршруту № 2, шляху № 1

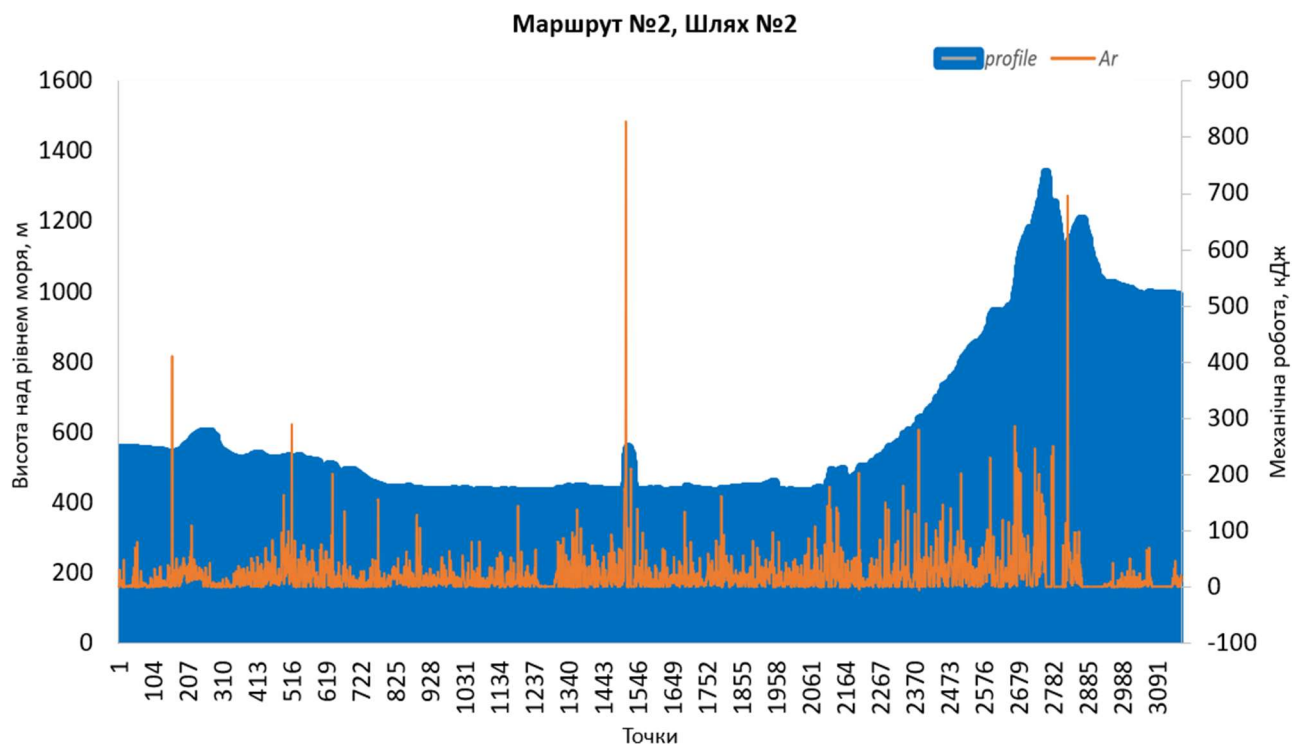


Рис. 2.28 Розподіл енергії руху вздовж маршруту № 2, шляху № 2

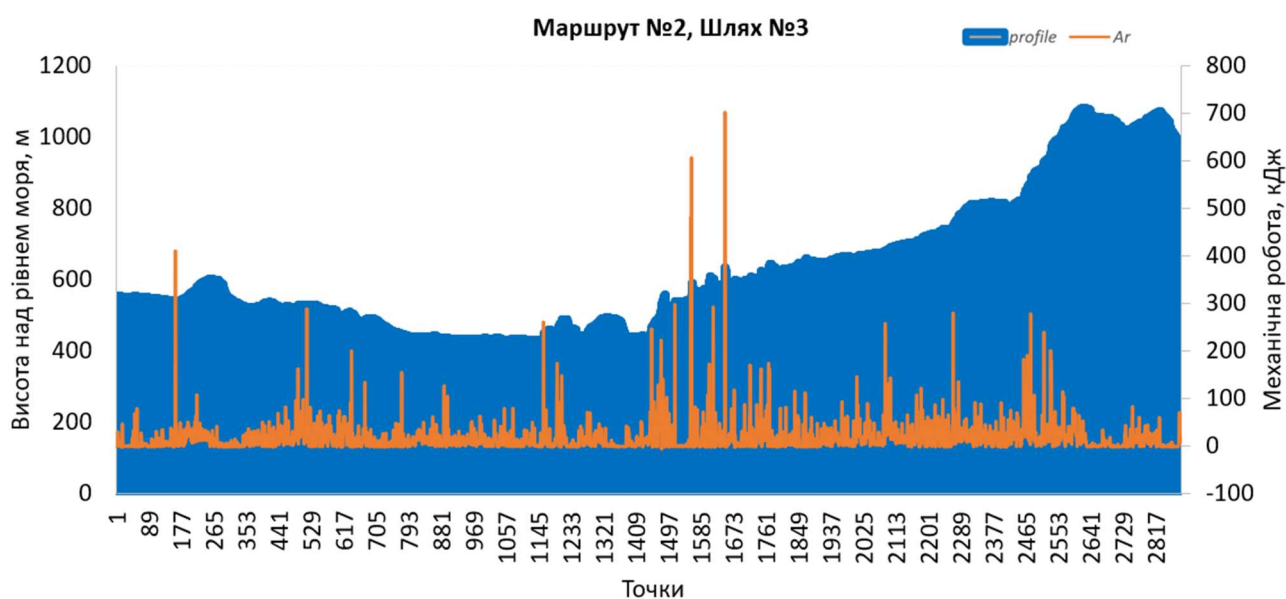


Рис. 2.29 Розподіл енергії руху вздовж маршруту № 2, шляху № 3

Маршрут № 3, представлений на рис. 2.30 включає три альтернативні шляхи між точками А (52.23276819594157, 21.02371654920637) і В (52,09260508750656, 20,930609215977057), країна Польщі, м. Варшава. Особливістю цього маршруту

є відсутність значних підйомів і спусків, що дозволяє перевірити методику вибору енергоефективного шляху в умовах переважно рівнинного рельєфу.

Шлях № 1 довжиною $L_1 = 22,9$ км і рекомендований як найшвидший $V_{md} = 59,7$ км/год, час 0,38 год. Для шляху № 2: $L_2 = 22,4$ км, $V_{md} = 49,8$ км/год. Для шляху №3: $L_3 = 27,6$ км, $V_{md} = 61,3$ км/год. Значення A_r наведено в таблиці 2.10, а розподіли енергії вздовж профілів на рис. 2.31–рис. 2.33.

З таблиці 2.10 випливає, що мінімальні сумарні витрати механічної роботи відповідають шляху № 2, що узгоджується з його найменшою довжиною та меншою середньою швидкістю. Водночас порівняння питомих витрат, наведених у таблиці 2.9, демонструє, що за незначної різниці топології між шляхами їх ранжування може змінюватися, а в окремих випадках довший шлях може мати порівнянні або навіть менші питомі витрати. Це пояснюється тим, що навіть на переважно рівнинних ділянках відмінності мікропрофілю, зокрема локальні ухили, а також частота переходів між режимами тяги та рекуперації можуть впливати на інтегральний показник w_r .

Отже, для маршруту № 3, за приблизно однакового часу руху, доцільно обирати компромісний варіант шляху № 2, який забезпечує мінімальні абсолютні енерговитрати та не має істотного програшу за питомими витратами.

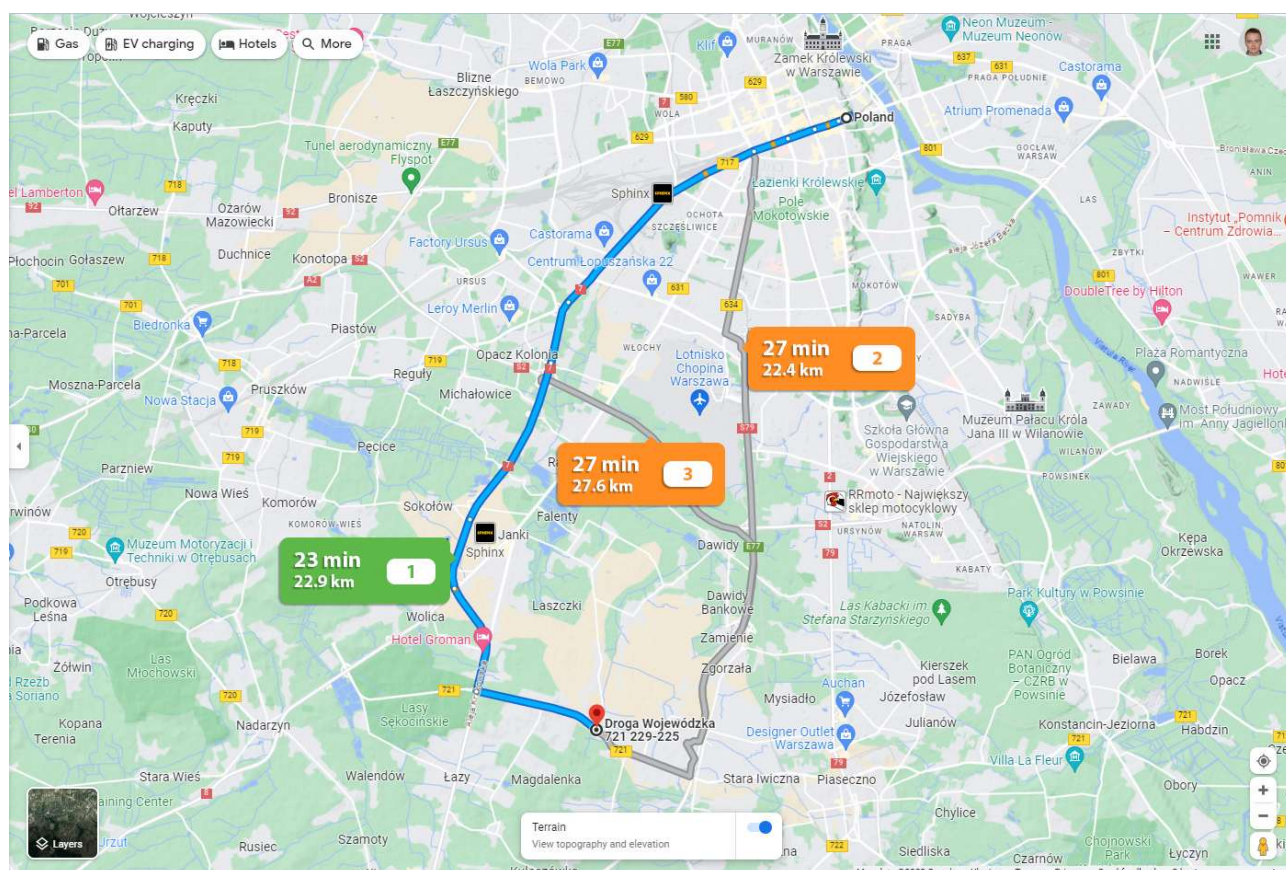


Рис. 2.30 Маршрут № 3 [155]

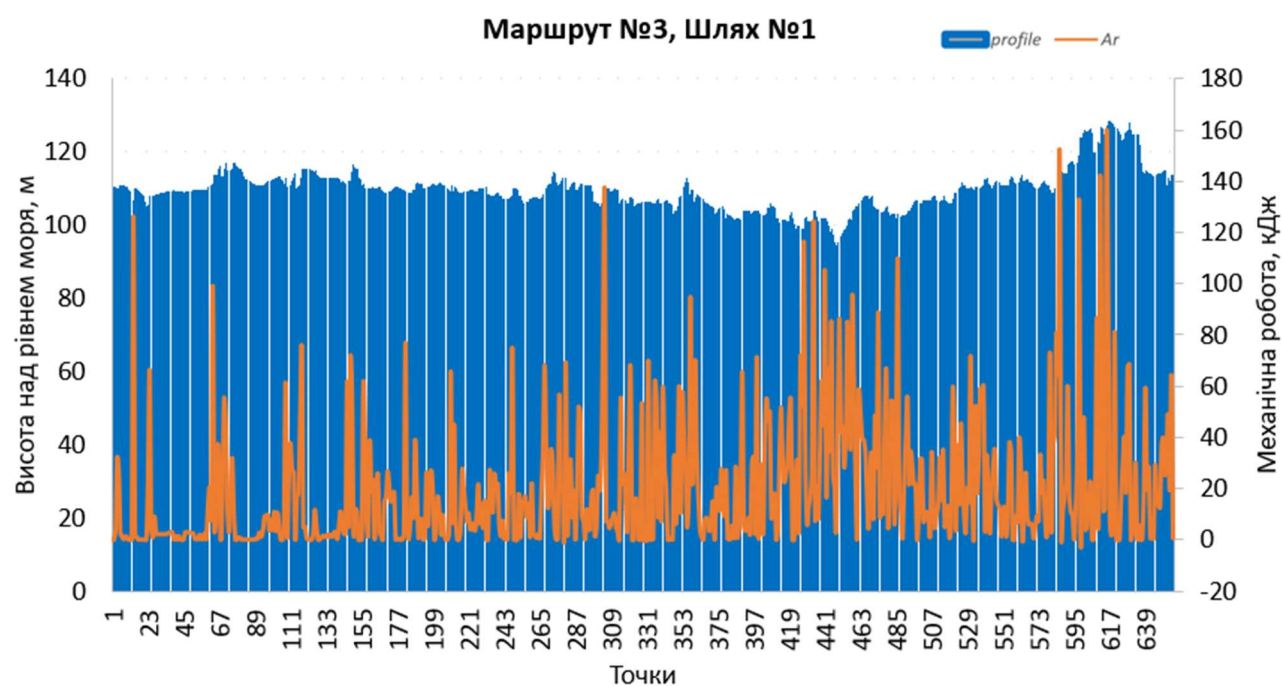


Рис. 2.31 Розподіл енергії руху вздовж маршруту № 3 шляху № 1

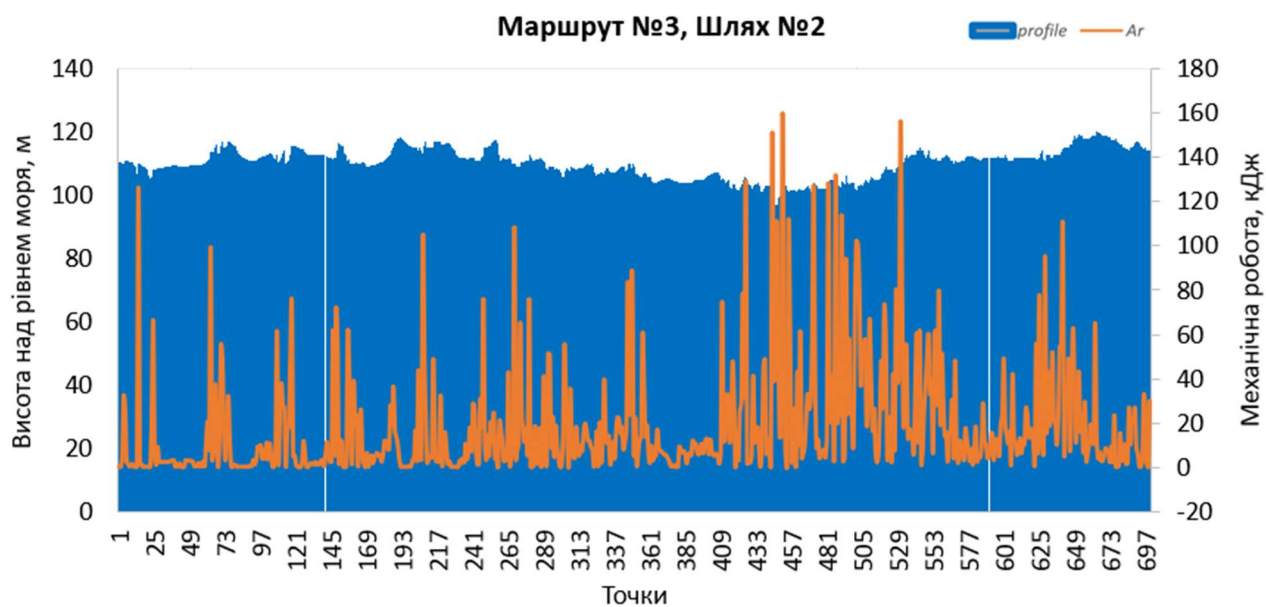


Рис. 2.32 Розподіл енергії руху вздовж маршруту № 3 шляху № 2

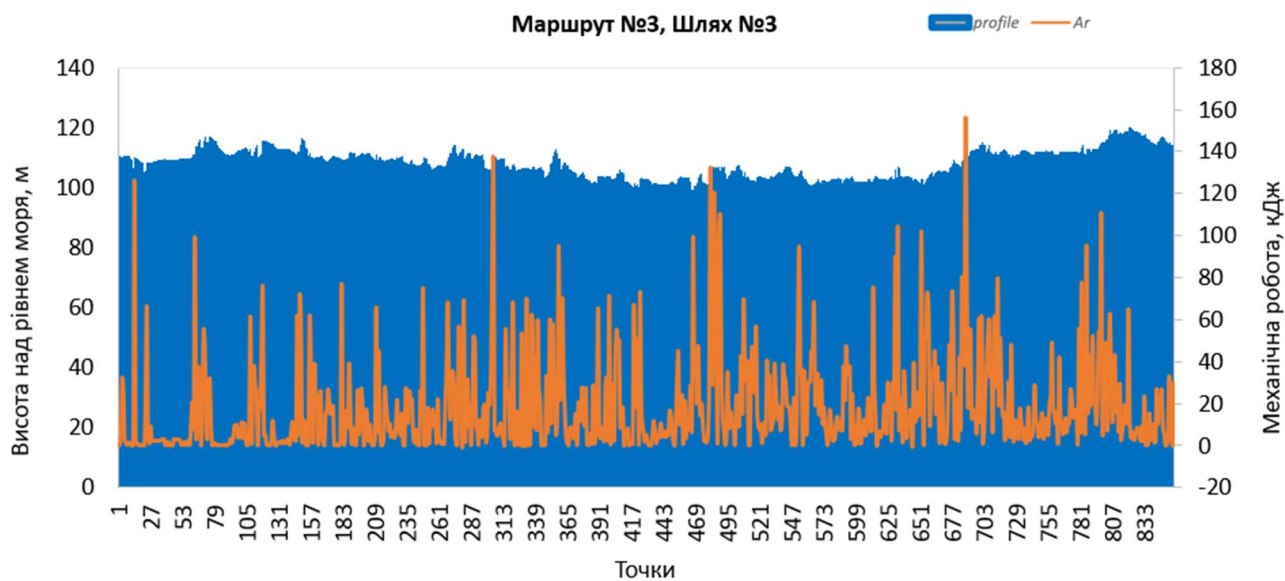


Рис. 2.33 Розподіл енергії руху вздовж маршруту № 3 шляху № 3

Таблиця 2.9 Питома механічна енергія руху w_r для маршрутів №1–3

№ маршруту	№ шляху	V_{md} ,	L	Low-3	Med_3-2	High_3-2	ExHi-3	Total_Cl-3b
		км/год	км	кДж/км	кДж/км	кДж/км	кДж/км	кДж/км
1	1	69,9	42,155	0,6105	0,6851	0,6671	0,7953	0,7080
	2	45,5	28,748	0,6566	0,7295	0,7120	0,8356	0,7517
	3	40,4	31,128	0,6837	0,7526	0,7360	0,8542	0,7738
2	1	81,8	74,425	0,795214	0,868539	0,850789	0,976863	0,891005
	2	78,9	88,281	0,757582	0,831652	0,813743	0,940412	0,85433
	3	72,3	80,816	0,723011	0,797606	0,779605	0,906738	0,820373
3	1	59,7	23,184	0,559255	0,638889	0,619739	0,754529	0,663062
	2	49,8	22,703	0,5557	0,637186	0,617656	0,754503	0,661745
	3	61,3	27,948	0,553564	0,634577	0,615068	0,752203	0,659220
				7	8	3	5	5

Таблиця 2.10 Сумарна механічна робота руху A_r для маршрутів №1–3

№ маршруту	№ шляху	V_{md} ,	L	Low-3	Med_3-2	High_3-2	ExHi-3	Total_Cl-3b
		км/год	км	кДж	кДж	кДж	кДж	кДж
1	1	69,88	42,155	25736,32	28882,45	28120,24	33526,04	29845,87
	2	45,47	28,748	18877,45	20973,11	20468,70	24022,70	21609,12
	3	40,42	31,128	21282,26	23427,28	22908,28	26589,99	24085,57
2	1	81,8	74,425	59183,9	64641,1	63320,0	72703,1	66313,1
	2	78,9	88,281	66880,2	73419,1	71838,1	83020,6	75421,2
	3	72,3	80,816	58430,9	64459,3	63004,6	73279,0	66299,3
3	1	59,7	23,184	12965,86	14812,12	14368,14	17493,14	15372,54
	2	49,8	22,703	12616,48	14466,51	14023,1	17130,05	15024,1
	3	61,3	27,948	15471,20	17735,39	17190,13	21022,83	18424,11
				9			3	3

За результатами аналізу міжміських маршрутів № 1–3 можна сформулювати такі проміжні висновки:

1. Рекомендації Google Maps, як правило, орієнтовані на мінімізацію часу руху та побічно на максимізацію середньої швидкості V_{md} , однак такий підхід не гарантує мінімальних енерговитрат для електромобіля, особливо на маршрутах з вираженим рельєфом. На маршруті № 2 (Швейцарія, гірський профіль) найшвидший шлях №1 має питомі витрати $w_r = 0.891$ кДж/км (Total Class 3b), тоді як шлях №3 забезпечує менше значення $w_r = 0,820$ кДж/км, що еквівалентно покращенню приблизно на 7,95%.

2. Для коректного порівняння альтернативних шляхів різної довжини необхідно враховувати не лише сумарну механічну роботу A_r , але і питомі витрати w_r приведені до 1 км. Абсолютний показник A_r характеризує загальну потребу в енергії на маршрут, тоді як w_r дозволяє порівнювати енергоефективність шляхів незалежно від їх довжини та є об'єктивнішим критерієм енергоефективності шляху як такого. Для маршруту № 1 (Італія) шлях №2 має найменшу абсолютну роботу $A_r = 21609.12$ кДж, що зумовлено меншою довжиною $L = 28.75$ км. Водночас за питомими витратами більш вигідним є шлях № 1 із $w_r = 0.708$ кДж/км порівняно зі шляхом №2 $w_r = 0.752$ кДж/км, тобто приблизно на 5,82% нижче.

3. Для маршруту із помірною топологією (Італія) найшвидший шлях може одночасно мати найменші питомі витрати, однак через більшу довжину споживати максимальну абсолютну енергію. У цьому випадку практично доцільним є компромісний вибір. Шлях № 1 є найшвидшим ($V_{md} = 69.9$ км/год)

4. та має мінімальні питомі витрати $w_r = 0.708$ кДж, але потребує найбільшої абсолютної роботи $A_r = 29845.87$ кДж через найбільшу довжину $L = 42.16$ км.

5. Шлях № 2 потребує найменшу абсолютну роботу $A_r = 21609,12$ кДж, але має низьку середню швидкість ($V_{md} = 45,5$ км/год) і має більші питомі витрати.

6. Для маршрутів із вираженою гірською топологією (маршрут № 2, Швейцарія) внесок ухилів у механічну роботу є визначальним, тому шлях, рекомендований як найшвидший, може поступатися альтернативним за енергоефективністю. Це підтверджує необхідність врахування топологічного профілю при виборі маршруту для електромобіля. Значення w_r для маршруту №2 (Total Class 3b) знаходяться в межах 0.820–0.891 кДж/км, тоді як для рівнинного маршруту № 3 (Польща) 0,659-0,663 кДж/км, тобто гірський профіль збільшує питомі витрати приблизно на 23,7–35,2%.

7. Для переважно рівнинних маршрутів (маршрут № 3, Польща) вплив топології є мінімальним, а ранжування шляхів здебільшого визначається довжиною та режимами руху. Водночас навіть у таких умовах питома енергія може змінюватися через відмінності мікропрофілю та локальної динаміки руху. Для всіх трьох шляхів маршруту №3 питомі витрати майже однакові: w_r 0,663;0,662;0,659 кДж/км, а максимальне відхилення між шляхами не перевищує 0,58%. При цьому мінімальну абсолютну роботу має шлях № 2: $A_r = 15024.1$ кДж за довжини $L = 22,7$ км.

8. Обрані для аналізу маршрути охоплюють різноманітні умови рельєфу (рівнинний, помірний та гірський профіль), що забезпечує комплексну оцінку розробленої методики та демонструє її чутливість до топологічного фактору.

- помірний профіль, Італія, маршрут №1: $w_r = 0,708\text{--}0,774$ кДж/км;
- виражений гірський профіль, Швейцарія, маршрут №2: $w_r = 0,820\text{--}0,891$ кДж/км;
- переважно рівнинний профіль, Польща, маршрут №3: $w_r = 0,659\text{--}0,663$ кДж/км.

Загальний діапазон питомої механічної роботи в проведених дослідженнях становить 0,659–0,891 кДж/км, що підтверджує чутливість енергетичних показників до топологічного профілю маршруту та прийнятого режиму руху.

Розрахована механічна робота на колесах є фізичною основою електроспоживання BEV, оскільки витрати електричної енергії тягової

аккумуляторної батареї визначаються необхідною механічною енергією з урахуванням ефективності силового тракту та можливостей рекуперативного гальмування. При цьому врахування частки механічної енергії, що потенційно може бути повернена в АКБ під час спусків і гальмувань, дає змогу оцінити потенційний ефект збільшення запасу ходу за рахунок рекуперації. Реальний обсяг відновленої енергії визначається конструктивними особливостями електропривода та енергосистеми (гранична приймальна потужність АКБ, можливості інвертора/електродвигуна), а також алгоритмом керування рекуперативним гальмуванням і його обмеженнями за зчепленням та стабільністю руху.

Запропонована модель, за прийнятих припущень, зокрема уніфікованого профілю швидкості WLTC, заданих параметрів транспортного засобу та однакових умов навколишнього середовища, є достатньою для порівняльного оцінювання скінченного набору альтернативних маршрутів, сформованих картографічними сервісами. Для вибору маршруту необхідно спільно аналізувати сумарну механічну роботу A_r та питому механічну роботу w_r . Мінімальне значення w_r характеризує енергоефективність шляху незалежно від його довжини, однак не завжди відповідає мінімальним сумарним витратам енергії на конкретну поїздку.

Методика може бути застосована до різних BEV за умови врахування їх основних фізичних параметрів: маси, фронтальної площі, коефіцієнтів аеродинамічного опору та опору коченню. Зміна ККД електропривода та споживання допоміжних систем, зокрема HVAC і мультимедійного обладнання, можуть бути враховані як додаткові складові енергетичного балансу. У наведених розрахунках основним критерієм порівняння є механічна робота, зумовлена довжиною, топологією шляху та потенціалом часткового відновлення енергії в рекуперативних режимах.

2.6. Вплив кроку дискретизації маршруту на результати розрахунку механічної роботи

Для прогнозування витрат енергії руху електромобіля необхідно мати адекватний опис просторової геометрії маршруту та його топологічного профілю. Одним із ключових факторів, що визначають точність такого опису, є крок дискретизації маршруту – відстань між сусідніми точками, для яких задаються координати широта, довгота та висота. Дискретизація визначає, наскільки точно відтворюються геометричні особливості траєкторії, зокрема проходження поворотів, а також локальні підйоми й спуски, які впливають на величину сили скочування та інтегральну механічну роботу руху.

У практичних картографічних сервісах застосовуються два підходи до формування набору маршрутних точок:

1. адаптивна дискретизація, за якої щільність точок збільшується на ділянках зі зміною напрямку та зменшується на прямолінійних сегментах, наприклад в алгоритмах Google Earth;

2. фіксований крок дискретизації, за якого точки формуються через сталу відстань із заданого ряду: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 м.

Для оцінювання впливу кроку дискретизації на розрахунок сумарної механічної роботи вздовж маршруту використано міський маршрут № 4 із помірним топологічним профілем у м. Тун, Швейцарія, прокладений між точками А (46,76172; 7,599228) і В (46,717836620971305; 7,553759509185305), як показано на рис. 2.34. Шлях № 1 має довжину $L_1 = 9,5$ км і середню швидкість $V_{md} = 47,5$ км/год. Шлях № 2 має довжину $L_2 = 9,9$ км і долається із середньою швидкістю 42,4 км/год, а шлях № 3 має довжину $L_3 = 11,7$ км і середню швидкість $V_{md} = 61,3$ км/год.

Із запропонованих Google Maps альтернатив для аналізу обрано шлях № 1, рекомендований як найшвидший.

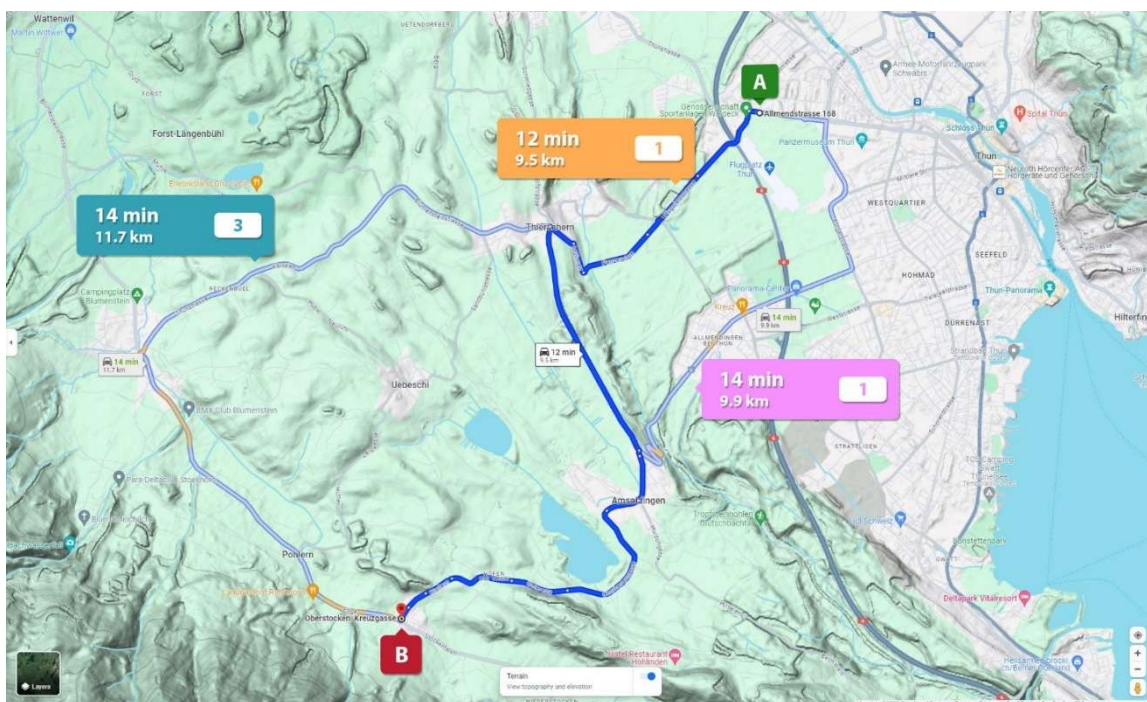


Рис. 2.34 Маршрут № 4 [155]

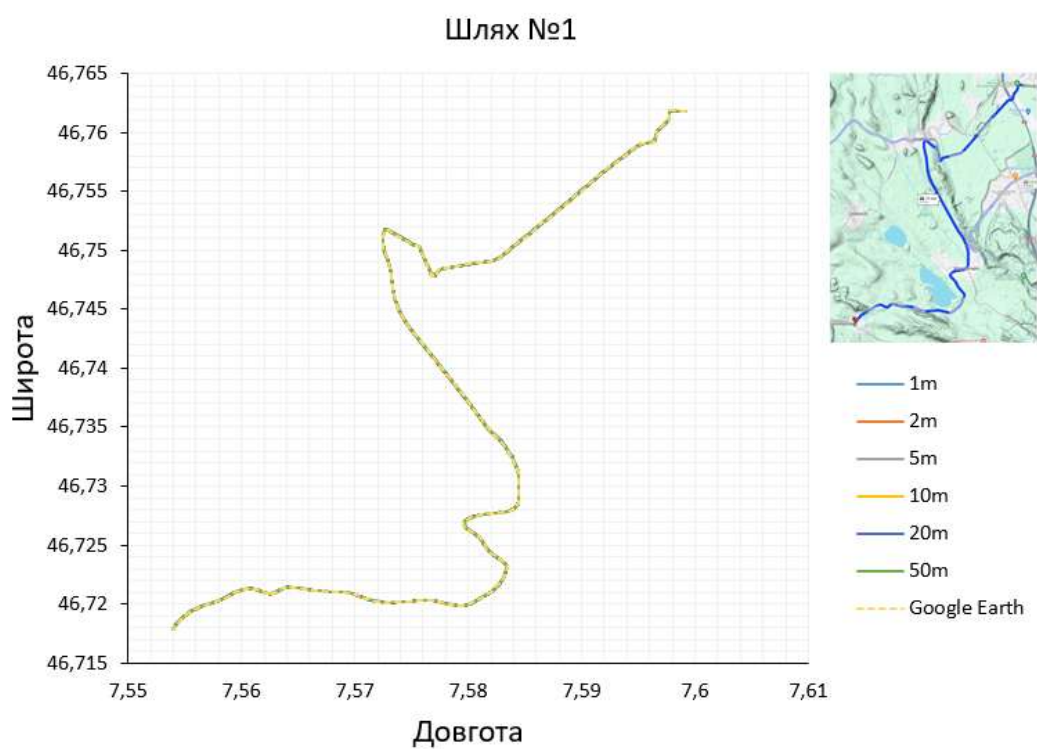


Рис. 2.35 Шлях № 1 з фіксованою (1-50 м) та адаптивною частотою дискретизації за даними Google Earth

Таблиця 2.11 Витрати механічної енергії руху для шляху №1 за різних кроків дискретизації

Шлях № 1											
Тип дискретизації	Адаптивний	Фіксований									
Step, м	GE	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
D_i , км	9,509	9,484	9,482	9,478	9,47	9,46	9,4	9,341	9,077	8,779	8,328
ΔD_i , км	-0,025	0	0,002	0,006	0,014	0,024	0,084	0,143	0,407	0,705	1,156
A_r , кДж	8246,8 28	8815, 506	8417, 617	8297, 885	8246, 892	8178, 532	8126, 622	8054, 756	7898, 979	7655, 416	7392, 726
ΔA_r , кДж	568,67 8	0	397,8 89	517,6 21	568,6 14	636,9 73	688,8 84	760,7 5	916,5 28	1160, 09	1422, 78
Error, %	6,45	0	4,451	5,871	6,45	7,22	7,814	8,629	10,39 6	13,15 9	16,13 9
де A_r – сумарна механічна робота вздовж маршруту, кДж; ΔA_r – відхилення механічної роботи відносно еталону (1 м), кДж; Error – відносна похибка результату відносно еталонної дискретизації 1 м, %; D_i – довжина маршруту, визначена за дискретизованими точками, км; ΔD_i – різниця між довжиною маршруту за базового кроку 1 м і довжиною за відповідного типу дискретизації, км; GE – адаптивна дискретизація Google Earth.											

З таблиці 2.11 видно, що зі збільшенням кроку дискретизації зменшується ефективна довжина маршруту D_i , що обумовлено огрубленням траєкторії за рахунок того, що частина поворотів та локальних геометричних деталей маршруту перестає відтворюватися. Це знижує інтегральні витрати механічної роботи A_r , формуючи систематичну похибку прогнозу енергії руху.

У діапазоні кроків 2–50 м, а також для адаптивної дискретизації Google Earth, абсолютне відхилення довжини маршруту від базового результату становить 0,002–0,084 км, а відносне відхилення механічної роботи перебуває в межах 4,514–7,814%. При кроці 100–1000 м спостерігається значне зростання геометричних спотворень: відхилення довжини досягає 0,143–1,156 км, а

відносно відхилення механічної роботи зростає від 8,630 до 16,140%. Це підтверджується відмінностями траєкторії у площині широта–довгота на рис. 2.36 та змінами висотного профілю на рис. 2.37.

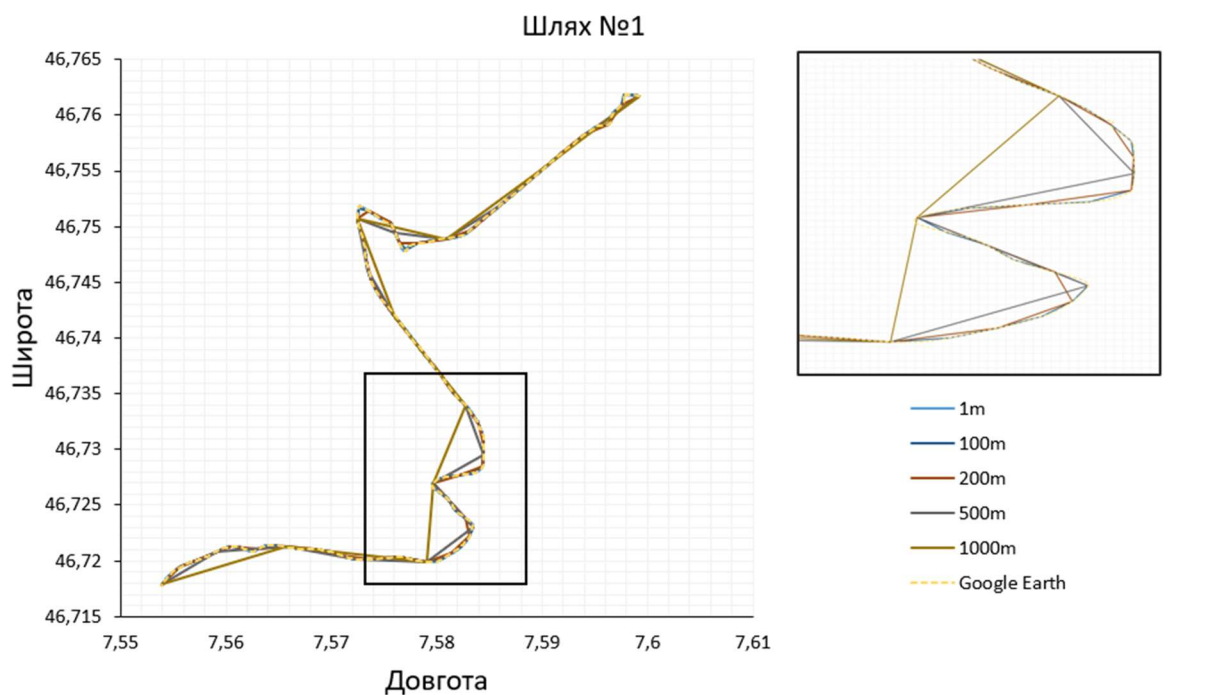


Рис. 2.36 Шлях № 1 із фіксованим кроком дискретизації 100–1000 м та адаптивною дискретизацією Google Earth

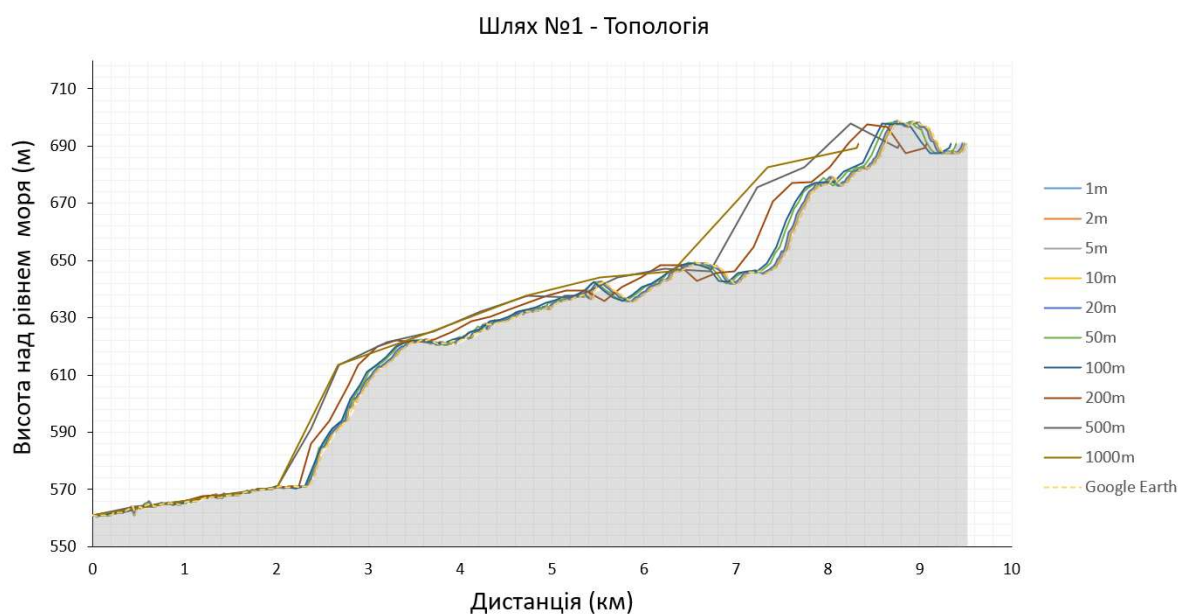


Рис. 2.37 Зміна топологічного профілю шляху № 1 залежно від кроку дискретизації

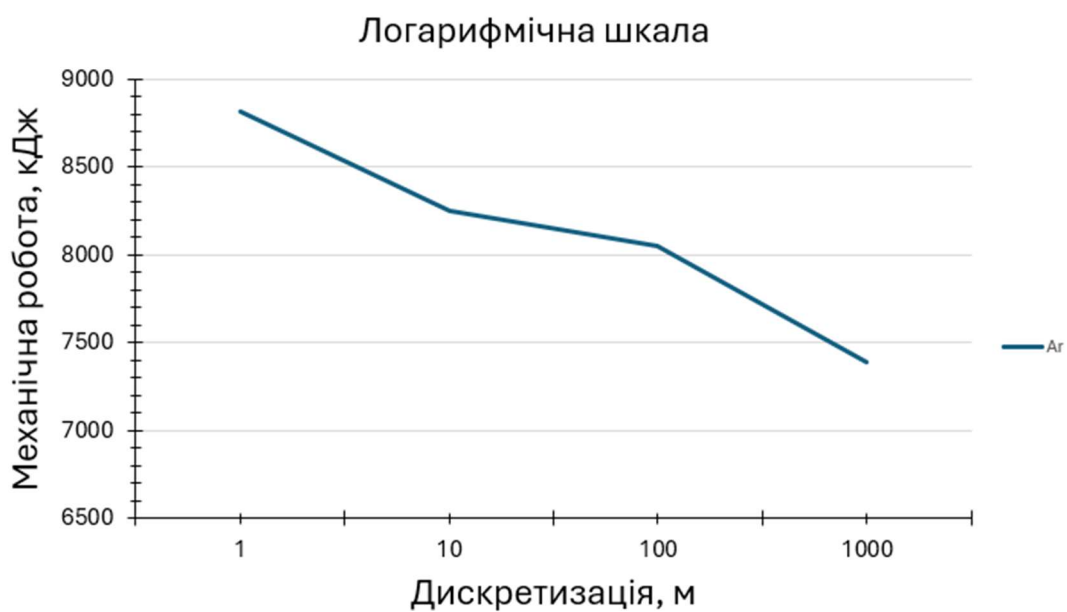


Рис. 2.38 Залежність механічної роботи руху від кроку дискретизації

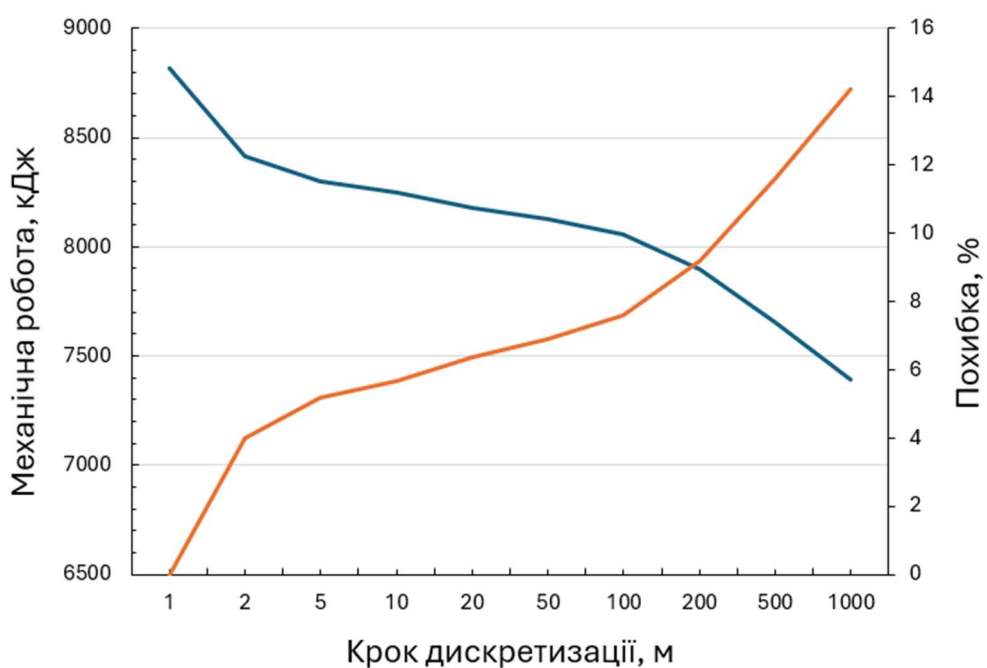


Рис. 2.39 Залежність похибки розрахунку механічної роботи від кроку дискретизації

Для задачі енергоефективного ранжування маршрутів доцільно застосовувати крок дискретизації в межах 10–100 м (рис. 2.38), що забезпечує компроміс між точністю розрахунків і зменшенням обчислювального навантаження. У цьому діапазоні відносне відхилення механічної роботи не перевищує 8,6% порівняно з результатом для базового еталонного кроку 1 м, як показано на рис. 2.39.

Проміжні висновки:

1. Встановлено, що крок дискретизації маршруту є одним із визначальних факторів похибки розрахунку механічної роботи руху, оскільки він одночасно впливає на відтворення геометрії траєкторії та форму топологічного профілю.
2. Для дослідженого міського маршруту в м. Тун, Швейцарія, при збільшенні кроку дискретизації від 1 м до 1000 м відхилення довжини маршруту становить до 1,156 км, а відносне відхилення розрахованої механічної роботи – 16,140% порівняно з базовим кроком 1 м.
3. У діапазоні кроків 2–50 м, а також для адаптивної дискретизації Google Earth, відхилення довжини маршруту перебуває в межах 0,002–0,084 км, а відносне відхилення механічної роботи – 4,514–7,814%, що підтверджує прийнятність цього діапазону для інженерного оцінювання.
4. Для кроку 100 м відносне відхилення становить близько 8,6%, тому інтервал 10–100 м може розглядатися як компромісний: він забезпечує обмеження відхилення на рівні не більше 8,6% при суттєвому зменшенні обчислювального навантаження.
5. Отримані дані підтверджують, що надмірне збільшення кроку дискретизації до 200 м і більше призводить до систематичного спотворення маршруту, зокрема втрати частини поворотів і локальних підйомів та спусків. Унаслідок цього прогноз механічної роботи стає істотно менш достовірним для задач енергоефективного ранжування альтернативних шляхів.

2.7. Вплив джерела топологічних даних на розрахунок витрат енергії

Окрім дискретизації траєкторії, точність оцінювання механічної роботи суттєво залежить від джерела даних про висоту над рівнем моря. Різні цифрові моделі рельєфу (Digital Elevation Model (DEM)) та поверхні відрізняються:

- просторовою роздільною здатністю;
- номінальною вертикальною та горизонтальною точністю;
- способом отримання висотних даних – радарною інтерферометрією, оптичними методами, LiDAR тощо;
- ступенем згладження локальних форм рельєфу.

Серед поширених відкритих наборів висотних даних можна виділити NASA SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), Copernicus DEM, ALOS World 3D (AW3D30) та ODP1 – Sonny's LiDAR Digital Terrain Models [156] [157].

У межах дослідження порівнювалися результати розрахунку для трьох відкритих джерел висотних даних: ODP1, SRTM1 та SRTM3. ODP1 використано як базове джерело для визначення відносних відхилень результатів. Таке порівняння дозволяє оцінити чутливість розрахованої механічної роботи до відмінностей висотних даних на маршрутах міського типу [158], [159], [160]. Результати розрахунків наведено в таблиці 2.12. Розподіл механічної енергії вздовж шляхів та їх фрагментів показано на рис. 2.40 - рис. 2.45.

Таблиця 2.12 Результати розрахунку механічної роботи для шляхів № 1–3 за різними джерелами висотних даних

База даних	Шлях №1			Шлях №2			Шлях №3		
	A_r , кДж	E_r , %	D_i , км	A_r , кДж	E_r , %	D_i , км	A_r , кДж	E_r , %	D_i , км
ODP1	8248,29	0	8,24	8570,81	0	8,57	9709,58	0	9,7
SRTM1	8287,03	0,469		8588,62	0,207		9859,19	1,54	
SRTM3	8404,07	1,888		8599,50	0,334		9714,81	0,05	

де A_r – сумарна механічна робота на маршруті, кДж; E_r – відносна різниця результату DEM відносно ODP1, %; D_i – довжина маршруту, км.

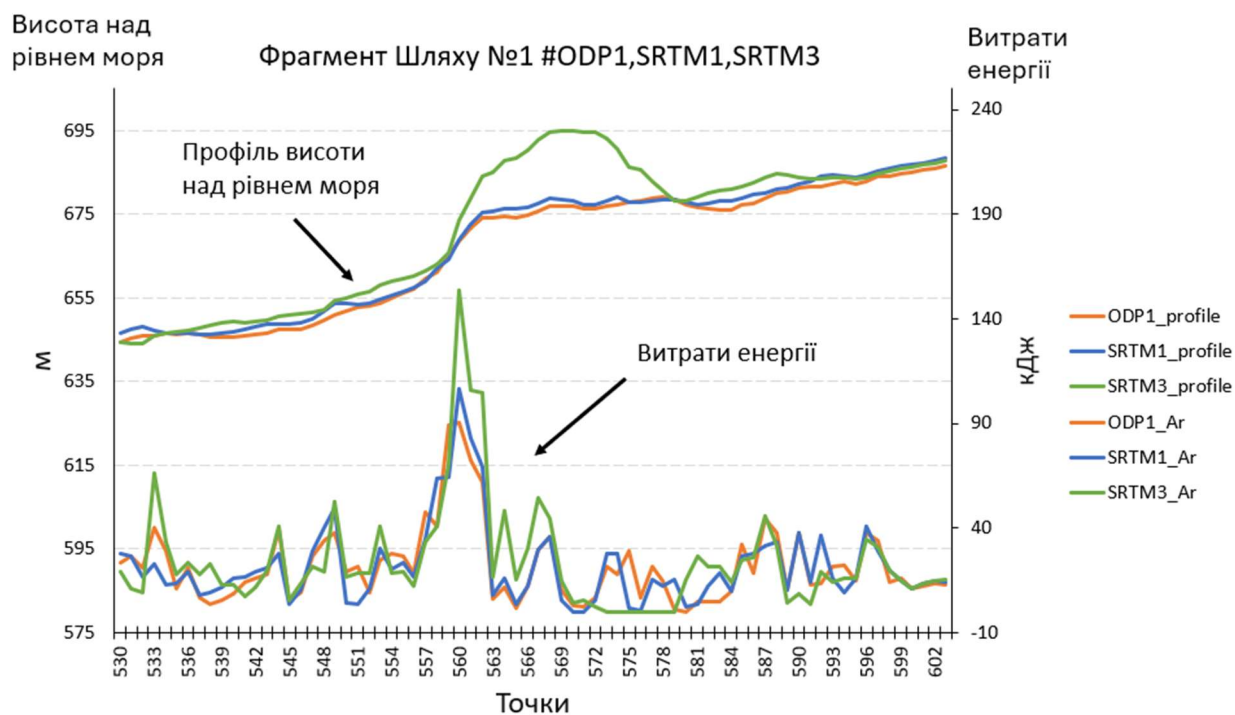


Рис. 2.41 Розподіл механічної енергії руху вдовж фрагменту шляху № 1

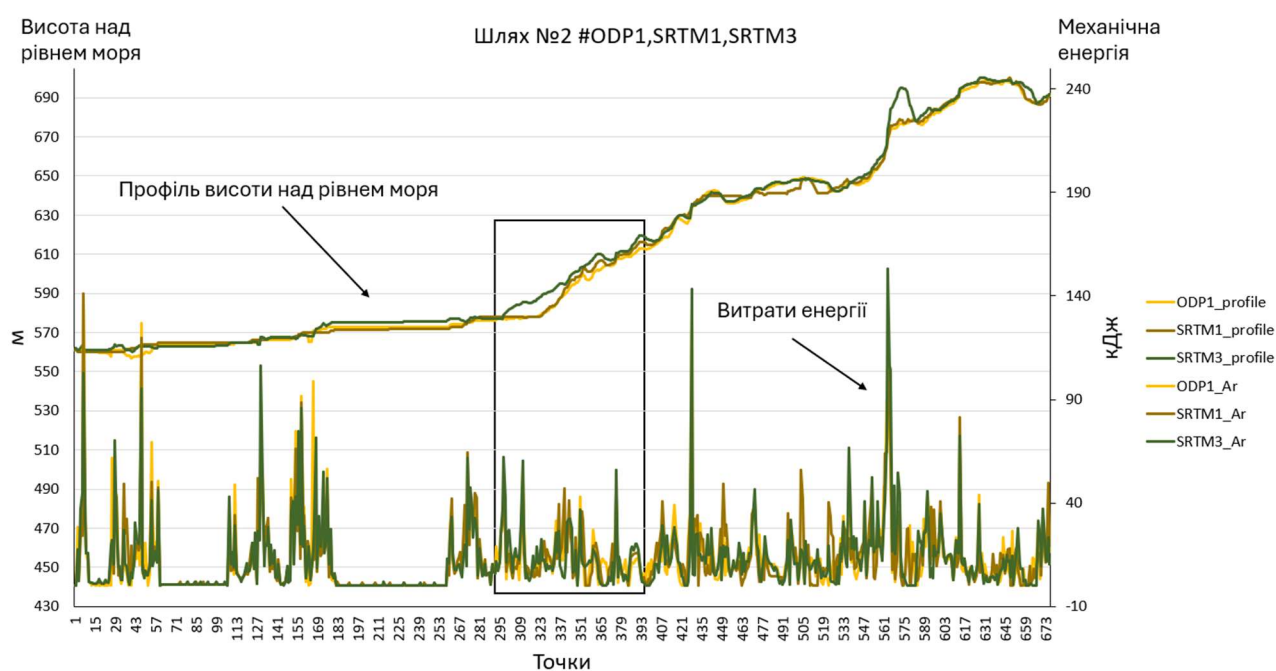


Рис. 2.42 Розподіл механічної енергії руху вдовж шляху № 2

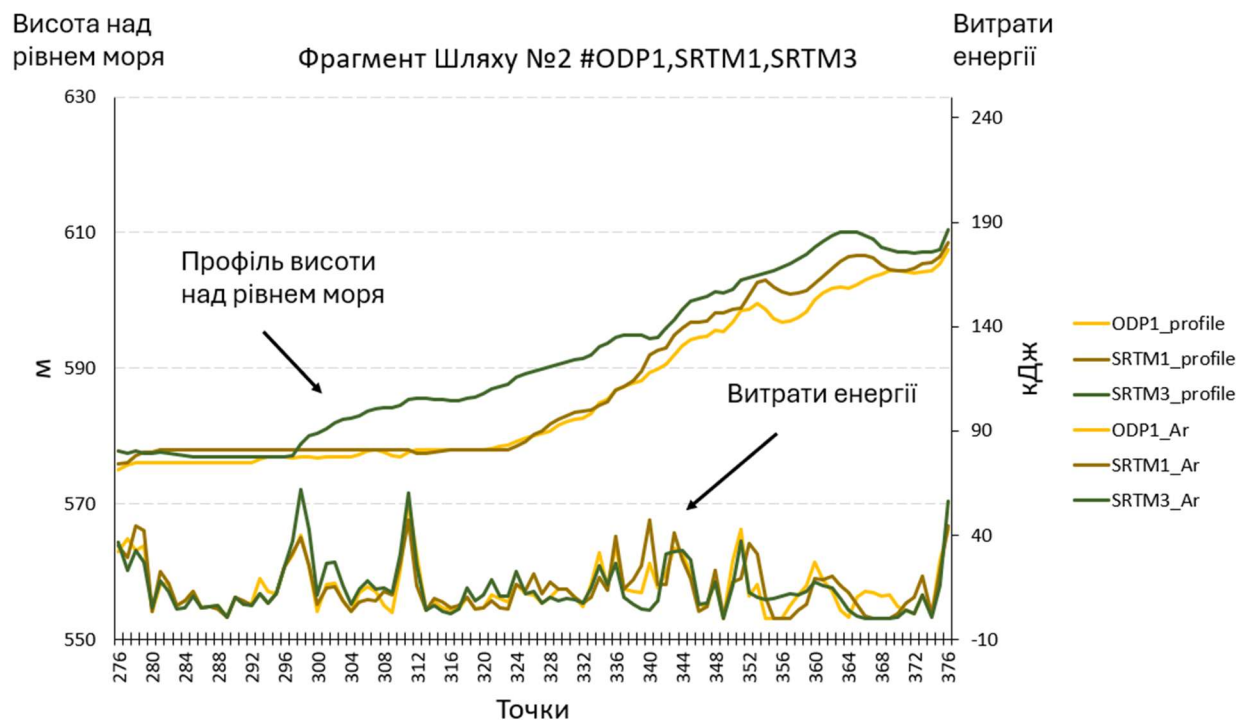


Рис. 2.43 Розподіл механічної енергії руху вздовж фрагменту шляху № 2

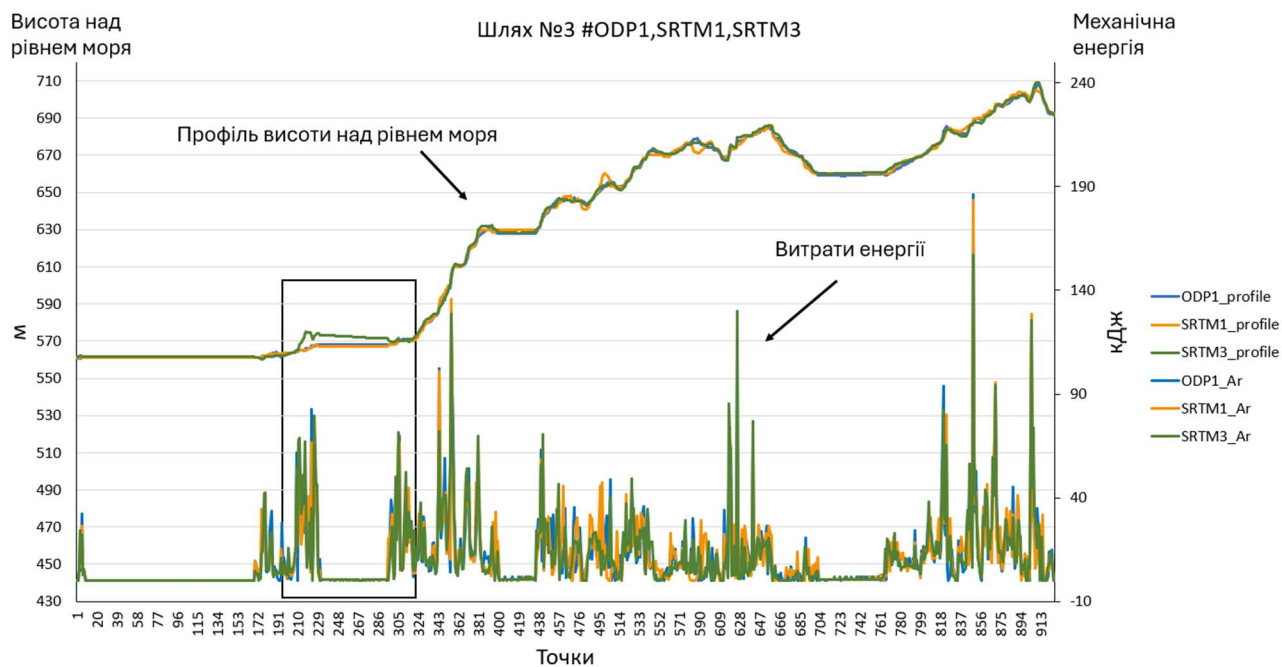


Рис. 2.44 Розподіл механічної енергії руху вздовж шляху № 3

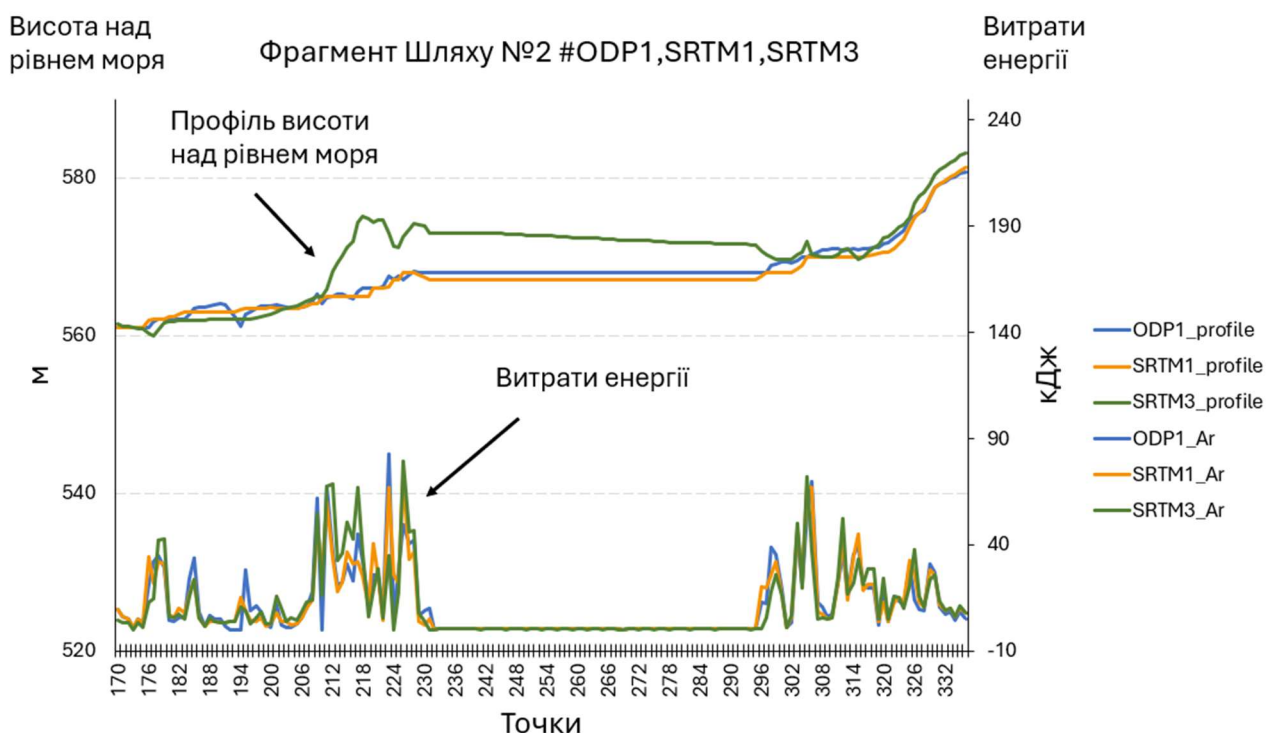


Рис. 2.45 Розподіл механічної енергії руху вдовж фрагменту шляху № 3

Як видно з таблиця 2.12, відмінності між джерелами висотних даних створюють помірне відносне відхилення результатів під час аналізу повних маршрутів довжиною 9–10 км:

- для шляху № 1 – до 1.888%;
- для шляху № 2 – до 0.334%;
- для шляху № 3 – до 1.54%.

Водночас під час локального аналізу коротких фрагментів маршруту, результати якого наведено в таблиця 2.13, вплив джерела висотних даних істотно зростає. На вибраних ділянках відмінності профілів висоти можуть досягати 10–20 м. Для фрагмента шляху № 1 (рис. 2.41) відносне відхилення механічної роботи, визначеної за SRTM3, становить 10,7%, що підтверджує високу чутливість результату до локальних відмінностей висоти та градієнта профілю, наведених на рис. 2.41.

Таблиця 2.13 Результати розрахунку механічної роботи на фрагментах шляхів
№1–3

База даних	Фрагменти шляхів								
	Шлях №1			Шлях №2			Шлях №3		
	A_r , кДж	E_r , %	D_i , км	A_r , кДж	E_r , %	D_i , км	A_r , кДж	E_r , %	D_i , км
ODP1	1616,02	0	0,58 1	1455,53	0	0,47 8	1868,35	0	0,22 8
SRTM1	1609,76	- 0,387		1468,74	0,908		1868,19	- 0,008	
SRTM3	1788,77	10,68 9		1447,51	-0,55		1889,25	1,118 9	
де A_r – сумарна механічна робота вздовж маршруту, кДж; E_r – відносне відхилення результату для відповідного джерела висотних даних від результату ODP1, %; D_i – довжина маршруту, км.									

Проміжні висновки:

1. Показано, що джерело висотних даних формує додаткову складову відхилення результатів, пов'язану з відмінностями профілів висоти та відповідних кутів нахилу θ_i , що безпосередньо впливає на силу скочування та механічну роботу руху.

2. Для маршрутів довжиною близько 8.24–9.70 км відносне відхилення сумарної механічної роботи при використанні SRTM1 і SRTM3 порівняно з ODP1 не перевищує 1,888%. Отже, на рівні повного маршруту вплив джерела висотних даних є помірним.

3. Для коротких фрагментів маршруту довжиною 0,228–0,581 км вплив джерела даних може суттєво посилюватися. Для дослідженого фрагмента шляху № 1 довжиною 0,581 км відносне відхилення результату SRTM3 становить

10,689%, що свідчить про наявність локальних відмінностей висотного профілю.

4. Відносні відхилення на рівні повного маршруту частково згладжуються внаслідок підсумовування результатів для окремих ділянок. На коротких сегментах із вираженими змінами висоти або локальними відмінностями між моделями можливі істотні розбіжності механічної роботи, що необхідно враховувати під час аналізу малих ділянок маршруту.

4. Отримані результати підтверджують практичну доцільність використання більш деталізованих і верифікованих моделей рельєфу або комбінованих джерел висотних даних у задачах, для яких важливе точне відтворення локальних градієнтів. Це особливо актуально під час аналізу коротких маршрутів, руху в гірській місцевості та порівняння альтернативних шляхів із близькими інтегральними показниками.

2.8. Висновки за другим розділом

1. Проаналізовано вплив зовнішніх та експлуатаційних факторів на енергоспоживання електромобіля. До найбільш значущих чинників віднесено температуру навколишнього середовища, роботу допоміжних систем, швидкість руху, аеродинамічний опір і вітер, опір коченню, масу транспортного засобу, манеру керування, параметри дорожньої інфраструктури, трафік і топологічний профіль маршруту. Встановлено, що внесок окремих факторів залежить від режиму руху.

2. Сформовано фізично обґрунтовану математичну модель визначення механічної роботи руху електромобіля, що базується на балансі поздовжніх сил. Модель ураховує механічну тягову силу, силу опору коченню, силу аеродинамічного опору, силу скочування, інерційну складову, кут нахилу дорожнього профілю та обмеження тягових і гальмівних сил за умовами зчеплення коліс із дорожнім покриттям.

3. Для усунення впливу відмінностей у манері керування під час порівняння альтернативних маршрутів застосовано уніфікований профіль

швидкості циклу WLTC Class 3b. За однакових профілів швидкості та прискорення відмінності механічної роботи визначаються довжиною маршруту, його топологічним профілем, силами опору руху та часткою ділянок, на яких можливий рекуперативний режим.

4. На прикладі Nissan Leaf AZE0 встановлено, що реалізація заданих прискорень циклу WLTC Class 3b на підйомах обмежується зчепленням ведучих коліс із дорожнім покриттям. За прийнятих параметрів критичний кут розташований у діапазоні від 10° до 15° . При куті 15° умова зчеплення не виконується для фаз Low 3, Medium 3-2 і High 3-2, а при 17° – для всіх розглянутих фаз циклу. При цьому рух вгору залишається можливим, однак фактичні прискорення будуть меншими за задані циклом.

5. Порівняння альтернативних міських і міжміських маршрутів показало, що шлях із мінімальним часом руху не завжди є найбільш енергоефективним. Для гірського маршруту у Швейцарії питомі витрати найшвидшого шляху становили 0,891 кДж/км, тоді як для альтернативного шляху 0,820 кДж/км, що відповідає зменшенню приблизно на 7,93%. Для маршруту в Італії найшвидший шлях мав на 5,82% меншу питому механічну роботу порівняно з коротшим шляхом, але через більшу довжину потребував більшої сумарної роботи.

6. Встановлено, що для коректного оцінювання альтернативних маршрутів необхідно спільно використовувати два показники: сумарну механічну роботу A_r та питому механічну роботу w_r . Показник A_r характеризує загальні механічні витрати на подолання конкретного маршруту, тоді як w_r дає змогу порівнювати енергоефективність шляхів різної довжини.

7. Визначено вплив кроку дискретизації маршруту на точність відтворення його геометрії та розраховану механічну роботу. При збільшенні кроку від 1 до 1000 м відхилення розрахункової довжини дослідженого маршруту досягало 1,156 км, а відносне відхилення механічної роботи – 16,140% порівняно з базовим кроком 1 м. За кроків 200 м і більше спостерігалася втрата

локальних поворотів, підйомів і спусків, що призводило до систематичного заниження механічної роботи.

8. Для інженерного оцінювання та енергоефективного ранжування маршрутів рекомендовано застосовувати крок дискретизації 10–100 м. Для дослідженого маршруту в цьому діапазоні відносне відхилення механічної роботи не перевищувало 8,63% порівняно з результатом для кроку 1 м, що забезпечує прийнятний компроміс між деталізацією маршруту та обчислювальним навантаженням.

9. Показано вплив джерела висотних даних на результати розрахунку. Для повних маршрутів довжиною близько 8,57–9,70 км відносне відхилення механічної роботи, отриманої за даними SRTM1 і SRTM3, від результату для базового джерела ODP1 не перевищувало 1,888%. На коротких фрагментах довжиною 0,228–0,581 км відхилення могло досягати 10,689%, що зумовлено локальними відмінностями висот і градієнтів профілю. Для аналізу коротких, гірських або близьких за енергетичними показниками маршрутів доцільно використовувати більш деталізовані джерела висотних даних.

10. Розрахована механічна робота на колесах є основою для подальшого визначення електричної енергії, спожитої з тягової акумуляторної батареї. Для переходу від механічної роботи до фактичного електроспоживання необхідно враховувати ККД тягового електродвигуна, силового перетворювача, механічної передачі та АКБ, споживання допоміжних систем, а також обмеження рекуперативного гальмування.

11. Отримані результати створюють теоретичну основу для подальшої експериментальної перевірки розробленої методики. У наступному розділі її буде застосовано до електричного трицикла як зменшеної фізичної моделі BEV та перевірено на навантажувальному стенді шляхом порівняння розрахованих показників механічної роботи з експериментально визначеним енергоспоживанням.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРУ ТОПОЛОГІЇ МАРШРУТУ НА ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС РУХУ

У розділі описано створення акумуляторного електричного транспортного засобу типу «трицикл» і лабораторної навантажувальної установки для експериментальної перевірки наукових положень та висновків, сформульованих у попередніх розділах. За результатами експериментальних досліджень визначено вплив топологічного профілю маршруту на витрати електричної енергії досліджуваного транспортного засобу під час руху.

3.1. Конструкція експериментального електричного трицикла

Для експериментальної перевірки запропонованої методики розрахунку витрат енергії побудовано електричний транспортний засіб типу «трицикл». Він є керованим наземним акумуляторним електричним ТЗ із заднім приводом (RWD), зовнішній вигляд і основні складові якого наведено на рис. 3.1, а їх перелік у таблиці 3.1. Параметри трицикла наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 Складові частини трицикла

Приводне мотор-колесо	QS 10 2000W 50H V2 48V
Контролер мотор-колеса	Kelly KEB48201X
Педаль акселератора	Kelly 0-5 B
Акумуляторна батарея	Nissan Leaf Gen 1
Система керування акумуляторною батареєю (BMS)	ANT 7-16s 130-325A
Модуль керування	Зовнішні органи керування

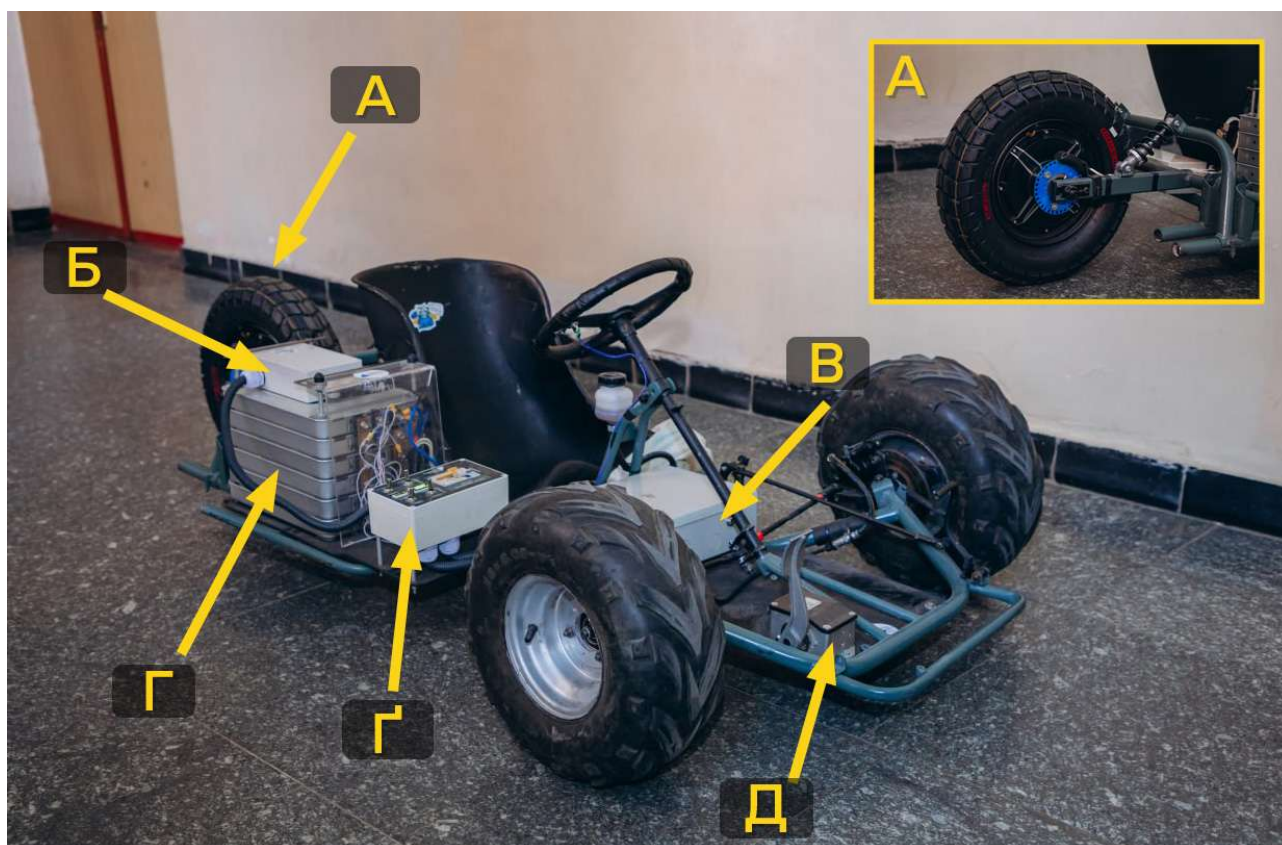


Рис. 3.1 Зовнішній вигляд та складові частини «трицикла» де: А – приводне мотор-колесо; Б – модуль BMS; В – контролер мотор-колеса; Г – Li-ion АКБ; Г – модуль керування; Д – педаль акселератора.

Таблиця 3.2 Параметри трицикла

Параметр	Позначення	Значення
Загальна вага трицикла	F_v , Н	1096,76
Споряджена маса	m_{sp} , кг	45
Маса двох передніх коліс	m_{pk} , кг	10
Маса заднього колеса (мотор-колеса)	m_{zk} , кг	12
Маса збірки АКБ	m_{akb} , кг	22,8
Маса рами трицикла	m_{kon} , кг	3
Маса додаткового обладнання	m_{dod} , кг	22

Продовження таблиці 3.2

Загальна довжина трицикла	$l_{tr}, \text{м}$	1,735
Міжосьова відстань	$l_v, \text{м}$	1,36
Відстань від центра мас до задньої осі	$l_{vr}, \text{м}$	0,66
Відстань від центра мас до передньої осі	$l_{vf}, \text{м}$	0,7
Радіус мотор-колеса	$R_v, \text{м}$	0,225

3.1.1. Тяговий двигун та контролер.

Як тяговий електродвигун використовується мотор-колесо (МК) типу Brushless DC (Brushless DC, BLDC) QS 10 2000W 50H V2 48V. Його зовнішній вигляд наведено на рис. 3.2, його основні технічні характеристики у таблиці 3.3.



Рис. 3.2 Мотор-колесо QS 10 2000W 50H V2 48V

Таблиця 3.3 Характеристики BLDC мотор-колеса QS 10 2000W 50H V2 48V

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Модель	—	QS Motor 10 2000W 50H V2 48V	—
Тип	—	BLDC, зовнішній ротор, давачі Холла	—
Розмір обода	—	10×2.15" / 10×3.0"	—
Кількість пар полюсів	p	23	—
Номінальна потужність	P_n	2	кВт
Номінальна напруга	U_n	48	В
Діапазон швидкості	v	30–65	км/год
Діапазон частоти обертання	n	300–900	об/хв
Максимальний момент	M_{max}	160	Н·м
Коефіцієнт обертів на вольт	K_v	10,42	об/(хв·В)
Максимальний ККД	η_{max}	88	%

Керування мотор-колесом здійснюється за допомогою контролера BLDC-двигуна Kelly KEB48201X, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 3.3. Контролер забезпечує керування режимами роботи тягового електропривода, обмеження струмів двигуна та АКБ, реверс, прискорення, електричне гальмування і рекуперацію. Основні характеристики контролера наведено в таблиці 3.4.



Рис. 3.3 Зовнішній вигляд контролера Kelly KEB48201X [161]

Таблиця 3.4 Характеристики контролера Kelly KEB48201X

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Напруга живлення	U_k	48	В
Номінальна потужність	P_n	2	кВт
Піковий струм	I_{peak}	150	А
Робочий струм	I_r	60	А
Напруга двигуна	—	24–48	В

До основних функцій контролера належать:

- реверс руху;
- апаратний захист від перенапруги та перевищення струму;
- режими керування (моментний, швидкісний та комбінований);
- налаштування обмежень струму двигуна та АКБ;
- підтримка рекуперативного гальмування (за вимикачем гальма, при відпусканні акселератора або керуванням аналоговим сигналом);
- підтримка BLDC-двигунів із давачами Холла 60° або 120°;
- керування прискоренням і гальмуванням за допомогою зовнішніх аналогових сигналів.

3.1.2. Джерело живлення та система керування акумуляторною батареєю

Джерелом живлення тягового електропривода трицикла є акумуляторна батарея, сформована із шести літій-іонних модулів Nissan Leaf Module Gen 1 від електромобіля Nissan Leaf 2013 року випуску. Зовнішній вигляд і внутрішню будову акумуляторного модуля наведено на рис. 3.4. Кожен модуль містить чотири пакетні акумуляторні елементи, з'єднані за схемою 2s2p. Шість модулів з'єднано послідовно, унаслідок чого сформовано акумуляторну батарею конфігурації 12s2p. За номінальної напруги одного елемента 3,65 В розрахункова номінальна напруга одного модуля становить 7,3 В, а всієї акумуляторної батареї 43,8 В. Номінальна ємність батареї становить 66,2 А·год, розрахункова енергоємність приблизно 2,90 кВт·год, а загальна маса шести модулів 22,8 кг. Основні характеристики акумуляторного модуля наведено в таблиці 3.5.

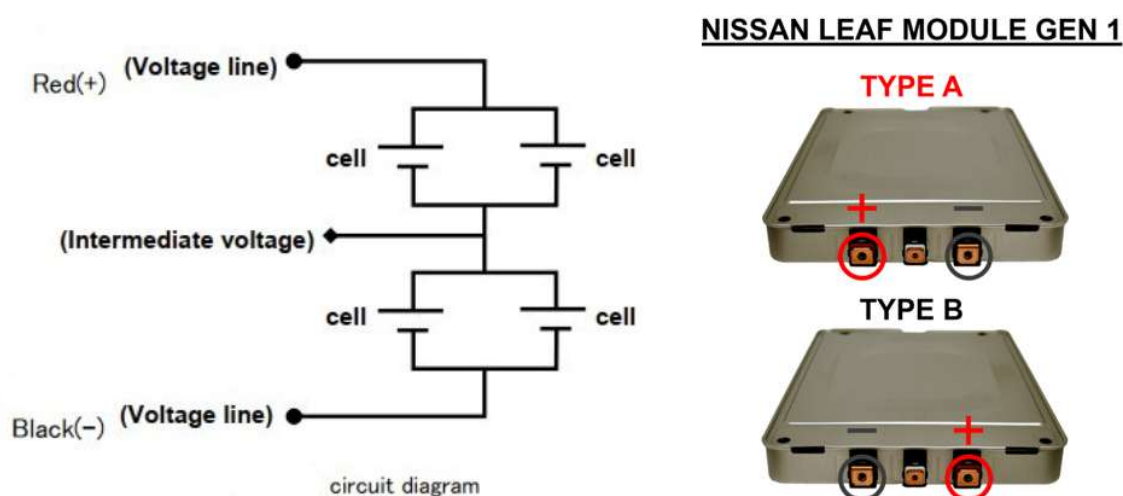


Рис. 3.4 Зовнішній вигляд та внутрішня будова Nissan Leaf Module Gen 1 [162]

Таблиця 3.5 Основні характеристики акумуляторного модуля Nissan Leaf
Module Gen 1 [162]

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Тип акумуляторних елементів	—	Li-ion , пакетного типу	—
Конфігурація модуля	—	2s2p	—
Номінальна напруга комірки	U_s	3,65	В
Діапазон напруги комірки	U_s	3,0–4,15	В
Рекомендований діапазон напруги елемента	—	3,3–4,0	В
Номінальна напруга модуля	U_m	7,6	В
Ємність модуля	C_m	66,2	А·год
Макс. струм розряду	I_{max}	до 100 (150 короткочасно)	А
Маса модуля	m_m	3,8	кг

Контроль стану акумуляторної батареї та її захист реалізовано за допомогою системи керування акумуляторною батареєю Smart BMS ANT 7–16S 130А, зовнішній вигляд якої наведено на рис. 3.5 Використана система BMS забезпечує контроль напруг дванадцяти послідовно з'єднаних груп акумуляторних елементів, струму заряду та розряду, а також температури батареї.

Система BMS виконує пасивне балансування напруг послідовно з'єднаних груп елементів і забезпечує захист батареї від перевищення допустимої напруги, надмірного розряду, перевантаження за струмом, короткого замикання та

перевищення допустимої температури. Основні характеристики використаної системи BMS наведено в таблиці 3.6.



Рис. 3.5 Зовнішній вигляд Smart BMS ANT 7-16S 130A

Таблиця 3.6 Характеристики Smart BMS ANT 7–16S 130A

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Діапазон контролю напруги комірки	—	1,0–4,6	В
Струм розряду	I_r	130 (піковий 325)	А
Максимальний струм заряду	I_c	50	А
Струм балансування	I_β	200	мА
Під'єднання комірок	—	7–16S	—
Захисти	—	Від мінімальної та максимальної напруги, перевищення струму і температури	—

3.2. Лабораторна навантажувальна установка

3.2.1. Рама навантажувальної установки.

Для проведення експериментальних досліджень у лабораторних умовах було розроблено та виготовлено навантажувальну установку. Основним конструктивним елементом установки є рама, 3D-модель якої наведено на рис. 3.6, а конструктивне креслення на рис. 3.7.

Рама навантажувальної установки складається з двох опорних металевих роликів на підшипниках (рис. 3.6, поз. А), опорних металевих балок і пластин із пазами для встановлення та фіксації навантажувальної машини (рис. 3.6, поз. Б), вузлів фіксації трицикла натяжними елементами (рис. 3.6, поз. В), а також елементів кріплення рами до підлоги через гумові віброопори (рис. 3.6, поз. Г).

Регулювання відстані між осями роликів реалізовано шляхом переміщення одного з роликів уздовж поздовжнього пазу. Це забезпечує можливість зміни глибини встановлення мотор-колеса в робочій зоні навантажувальної установки.

Трицикл встановлюється на раму таким чином, щоб мотор-колесо розташовувалося між двома опорними роликами, а навантажувальна машина (НМ) була розміщена з протилежного боку рами. Така конструкція забезпечує можливість обертання мотор-колеса в обох напрямках, що дає змогу реалізовувати рух трицикла вперед і назад відносно навантажувальної установки.

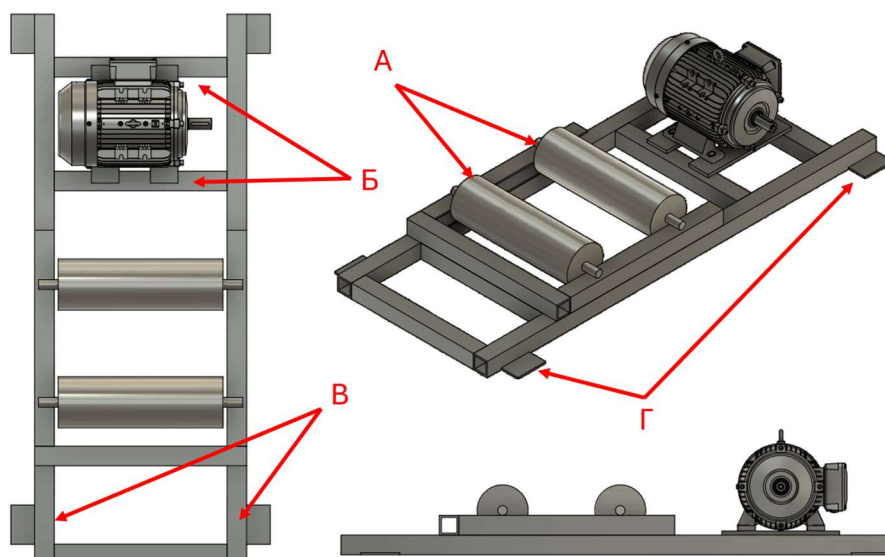


Рис. 3.6 3D модель рами навантажувального стенду

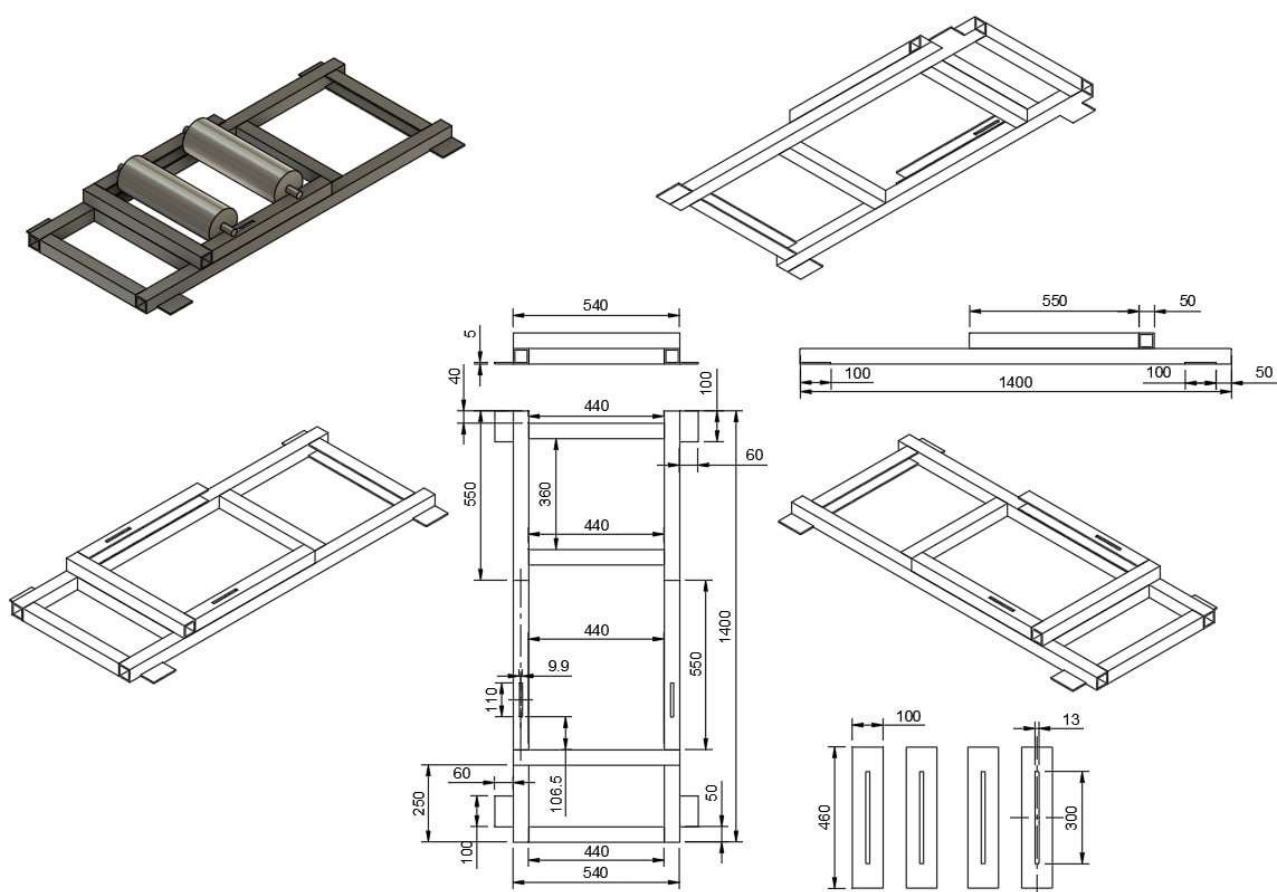


Рис. 3.7 Креслення рами навантажувального стенду

3.2.2. Навантажувальний механізм

Для експериментального відтворення впливу топологічного профілю маршруту на витрати енергії трицикла необхідно забезпечити створення додаткового навантажувального моменту на ведучому мотор-колесі. Реалізація цього ефекту здійснюється за допомогою НМ, електропривод якої працює в режимі підтримання моменту та формує керований момент опору, еквівалентний впливу заданого кута топології маршруту.

Для створення керованого моменту в конструкцію рами інтегровано навантажувальний механізм (рис. 3.8), який складається з навантажувальної машини, двох прокатних валків, клинопасової передачі та опорного ролика. Геометричні параметри навантажувального механізму наведено в таблиці 3.7.

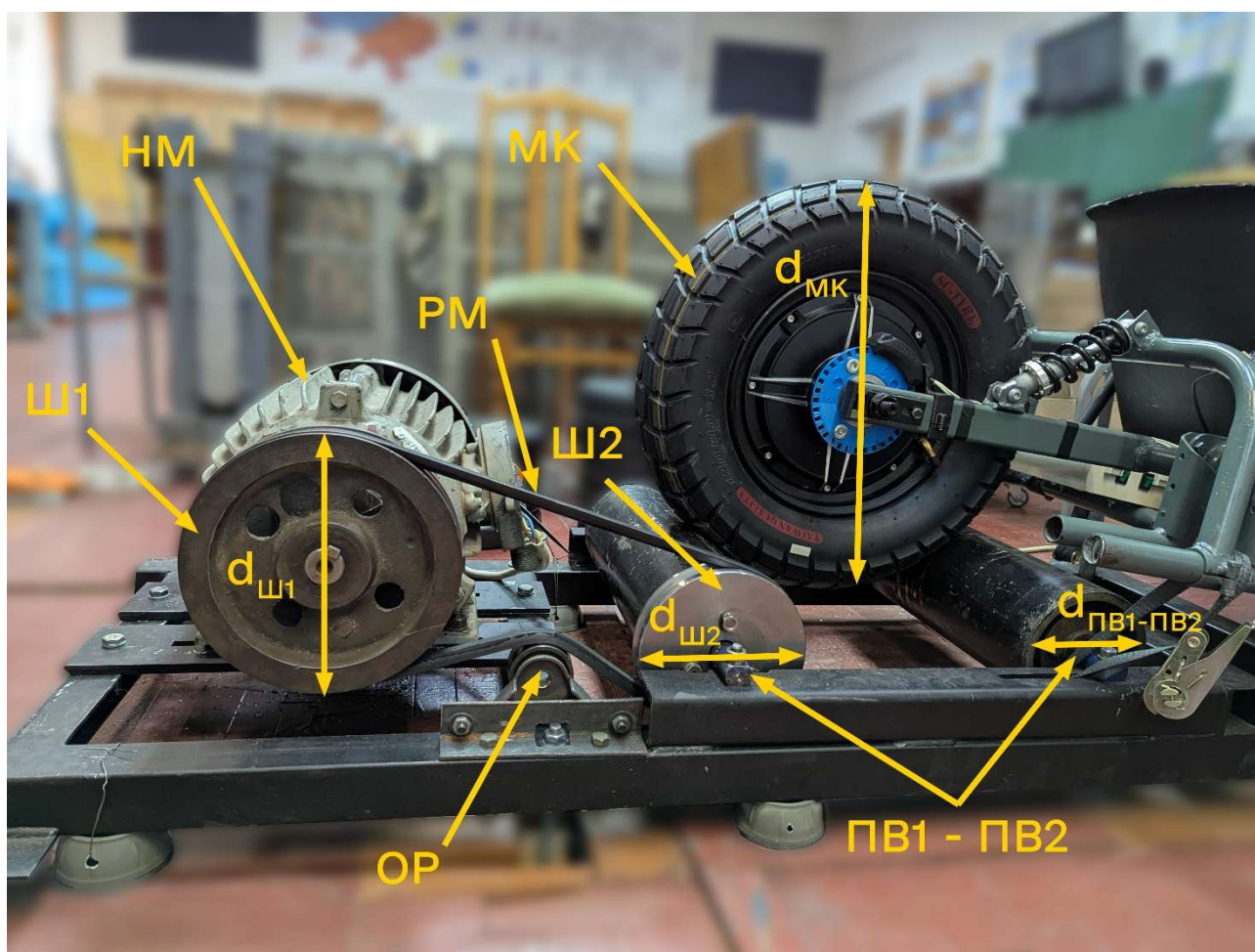


Рис. 3.8 Навантажувальний механізм

Таблиця 3.7 Геометричні параметри навантажувального механізму

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Діаметр шківів НМ	$d_{ш1}$	0,220	м
Діаметр шківів валка	$d_{ш2}$	0,158	м
Діаметр прокатних валків	$d_{пв1}, d_{пв2}$	0,130	м
Діаметр мотор-колеса	$d_{МК}$	0,45	м
Довжина ремня	$L_{РМ}$	1,30	м
Діаметр опорного ролика	$d_{ОР}$	0,04	м

Момент від навантажувальної машини передається на ролик за допомогою клинопасової передачі. Вибір ремінної передачі обумовлений зменшенням ударних навантажень, захистом від заклинювання та перевантажень, зручністю монтажу й регулювання, нижчим рівнем шуму та меншими вимогами до обслуговування.

Електропривод навантажувальної машини реалізовано на базі трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором серії А02-41-4 (таблиця 3.8), перетворювача частоти Altivar 71 ATV71HD11M3X (таблиця 3.9) та програмованого логічного контролера Modicon TM221CE24R (таблиця 3.10). Структурну схему електропривода навантажувальної машини наведено на рис. 3.9.

Таблиця 3.8 Технічні характеристики асинхронного двигуна A02-41-4

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Напруга живлення (Δ/Y)	—	220/380	В
Номінальний струм (Δ/Y)	—	14/8,3	А
Потужність	P_n	4	кВт
Частота обертання	n_n	1450	об/хв
Частота мережі	f	50	Гц
ККД	η	86	%
$\cos\varphi$	—	0,85	—
Режим роботи	—	S1	—

Таблиця 3.9 Технічні характеристики ПЧ Altivar 71 ATV71HD11M3X

Параметр	Значення	Одиниця
Напруга живлення	200–240	В
Частота мережі	50/60	Гц
Потужність привода	11	кВт
Максимальний струм	53,3	А
Вихідна напруга	0–240	В
Вихідна частота	0–599	Гц

Таблиця 3.10 Технічні характеристики ПЛК Modicon TM221CE24R

Параметр	Значення	Одиниця
Напруга живлення	100–240	В АС
Дискретні входи	14	шт
Аналогові входи	2	шт

Дискретні виходи	10	шт
Комунікації	EtherNet, Modbus TCP, RS-232/RS-485	—

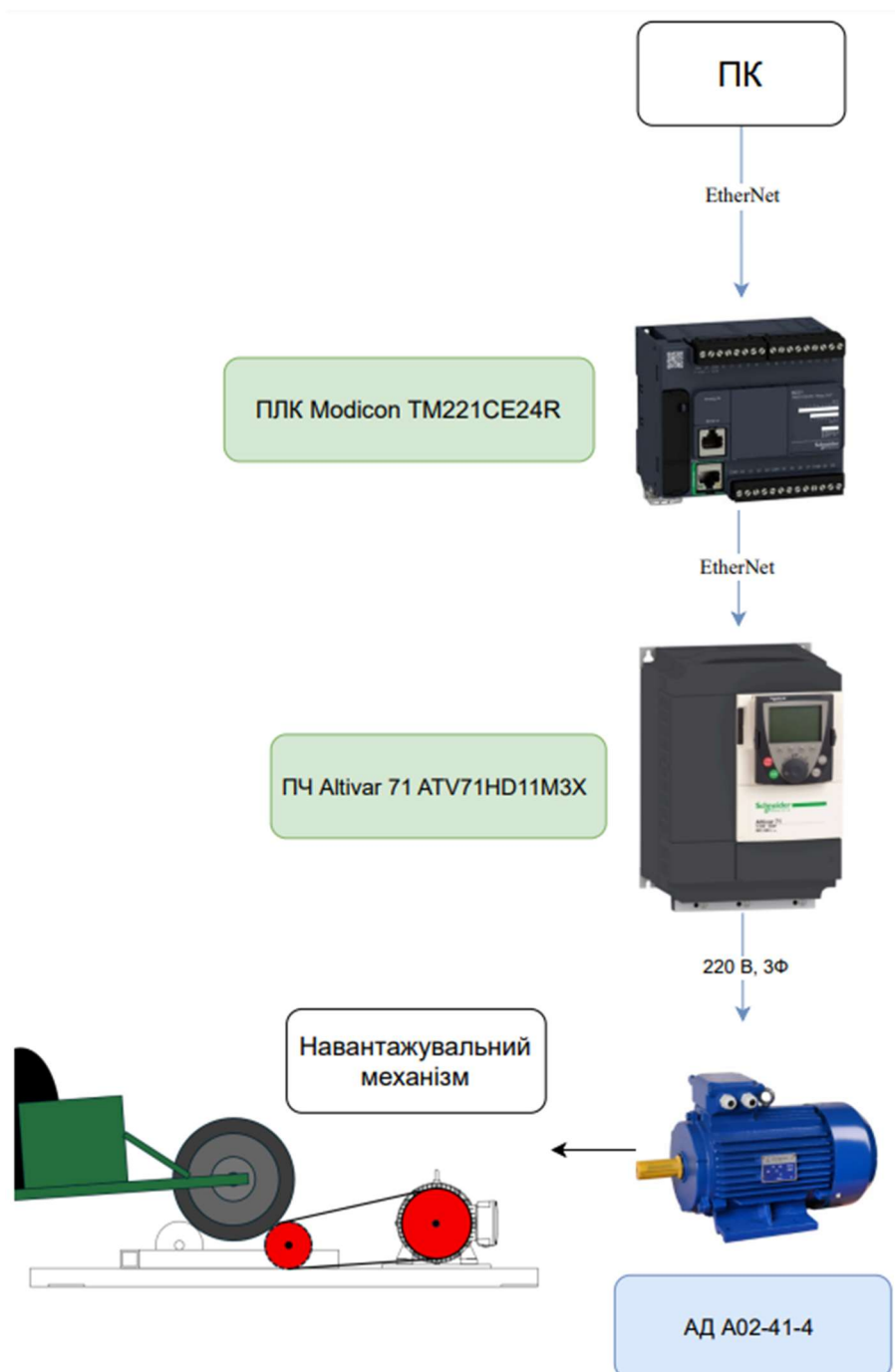


Рис. 3.9 Структурна схема електропривода навантажувальної машини

3.2.3. Система моніторингу параметрів електричного трицикла

Для вимірювання параметрів трицикла в лабораторних умовах та під час реального руху створено систему моніторингу параметрів електричного трицикла (СМПЕ). Основою СМПЕ є мікроконтролер ESP32-WROOM-DA, який являє собою двоядерний 32-бітний процесор з тактовою частотою до 240 МГц та оснащений модулями Wi-Fi і Bluetooth.

Живлення системи здійснюється від АКБ трицикла через DC/DC перетворювач Mornsun URB1D05YMD-6WR3, який забезпечує вихідну напругу 5 В за вхідної напруги 40–160 В та має вбудований захист від короткого замикання і перевантаження. Для вимірювання напруги АКБ застосовано модуль INA226, який обмінюється даними з ESP32 через шину I2C. Для розширення діапазону вимірювання використано резистивний дільник напруги, який забезпечує приведення напруги АКБ до допустимого рівня входу вимірювального каналу.

Вимірювання струму реалізовано за допомогою давача ACS758, що працює на ефекті Холла, з діапазоном ± 100 А, чутливістю 20 мВ/А та заявленою похибкою ± 2 %. Обраний діапазон дає змогу фіксувати як споживання енергії, так і рекуперативні режими, тобто зворотний напрям струму. Збереження даних здійснюється на MicroSD через шину SPI, що забезпечує накопичення експериментальних даних для подальшої обробки.

Давач швидкості обертання колеса побудовано на базі оптичного давача FC-03, який у поєднанні з перфорованим диском, наведеним на рис. 3.10, забезпечує підрахунок імпульсів та визначення частоти обертання колеса, а також швидкості руху трицикла. Для визначення координат під час випробувань у реальних умовах руху використано GPS-модуль NEO-7, який забезпечує точність позиціювання до 2,5 м та частоту оновлення до 10 Гц. Електрична принципова схема СМПЕ наведена на рис. 3.11.

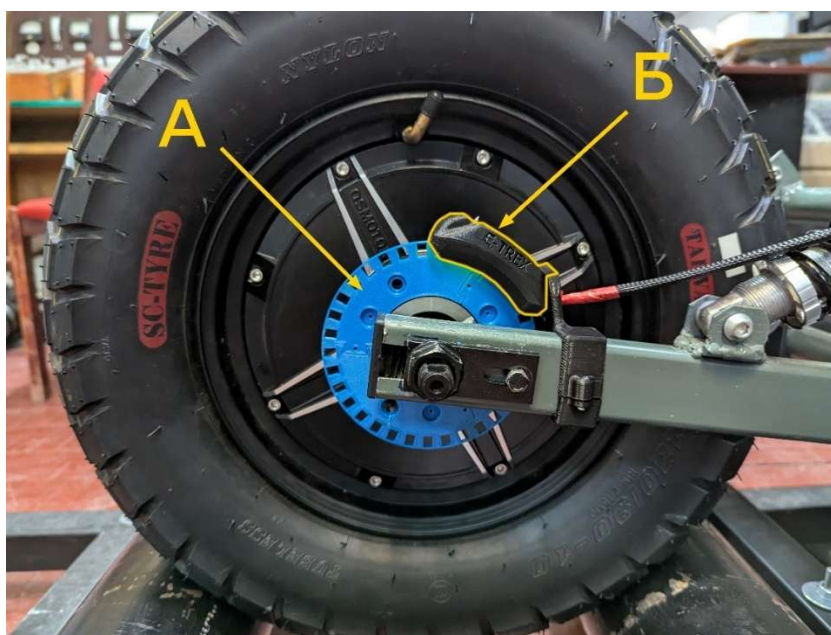


Рис. 3.10 Комплекс для вимірювання швидкості де: А – перфороване колесо, Б – оптичний давач швидкості у корпусі

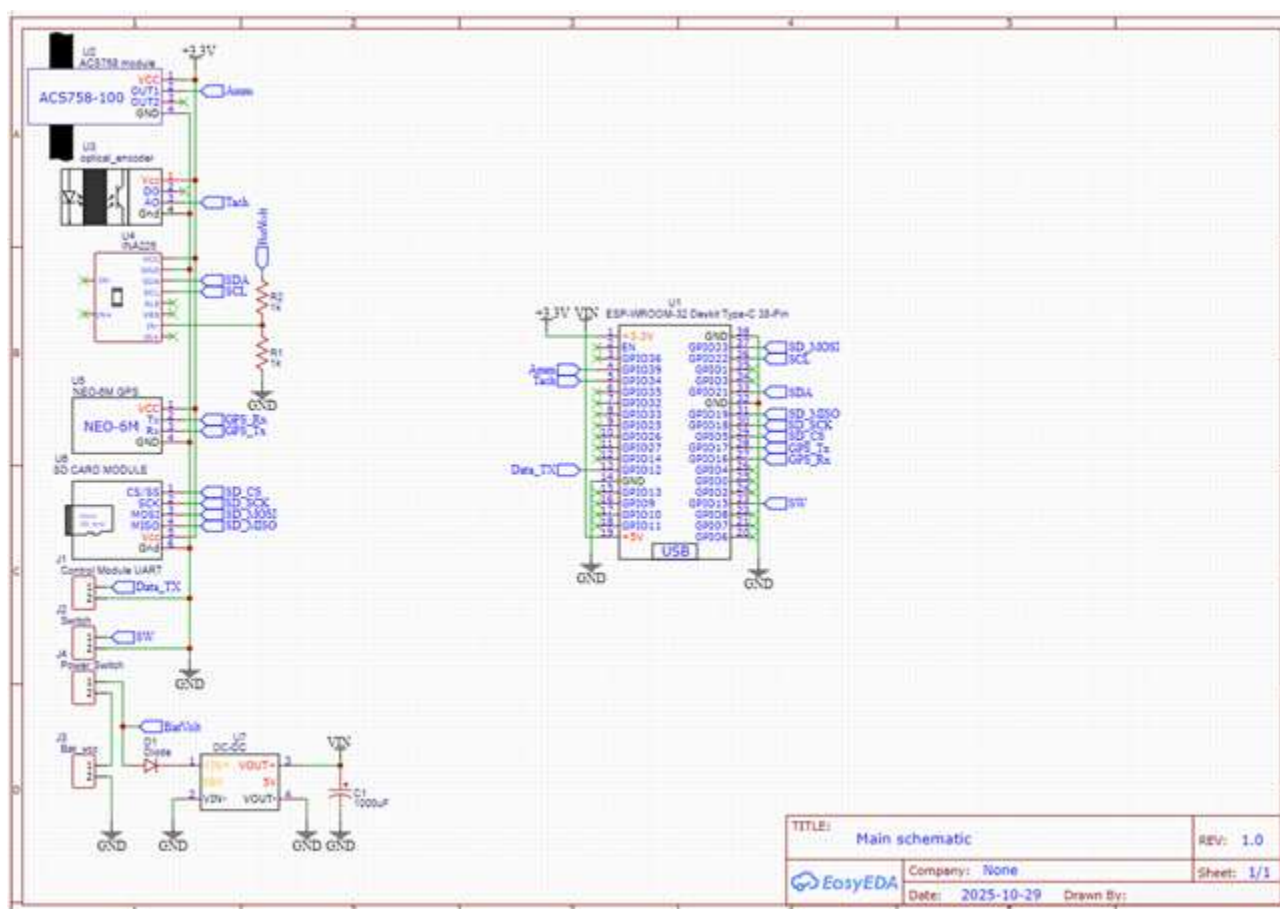


Рис. 3.11 Електрична принципова схема СМПЕ

3.2.4. Пристрій для віддаленого керування трициклом

Для забезпечення відтворення заданого профілю швидкості WLTP розроблено пристрій віддаленого керування швидкістю (ПВКШ). Пристрій забезпечує керування трициклом шляхом формування аналогових сигналів акселератора та електричного гальмування, які надходять до контролера мотор-колеса.

ПВКШ побудовано на базі мікроконтролера ESP32 та підтримує провідний режим керування через послідовний порт, бездротовий режим через Wi-Fi або Bluetooth, а також автономний режим роботи. Формування двох аналогових сигналів у діапазоні 0–5 В реалізовано за допомогою двох цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) MCP4725 з роздільною здатністю 12 біт, що відповідає 4096 дискретним рівням вихідного сигналу.

Для реалізації запуску, зупинки, гальмування та реверсування до схеми ПВКШ додано виконавчі реле. Вони здійснюють комутацію сигналів Start/Stop, Brake SW та Reverse контролера мотор-колеса. Це дає змогу реалізовувати необхідні режими роботи тягового електропривода та підвищує безпеку проведення стендових випробувань. Електричну принципову схему ПВКШ наведено на рис. 3.12.

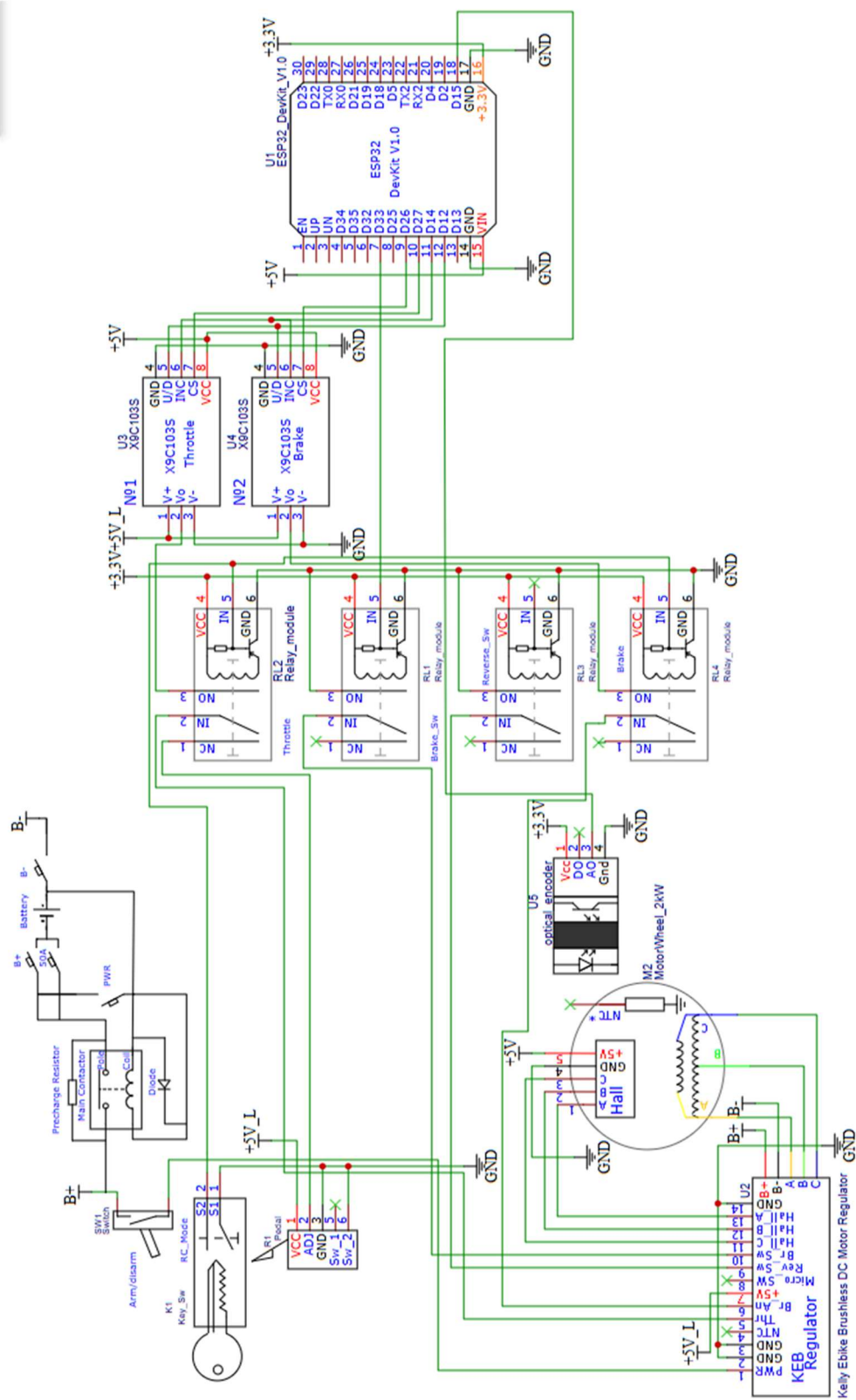


Рис. 3.12 Електрична принципова схема ПВКШ

3.3. Постановка експерименту

3.3.1. Склад лабораторної установки та вимірювальної системи

Експериментальні дослідження проводились у лабораторії університету НТУ «Дніпровська політехніка» міста Дніпро (Україна).

Метою досліджень є експериментальне визначення залежності витрат електричної енергії електричного ТЗ під час руху від його маси та еквівалентного кута нахилу топологічного профілю, а також валідація запропонованої математичної моделі розрахунку споживаної потужності та витрат енергії.

Для проведення досліджень використано створений лабораторний навантажувальний стенд електричного трицикла, загальний вигляд якого наведено на рис. 3.13.

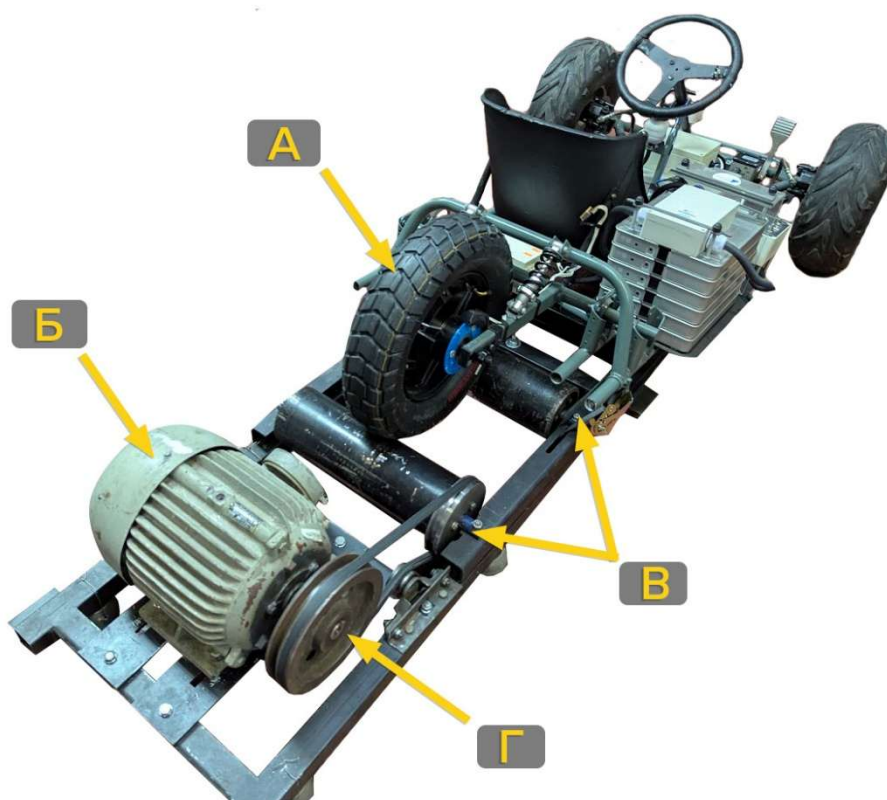


Рис. 3.13 Зовнішній вигляд лабораторної установки навантажувального стенда електричного трицикла, де: А – приводне мотор-колесо; Б – навантажувальна машина; В – опорні ролики; Г – навантажувальний механізм.

До складу лабораторного стенда та вимірювальної системи входять:

1. Електричний трицикл із мотор-колесом потужністю 2 кВт, оснащений ПВКШ та СМПЕ.
2. Навантажувальний стенд із навантажувальним механізмом та асинхронною НМ А02-41-4 потужністю 4 кВт.
3. ПЧ Altivar 71 ATV71HD11M3X потужністю 11 кВт.
4. ПЛК Modicon TM221CE24R.
5. Персональний комп'ютер.

Контролер Kelly KEB48201X налаштовано для керування тяговим електроприводом за зовнішнім аналоговим сигналом ПВКШ.

ПВКШ забезпечує:

1. Підтримання заданої швидкості.
2. Розгін за лінійною рампою.
3. Автоматичне відтворення заданого профілю швидкості, зокрема фази LOW циклу WLTC Class 3b.

СМПЕ забезпечує:

1. Відображення в режимі реального часу струму та напруги АКБ, а також частоти обертання мотор-колеса з частотою оновлення до 10 Гц.
2. Запис експериментальних даних на зовнішній носій з частотою 1 Гц.

Оцінювання достовірності даних, отриманих за допомогою СМПЕ, виконано шляхом порівняння її показань із результатами вимірювань промисловими засобами. Для контролю частоти обертання використано цифровий тахометр DT-2234C+, для вимірювання струму струмові кліщі UNI-T UT204+, для вимірювання напруги цифровий мультиметр UNI-T UT161B.

3.3.2. Задачі експериментальних досліджень

Лабораторний стенд забезпечує відтворення керованих режимів роботи тягового ЕП та дає змогу зіставити результати розрахунків, наведених у розділі 2, з експериментальними даними.

Під час експериментальних досліджень варіювалися такі фактори:

1. Споряджена маса (маса додаткового навантаження) $m_{sp} = 0-100$ кг.
2. Частота обертання мотор-колеса ($n=100-720$) об/хв залежно від режиму дослідження.
3. Еквівалентний кут топологічного профілю $\theta = 0-11^\circ$.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

1. Визначення базових втрат шляхом проведення вимірювань у режимі ХХ за вивішеного мотор-колеса та під час роботи трицикла на роliках без зовнішнього моменту від НМ. За результатами вимірювань визначалися залежності споживаної потужності від частоти обертання та оцінювалися додаткові втрати, зумовлені контактом мотор-колеса з роliками і механічними опорами стенда.
2. Встановлення впливу маси додаткового навантаження на споживану потужність і витрати енергії в заданому діапазоні швидкості, а також оцінювання чутливості енергоспоживання до зміни маси трицикла.
3. Експериментальне відтворення еквівалентного впливу топологічного профілю шляхом формування НМ керованого моменту опору в режимі підтримання моменту. При цьому визначалась відповідність моменту опору НМ складовій сили тяжіння, що діє вздовж дорожнього профілю під час руху вгору.
4. Валідація математичної моделі розрахунку миттєвої потужності та сумарних витрат енергії шляхом відтворення фази LOW циклу WLTC Class 3b за умови $\theta=0^\circ$ і порівняння розрахункових та експериментальних показників.

3.4. Експериментальне дослідження енергетичних характеристик електричного трицикла

3.4.1. Випробування в режимі холостого ходу

Для визначення базових втрат тягового ЕП трицикла проведено випробування за вивішеного мотор-колеса. Вимірювання виконано для семи робочих точок у діапазоні частоти обертання від 100 до 720 об/хв. Для кожної робочої точки проведено три цикли вимірювань. Отримані результати наведено в рис. 3.11.

Таблиця 3.11 Результати випробувань у режимі ХХ за вивішеного мотор-колеса

RPM, об/хв	w, рад/с	Цикли випробувань						Середнє значення	
		1		2		3			
		P, Вт	T, Н	P, Вт	T, Н · м	P, Вт	T, Н · м	P, Вт	T, Н · м
100	10,467	20,510	1,960	21,905	2,093	22,366	2,137	21,594	2,063
200	20,933	36,816	1,759	37,741	1,803	37,733	1,803	37,430	1,788
300	31,400	55,911	1,781	65,016	2,071	64,275	2,047	61,734	1,966
400	41,867	85,123	2,033	85,525	2,043	83,794	2,001	84,814	2,026
500	52,333	115,910	2,215	128,926	2,464	114,499	2,188	119,778	2,289
600	62,800	139,121	2,215	145,146	2,311	128,830	2,051	137,699	2,193
720	75,360	166,456	2,209	165,963	2,202	170,112	2,257	167,510	2,223

Аналіз залежності середнього розрахункового моменту від частоти обертання мотор-колеса, наведеної на рис. 3.14, показав, що її апроксимація лінійною функцією $y = 0,057x + 1,848$ характеризується коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,5205$). Отримане значення свідчить, що лінійна модель недостатньо точно описує зміну розрахункового моменту в дослідженому

діапазоні частоти обертання від 100 до 720 об/хв. Отже, використання лінійної залежності моменту від частоти обертання для подальшого опису експериментальних результатів є недостатньо обґрунтованим.

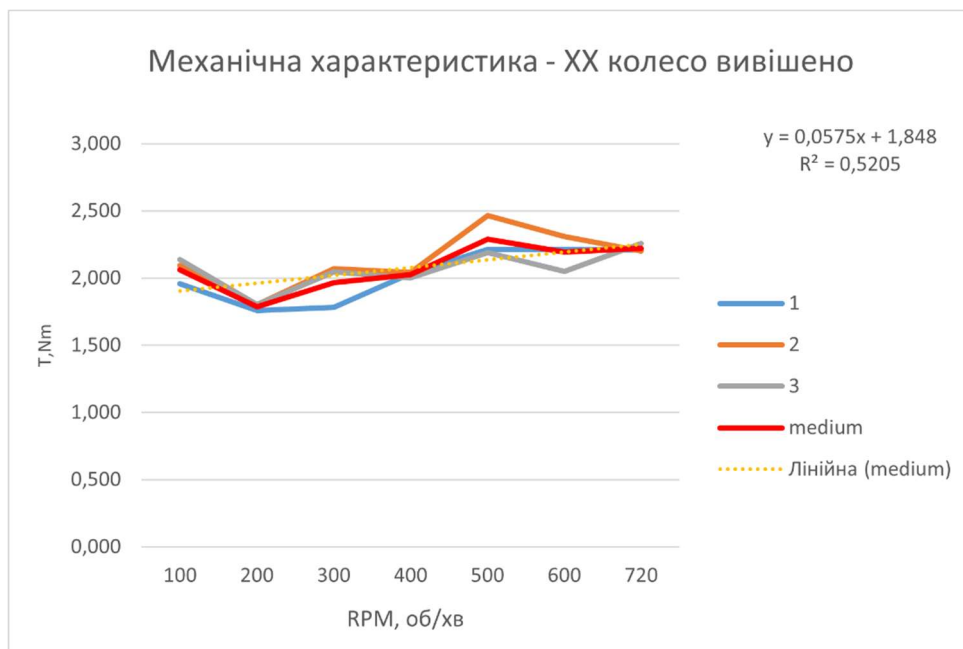


Рис. 3.14 Залежність розрахункового моменту від частоти обертання мотор-колеса в режимі XX

Аналіз залежності споживаної потужності від швидкості мотор-колеса, наведеної на рис. 3.15, показав принципово інший результат. Апроксимація експериментальних даних лінійною функцією ($y = 24,869x - 9,3962$) характеризується коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0.993$). Це свідчить про тісну лінійну залежність між швидкістю мотор-колеса та споживаною потужністю в режимі XX у межах дослідженого діапазону.

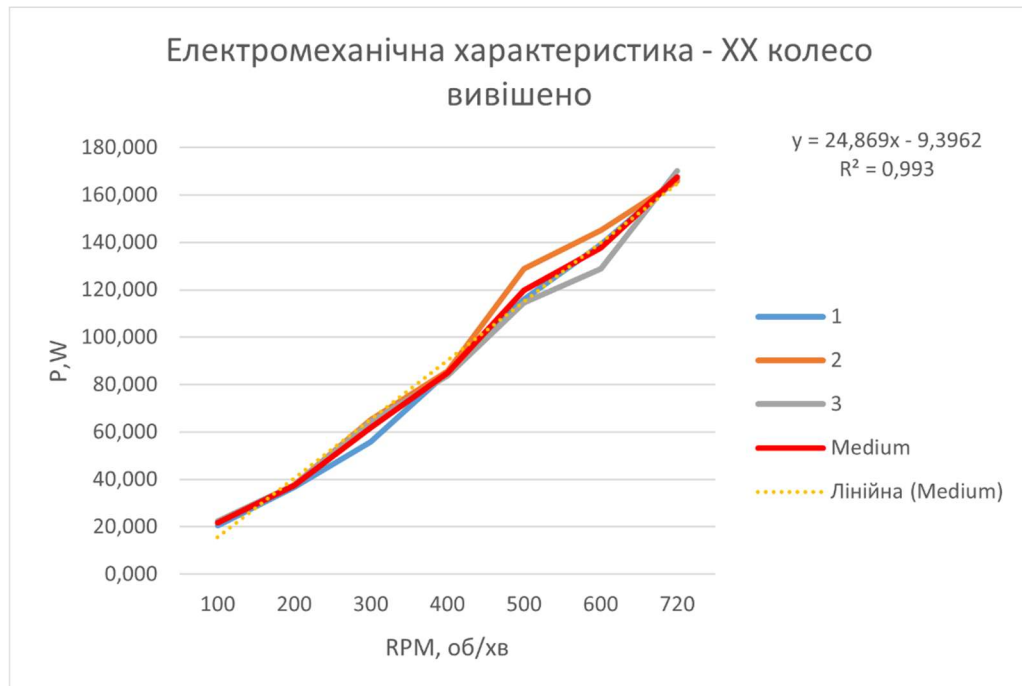


Рис. 3.15 Залежність споживаної потужності від швидкості мотор-колеса в режимі XX

3.4.2. Випробування трицикла на роликах

На наступному етапі експериментальних досліджень мотор-колесо трицикла було встановлено між опорними роликами навантажувального стенда. Зовнішній момент опору від НМ під час випробувань не формувався.

На відміну від режиму XX за вивішеного мотор-колеса, у цьому режимі виникають додаткові механічні опори, зумовлені контактом мотор-колеса з роликами, тертям у підшипникових вузлах, а також опором та інерційними властивостями навантажувального механізму. Вимірювання виконано для семи робочих точок у діапазоні частоти обертання від 100 до 630 об/хв. Для кожної робочої точки проведено три повторні цикли вимірювань. Отримані результати наведено в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 Результати випробувань трицикла на роликах без зовнішнього моменту від НМ

RPM, об/хв	w, рад/с	Цикли випробувань						Середнє значення	
		1		2		3			
		<i>P</i> , Вт	<i>T</i> , Н	<i>P</i> , Вт	<i>T</i> , Н · м	<i>P</i> , Вт	<i>T</i> , Н · м	<i>P</i> , Вт	<i>T</i> , Н · м
100	10,47	239,70	22,90	213,88	20,43	184,99	17,67	212,86	20,34
200	20,93	474,66	22,67	422,71	20,19	403,96	19,30	433,78	20,72
300	31,40	671,32	21,38	632,30	20,14	635,79	20,25	646,47	20,59
400	41,87	930,26	22,22	824,99	19,71	952,57	22,75	902,60	21,56
500	52,33	1183,77	22,62	1062,86	20,31	1181,72	22,58	1142,79	21,84
600	62,80	1328,49	21,15	1305,00	20,78	1228,40	19,56	1287,30	20,50
630	65,94	1526,78	23,15	1468,12	22,26	1485,61	22,53	1493,50	22,65

Аналіз залежності середнього розрахункового моменту від частоти обертання мотор-колеса, наведеної на Рис. 3.16, показав, що її апроксимація лінійною функцією ($y = 0,2764x + 20,064$) характеризується коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,4787$). Отримане значення свідчить, що навіть за наявності додаткових механічних опорів лінійна модель недостатньо точно описує залежність розрахункового моменту від частоти обертання.

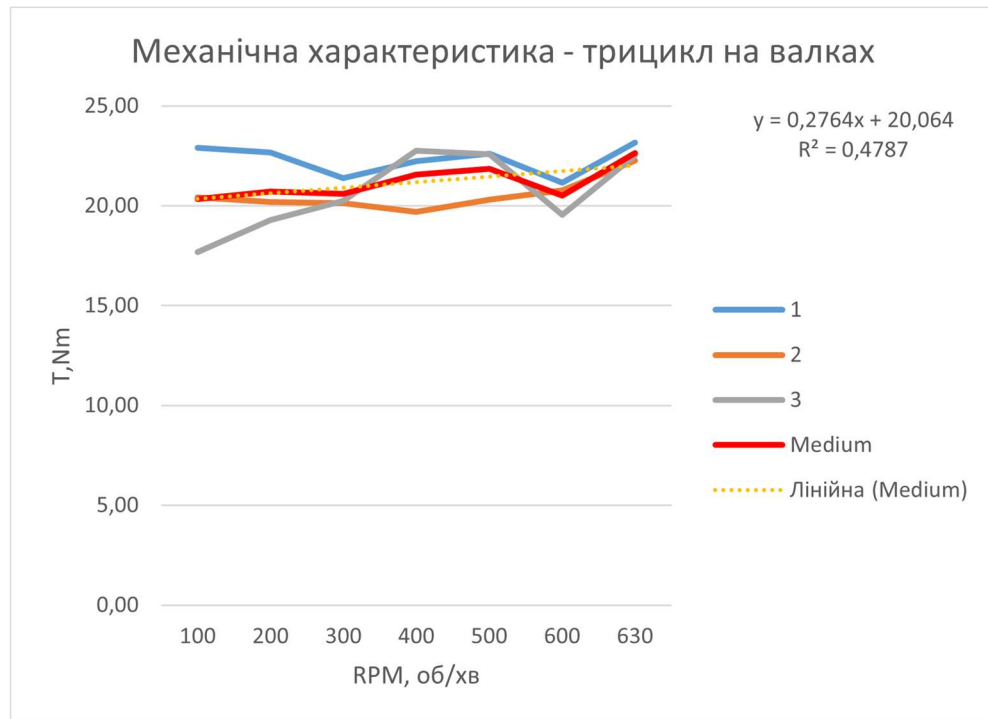


Рис. 3.16 Залежність розрахункового моменту від частоти обертання мотор-колеса під час роботи трицикла на роliках

Натомість залежність споживаної потужності від швидкості мотор-колеса, наведена на рис. 3.17, має виражений лінійний характер. Апроксимація експериментальних даних функцією ($y = 215,9x + 10,571$) характеризується коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,9961$).

Отриманий результат підтверджує, що в умовах стендових випробувань споживана потужність є репрезентативним параметром для подальшого аналізу енергоспоживання та валідації математичної моделі. Водночас залежність розрахункового моменту від швидкості в межах досліджених режимів недостатньо точно описується лінійною функцією.

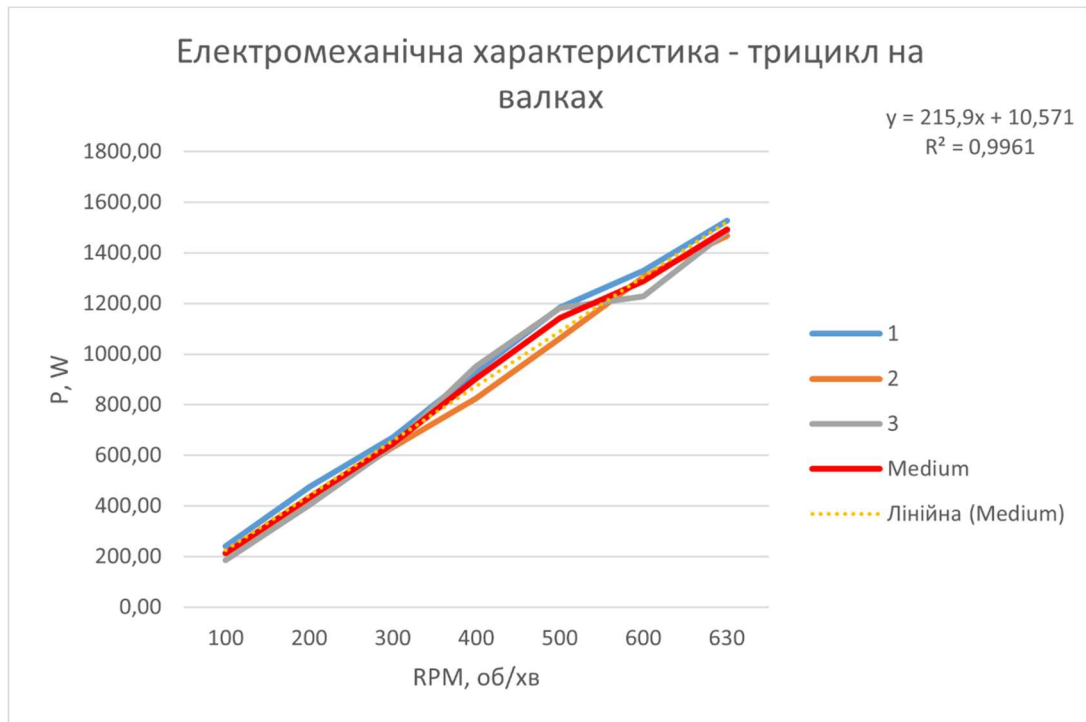


Рис. 3.17 Залежність споживаної потужності від швидкості мотор-колеса під час роботи трицикла на роликах

Узагальнення отриманих результатів показало, що залежність споживаної потужності від швидкості має виражений лінійний характер як у режимі ХХ за вивішеного мотор-колеса, ($R^2 = 0.993$), так і під час роботи трицикла на роликах, ($R^2 = 0,9961$). Водночас лінійна апроксимація залежності розрахункового моменту від швидкості характеризується значно нижчими коефіцієнтами детермінації.

Отже, для подальшого опрацювання експериментальних результатів, оцінювання витрат енергії та валідації математичної моделі доцільно використовувати залежність споживаної потужності від швидкості руху.

3.4.3. Встановлення закономірності впливу спорядженої маси трицикла на енергоспоживання

Експериментальне визначення впливу додаткової маси дає змогу оцінити чутливість споживаної потужності трицикла до зміни навантаження та перевірити обґрунтованість урахування маси в математичній моделі.

З огляду на встановлену високу лінійну кореляцію між споживаною потужністю та кутовою швидкістю мотор-колеса в стендових умовах проведено серію випробувань за додатковій (спорядженої) маси 0, 20, 40, 60, 80 та 100 кг.

Для кожного значення додаткової маси виконано п'ять повторних циклів. Це дало змогу визначити середні значення досліджуваних параметрів та оцінити повторюваність отриманих результатів.

Додаткове вантаження розміщували та фіксували на місці водія в зоні розташування центра мас трицикла. Під час усіх повторних циклів положення вантажу відносно рами залишалося незмінним. Середні значення кутової швидкості мотор-колеса та споживаної потужності наведено в таблиці 3.13.

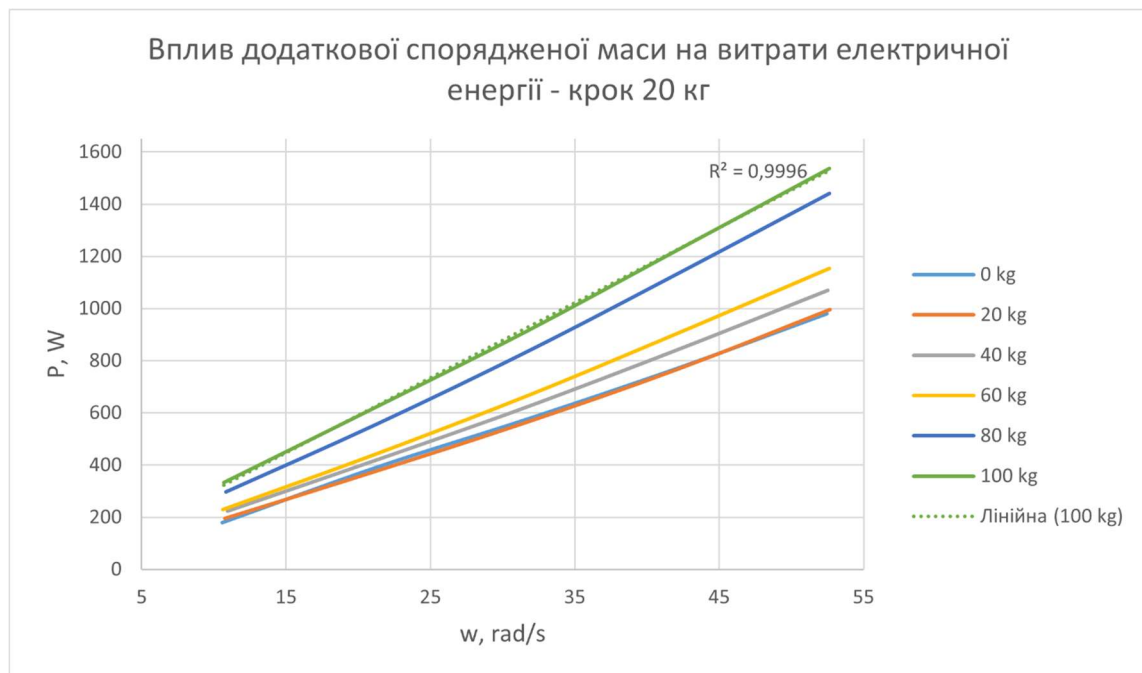


Рис. 3.18 Залежність споживаної потужності від кутової швидкості мотор-колеса за різної додаткової маси трицикла

Таблиця 3.13 Середні значення кутової швидкості та споживаної потужності за різної спорядженої маси трицикла

n, об/хв	Споряджена маса m_{sp}											
	0 кг		20 кг		40 кг		60 кг		80 кг		100 кг	
	ω , рад/ с	P, Вт	ω , рад/ с	P, Вт	ω , рад/ с	P, Вт	ω , рад/ с	P, Вт	ω , рад/ с	P, Вт	ω , рад/ с	P, Вт
100	10,5 9	179,6 0	10,7 4	195,4 8	10,9 4	223,20	10,6 1	229,63	10,8 3	297,46	10,6 9	333,18
200	21,1 9	389,9 2	21,0 1	373,0 4	21,3 3	420,55	21,1 5	441,18	21,2 8	557,16	21,2 1	621,94
300	31,4 1	570,7 2	31,5 9	562,9 0	31,5 5	619,70	31,6 8	665,41	31,8 4	838,73	31,5 8	910,72
400	41,9 9	768,4 8	42,1 3	767,6 7	42,2 7	844,74	41,8 3	898,89	41,8 0	1123,9 5	42,0 2	1222,1 5
500	52,4 5	979,6 8	52,6 7	995,7 8	52,5 4	1069,1 7	52,6 2	1153,7 6	52,6 3	1440,5 1	52,6 3	1537,8 8
R^2	0,9995		0,9979		0,9991		0,9998		0,9988		0,9996	

Отримані залежності споживаної потужності від кутової швидкості мотор-колеса, наведені на рис. 3.18, мають виражений лінійний характер. Коефіцієнти детермінації для досліджених значень додаткової маси становлять від $R^2 = 0,997 - 0,9998$. Це підтверджує можливість використання лінійної апроксимації залежності споживаної потужності від кутової швидкості в межах дослідженого діапазону.

Збільшення додаткової маси супроводжується зростанням споживаної потужності в усіх досліджених режимах. Наприклад, за частоти обертання 500 об/хв збільшення додаткової маси від 0 до 100 кг призвело до зростання середньої споживаної потужності від 979,68 до 1537,88 Вт, тобто на 558,20 Вт або 57 %. Отримані результати підтверджують суттєвий вплив маси трицикла на споживану потужність тягового ЕП.

3.5. Експериментальне дослідження впливу топології маршруту на витрати енергії трицикла

Оцінювання впливу топології маршруту на витрати електричної енергії трицикла виконували із застосуванням фази LOW циклу WLTC Class 3b (рис. 3.19), передбаченого процедурою WLTP. Фазу LOW обрано з огляду на технічну можливість трицикла відтворити максимальну швидкість 56,6 км/год, передбачену цією фазою. Максимальна виміряна швидкість трицикла на НУ без додаткової маси становила 62 км/год, що забезпечувало відтворення заданого швидкісного профілю.



Рис. 3.19 Тахограма фази LOW циклу WLTC Class 3b

Під час досліджень мотор-колесо трицикла встановлювали на опорні ролики НУ. Частотно-керований ЕП НМ працював у режимі підтримання моменту та через навантажувальний механізм формував додатковий момент опору. Значення моменту задавали відповідно до складової сили тяжіння, що діє вздовж дорожнього профілю під час руху вгору за визначеного кута нахилу.

Зважаючи на встановлену в попередніх експериментах високу лінійну кореляцію між споживаною потужністю та швидкістю, для подальших вимірювань складових втрат у НУ і визначення еквівалентних параметрів топології прийнято додаткову масу ($m_{sp} = 45$ кг) кг та частоту обертання мотор-колеса ($n_{vr} = 300$ об/хв). Власна маса трицикла становила 62 кг. Основні геометричні та масові параметри трицикла наведено в рис. 3.2.

3.5.1. Розрахункове визначення сил і еквівалентного кута топологічного профілю

Загальна вага трицикла:

$$F_v = m_v g, \text{ Н} \quad (3.1)$$

де m_v – маса трицикла зі спорядженою масою, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Вага, що припадає на передню та задню осі, визначається з рівнянь статичної рівноваги. При цьому трицикл розглядається як жорстке тіло, а точки опори розташовані у площині контакту:

$$F_{vf} = \frac{F_v \cdot l_{vr}}{l_{vf} + l_{vr}}, \text{ Н} \quad (3.2)$$

$$F_{vr} = \frac{F_v \cdot l_{vf}}{l_{vf} + l_{vr}}, \text{ Н} \quad (3.3)$$

де F_{vf} – є вагою, що припадає на передню вісь, Н; F_{vr} – є вагою, що припадає на задню вісь, Н; l_{vf} – відстань від центра мас до передньої осі, м; l_{vr} – відстань від центра мас до задньої осі, м; $l_v = l_{vf} + l_{vr}$ – міжосьова відстань, м.

Нормальна сила, що діє на передні колеса на горизонтальній опорі, визначається як:

$$N_{vf} = F_{vf}, \text{ Н} \quad (3.4)$$

Мотор-колесо трицикла контактує з двома роликами НУ, тому навантаження задньої осі розподіляється між двома точками опори. За прийнятої геометрії контакту нормальна сила, що діє на кожен ролик, визначається за виразом:

$$N_{vr} = \frac{F_{vr}}{2 \cdot \cos \alpha}, \text{ Н} \quad (3.5)$$

де α – кут між напрямком нормальної реакції ролика та вектором ваги F_{vr}

Схему нормальних сил, що діють на мотор-колесо під час його контакту з роликами, наведено на Рис. 3.20. Геометричні параметри контакту наведено в таблиці 3.15.

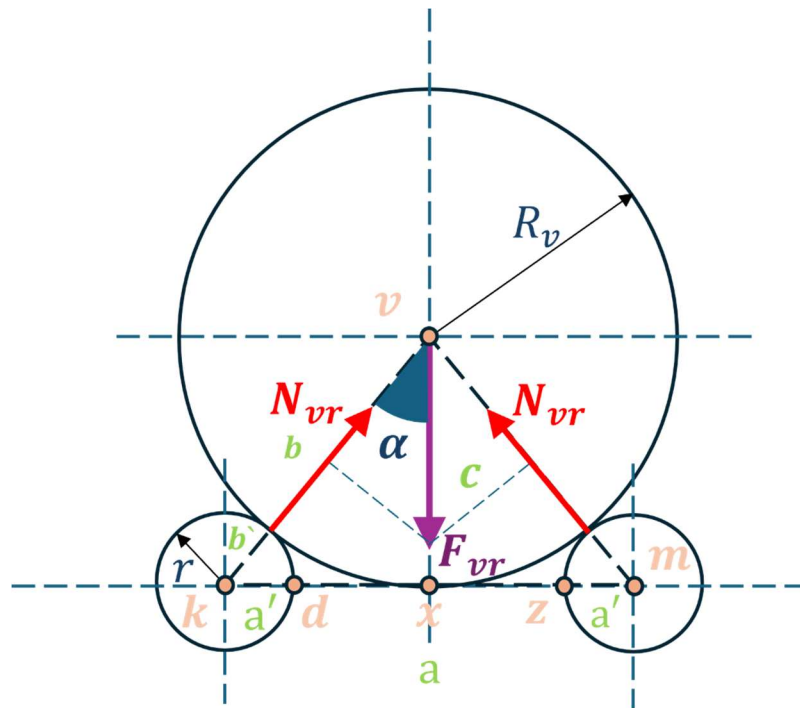


Рис. 3.20 Нормальні сили, що діють на мотор-колесо під час контакту з роликами НУ

Таблиця 3.15 Геометричні параметри мотор-колесо на роликах

a	a'	b	b'	c	dz	k-m	k-x	k-v	v-x	α
м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	рад.
0,492	0,065	0,362	0,065	0,225	0,232	0,362	0,181	0,427	0,386	0,437

Сили опору кочення та сила скаткування

В умовах НУ сила опору коченню заднього колеса визначається з урахуванням контакту мотор-колеса з двома роликами. Наявність двох точок опори впливає на нормальні реакції та рівень додаткових механічних втрат.

Загальна сила опору коченню за еквівалентного кута топологічного профілю θ визначається як сума складових для передніх коліс і мотор-колеса:

$$F_{r\theta} = F_{rf\theta} + F_{rr\theta}, \text{ Н} \quad (3.6)$$

$$F_{rf\theta} = N_{vf} f_r \cos^2(\theta), \text{ Н} \quad (3.7)$$

$$F_{rr\theta} = 2N_{vr} f_r \cos^2(\theta), \text{ Н} \quad (3.8)$$

де f_{rf} – коефіцієнт опору кочення передніх коліс; f_{rr} – коефіцієнт опору кочення мотор-колеса; множник 2 у (3.8) враховує дві точки опори мотор-колеса на роликах; θ – еквівалентний кут топологічного профілю, рад.

Сила скаткування, еквівалентна руху під кутом θ , визначається як:

$$F_{pl} = F_v \sin(\theta), \text{ Н} \quad (3.9)$$

Загальна сила опору руху з урахуванням сил опору коченню, сили скаткування, інерційної складової та аеродинамічного опору визначається за виразом:

$$F_{t\theta} = F_{r\theta} + F_{pl} + m_v a_v + F_w, \text{ Н} \quad (3.10)$$

де a_v – прискорення трицикла, м/с^2 ; F_w – сила аеродинамічного опору, Н. Під час лабораторних випробувань трицикл не здійснює поступального руху відносно повітря, тому прийнято $F_w = 0$.

Виділення складових потужності на НУ та визначення еквівалентного кута θ

Значення коефіцієнтів опору коченню та еквівалентної сили скаткування визначають експериментально шляхом виділення окремих складових потужності трицикла, встановленого на НУ. Схему складових споживаної потужності наведено на рис. 3.21, а їх перелік і фізичний зміст наведено в таблиці 3.16.

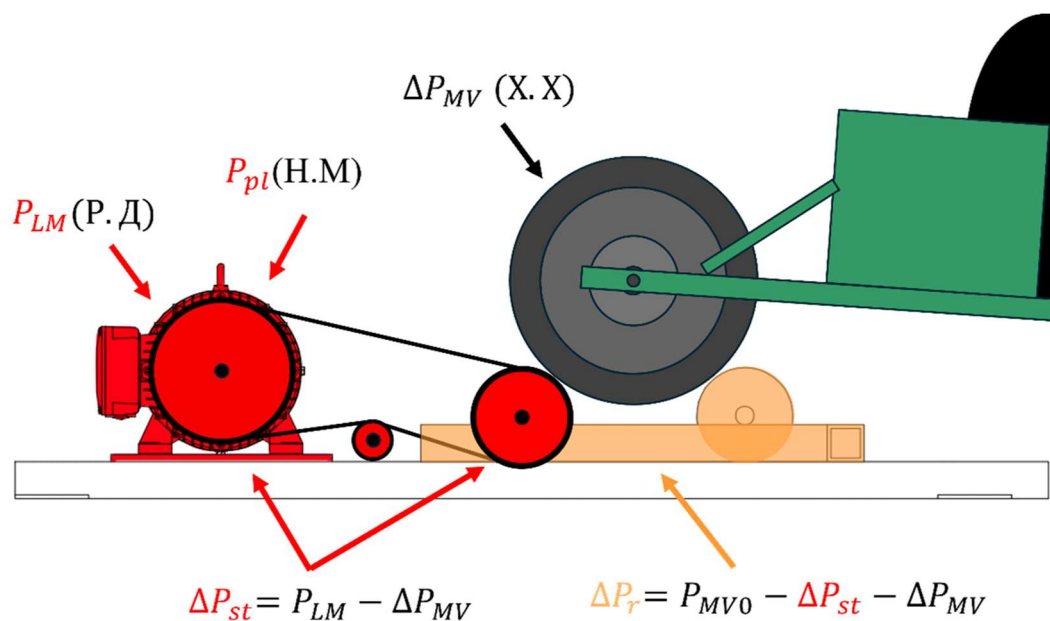


Рис. 3.21 Складові споживаної потужності трицикла на НУ

Таблиця 3.16 Складові потужності на НУ

Складова потужності, Вт	Опис
ΔP_{MV}	Втрати у мотор-колесі в режимі XX за вивішеного колеса. До них належать втрати у сталі та міді, механічні втрати у підшипниках і втрати у контролері.
ΔP_{st}	Втрати у стенді: механічні втрати в НМ та навантажувальному механізмі.
ΔP_r	Втрати на роликах і в контакті «колесо-ролики», зумовлені тертям та опором коченню під час обертання мотор-колеса

P_{pl}	Потужність, пов'язана зі створенням додаткового моменту опору НМ, який є еквівалентом впливу топологічного профілю
P_{LM}	Потужність, що відповідає роботі ЕП НМ у режимі двигуна та використовується для виділення втрат стенда

Сумарна потужність, споживана трициклом на НУ без зовнішнього моменту навантаження, коли НМ не створює додаткового моменту, визначається як:

$$P_{MV0} = \Delta P_{MV} + \Delta P_{st} + \Delta P_r, \text{ Вт} \quad (3.11)$$

Сумарна потужність при i -му рівні додаткового моменту (i -те навантаження НМ):

$$P_{MVN,i} = P_{pl,i} + \Delta P_{MV} + \Delta P_{st} + \Delta P_r, \text{ Вт} \quad (3.12)$$

Звідси потужність, еквівалентна топологічній складовій:

$$P_{pl,i} = P_{MVN,i} - P_{MV0}, \text{ Вт} \quad (3.13)$$

Аналітичний зв'язок між P_{pl} та силою скатування:

$$P_{pl} = F_{pl} v_{vr} = F_v v_{vr} \sin(\theta), \text{ Вт} \quad (3.14)$$

де $v_{vr} = \omega_{vr} R_v$ – лінійна швидкість обода мотор-колеса, м/с; $\omega_{vr} = n_{vr} \cdot 2\pi/60$ – кутова швидкість, рад/с.

З урахуванням (3.13) і (3.14) еквівалентний кут топологічного профілю для i -го навантаження:

$$\theta_i = \arcsin\left(\frac{P_{pl,i}}{F_v v_{vr}}\right) \quad (3.15)$$

Втрати у стенді ΔP_{st} визначаються через виміряні/виділені значення P_{LM} та ΔP_{MV} :

$$\Delta P_{st} = P_{LM} - \Delta P_{MV}, \text{ Вт} \quad (3.16)$$

Втрати у роликах:

$$\Delta P_r = P_{MV0} - \Delta P_{st} - \Delta P_{MV}, \text{ Вт} \quad (3.17)$$

3.5.2. Визначення коефіцієнта опору кочення мотор-колеса f_{rr} в умовах НУ

Коефіцієнт опору кочення мотор-колеса f_{rr} оцінюють за співвідношенням моменту опору та нормальної реакції. З урахуванням того, що потужність втрат у контакті «колесо–ролики» відповідає $\Delta R_r = \omega_{vr} M$, коефіцієнт опору кочення визначається за виразом:

$$f_{rr} = \frac{M}{R_v \cdot N_{vr}} = \frac{\Delta P_r}{\omega_{vr} \cdot R_v \cdot N_{kr}} \quad (3.18)$$

де R_v – ефективний радіус мотор-колеса, м, значення якого на 3–7 мм менше за геометричний радіус; N_{kr} – нормальна сила контакту мотор-колеса з роликами НУ, Н:

$$N_{kr} = \frac{F_{vr}}{\cos \alpha} \quad (3.19)$$

Результати вимірювань та розрахунку коефіцієнта опору кочення f_{rr} наведено в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 Дані експерименту з визначення коефіцієнта опору кочення f_{rr}

Дані експерименту							
m_{sp}	n_{vr}	ΔP_{MV}	P_{MV0}	P_{LM}	ΔP_{st}	ΔP_r	f_{rr}
кг	об/хв	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	-
45	300	96,74	725,40	401,24	304,49	324,16	0,078

Отримане значення f_{rr} (таблиця 3.16) є вищим за типові значення коефіцієнта опору кочення для дорожніх умов, наведені в таблиці 3.18. Це пояснюється додатковим контактом мотор-колеса з роликами, посиленими гістерезисними деформаціями шини, більшою кривизною поверхонь у зоні контакту, додатковими втратами в елементах НУ та періодичними динамічними коливаннями трицикла під час роботи на роликах.

Таблиця 3.18 Значення коефіцієнта опору кочення для різних дорожніх умов [163]

Значення f_r	Опис
0,001-0,002	залізничні сталеві колеса на сталевих рейках
0,001	велосипедна шина на дерев'яній доріжці
0,002-0,005	безкамерні шини з низьким опором
0,002	велосипедна шина на бетоні
0,004	велосипедна шина на асфальтовій дорозі
0,005	брудні трамвайні рейки
0,006-0,01	Вантажна шина на асфальті
0,008	Велосипедна шина на нерівній асфальтовій дорозі
0,01-0,015	Звичайна автогума на бетоні, новий асфальт, бруківка брудна нова
0,02	Автомобільні шини на гудроні або асфальті
0,02	Автогума на щебні, закатана нова
0,03	Автомобільні шини на бруківці, сильно потерті
0,04-0,08	Автомобільна гума на суцільному піску, гравій пухкий зношений, ґрунт середньої твердості
0,2-0,4	Автомобільна шина на сипучому піску

Оцінка похибки вимірювання потужності.

На точність експериментального визначення складових потужності впливають граничні похибки вимірювальних приладів: $\Delta I = \pm(2\% \cdot I + 0,05A)$, $\Delta U = \pm(0,5\% \cdot U + 0,02V)$ та $\Delta n = \pm(0,05\% \cdot n + 1 \text{ об/хв})$.

Оскільки миттєву потужність визначали за виразом $P = U \cdot I$, граничну відносну похибку вимірювання потужності оцінювали за правилом поширення похибок:

$$\delta_P \approx \delta_U + \delta_I, \% \quad (3.20)$$

За наведеними паспортними характеристиками вимірювальних засобів отримано значення $\delta_P = 2,37\%$. Отримане значення враховували під час аналізу складових потужності та визначення еквівалентного кута топологічного профілю θ .

3.5.3. Експериментальне визначення сили скатування F_{pl} та залежності $F_{pl}(\theta)$

Під час визначення сили скатування $F_{pl,i}$ частотно-керований ЕП асинхронної НМ працював у режимі підтримки моменту. Для кожного i -го рівня навантаження НМ формувала заданий момент опору та відповідну потужність $P_{pl,i}$.

Еквівалентний кут топологічного профілю θ_i розраховували за формулою (3.15), а силу скатування визначали за формулою (3.9). За результатами експерименту визначено залежність зміни F_{pl} від θ . Дані наведено в Таблиця 3.19, графічну інтерпретацію на рис. 3.22.

Таблиця 3.19 Експериментальне визначення сили скатування F_{pl}

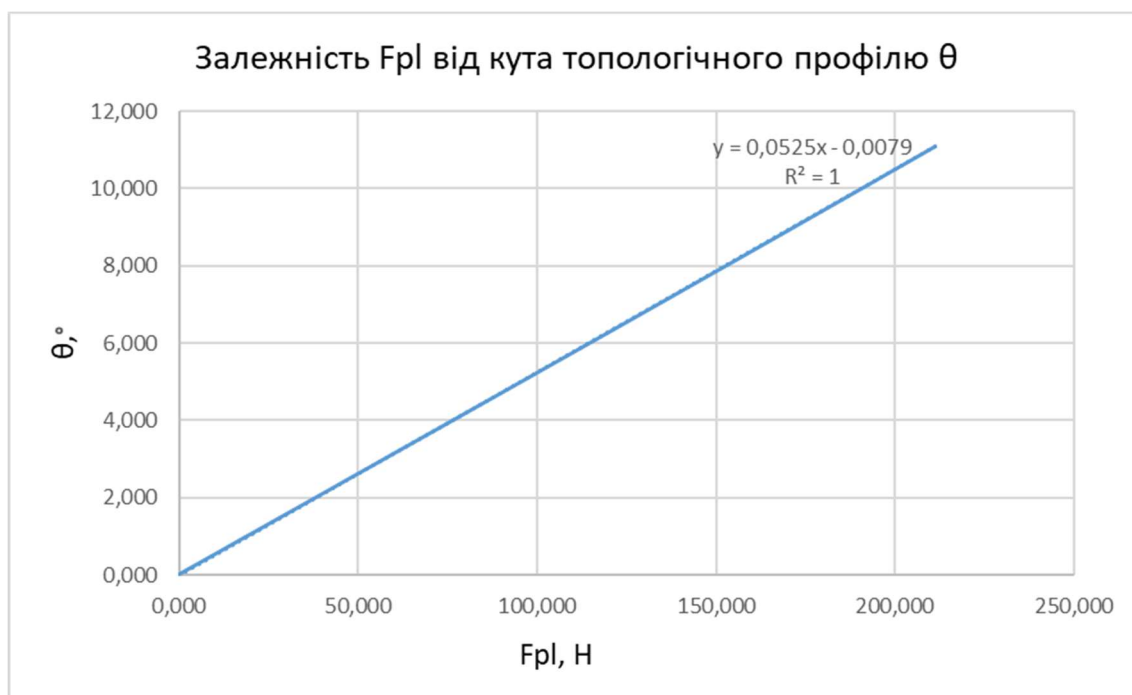


Рис. 3.22 Залежність сили скатування F_{pl} від кута топологічного профілю θ

За результатами апроксимації отримано лінійну залежність між F_{pl} та θ , вираженим у градусах:

$$F_{pl} = 19,031\theta^\circ + 0,151, \text{ Н} \quad (R^2 \approx 1) \quad (3.21)$$

Отримана залежність дає змогу визначати силу скатування для заданого значення еквівалентного кута топологічного профілю в межах дослідженого діапазону. Узагальнені значення, розраховані за виразом (3.21), наведено в таблиці 3.20.

Таблиця 3.20 Залежність сили скатування F_{pl} від еквівалентного кута топологічного профілю на НУ

θ , град	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_{pl} , Н	0,15	19,18	38,21	57,24	76,27	95,30	114,33	133,36	152,40	171,43	190,46
	1	2	3	4	5	6	7	9	0	1	2

Ненульове значення $F_{pl} = 0,151$, Н за $\theta = 0$ у Таблиця 3.20. зумовлене вільним членом отриманої апроксимаційної залежності. В експериментальній точці за відсутності додаткового навантаження прийнято $F_{pl} = 0$.

3.5.4. Перевірка адекватності моделі за WLTC LOW на горизонтальній площині

Перевірку адекватності моделі виконували за експериментальними даними відтворення трициклом фази LOW циклу WLTC Class 3b на горизонтальній ділянці за умови ($\theta = 0$) та додаткової маси 45 кг. Миттєве розрахункове значення потужності визначали як:

$$P_{mod,i} = \left| \frac{(F_{rr\theta} + m_v \cdot a_i) \cdot v_i}{\eta_d} + P_{d,i} \right|, \text{Вт} \quad (3.22)$$

де a_i – миттєве прискорення, м/с²; v_i – лінійна швидкість, м/с; η_d – зведений ККД системи; $P_{d,i}$ – додаткові витрати потужності, Вт.

Зведений ККД (η_d) враховує ККД контролера мотор-колеса, що дорівнює 0,95, ККД мотор-колеса, що дорівнює 0,90, та ККД підшипників опорних роликів НУ, що дорівнює 0,97. Розраховане значення зведеного ККД становить $\eta_d = 0,829$.

$$P_{d,i} = P_{LPS_i} + P_{sp_i}, \text{Вт} \quad (3.23)$$

де $P_{LP \ i}$ – є втратами потужності у провідниках живлення, Вт; P_{sp_i} – є власним споживанням системи за відсутності обертання мотор-колеса, прийнятим на рівні середнього еквівалентного значення за цикл, Вт.

Втрати потужності у провідниках живлення визначали як:

$$P_{LPS_i} = R_{dc} \cdot I_i^2, \text{Вт} \quad (3.24)$$



Рис. 3.23 Розрахункове P_{mod} та експериментальне P_{MV0} значення
споживаної потужності трициклом

Відмінність між розрахунковими та експериментальними результатами може бути зумовлена неврахованими втратами внаслідок вібрацій і коливань трицикла на роликах, зокрема поблизу резонансних частот обертання, похибками засобів вимірювання, відхиленням експериментальної тахограми від заданої тахограми WLTC, а також додатковими паразитними втратами НУ, які не були формалізовані в межах прийнятої моделі. Порівняння заданої та експериментальної тахограм наведено на рис. 3.24.

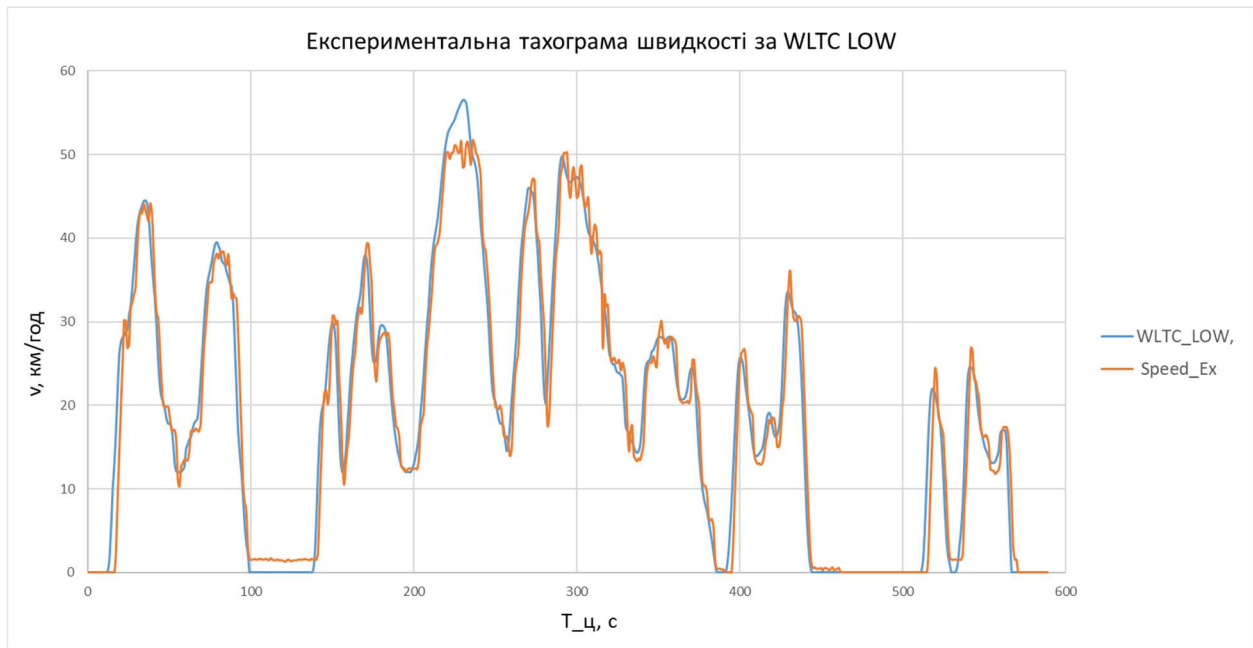


Рис. 3.24 Експериментальна тахограма швидкості за WLTC class 3b LOW, де:
 WLTC_LOW – тахограма швидкості за циклом WLTP, км/год; Speed_Ex –
 експериментальною швидкістю трицикла, км/год

Отримана похибка свідчить про прийнятну відповідність результатів математичного моделювання експериментальним даним у межах дослідженого режиму. Разом із тим її значення вказує на необхідність подальшого уточнення складових механічних втрат НУ та параметрів тягового ЕП.

3.5.5. Оцінювання відповідності мотор-колеса вимогам циклу WLTC LOW

Для оцінювання можливості відтворення трициклом фази LOW циклу WLTC Class 3b та інших швидкісних циклів порівнювали номінальний момент мотор-колеса (M_H) з еквівалентним моментом ($M_{ек}$), необхідним для реалізації заданої тахограми на горизонтальній ділянці або за наявності еквівалентного кута топологічного профілю.

Еквівалентний момент визначали у вигляді середньоквадратичного значення динамічного моменту:

$$M_{\text{ек}} = \sqrt{\frac{\sum_i M_{\text{д},i}^2 \cdot \Delta t_i}{\sum_i \Delta t_i}}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.26)$$

де $M_{\text{д},i}$ – динамічний момент на мотор-колесі у i -го інтервалу часу, Н·м; Δt_i – є тривалістю i -го інтервалу, с.

У загальному випадку працездатність приводу за циклом визначається виконанням перевірка двигуна за нагріванням та перевантажувальну здатність.

У межах даного підпункту виконано оцінювання за нагріванням.

$$M_{\text{н}} \geq M_{\text{ек}} \quad (3.27)$$

Перевірка трицикла під час руху горизонтальною ділянкою за спорядженої маси 45 кг показала, що номінальний момент установленого мотор-колеса перевищує необхідний еквівалентний момент. Отже, параметри встановленого мотор-колеса є достатніми для відтворення фази LOW циклу WLTC Class 3b.

За результатами розрахунку для відтворення заданої тахограми достатньо застосування мотор-колеса з номінальним моментом $M_{\text{н}} \geq 12,654, \text{ Н} \cdot \text{м}$ та частотою обертання без навантаження $n_{\text{н}} \geq 570 \text{ об/хв}$ об/хв. Приклади мотор-колес компанії QSmotor, що відповідають зазначеним вимогам, наведено в таблиці 3.22.

Таблиця 3.22 Моделі мотор-колес компанії QSmotor [164]

Модель мотор-колеса	$P_{\text{н}}$	$U_{\text{н}}$	$n_{\text{н}}$	$M_{\text{н}}$
	Вт	В	Об/хв	Н·м
QS 10 in 1000 Вт	1000	48	605	15,79
QS 10 in 1500 Вт	1500	48	780	18,37
QS 10 in 1500 Вт	1500	60	940	15,25

Продовження таблиці 3.22

QS 10 in 2000 Вт	2000	48	790	24,19
QS 10 in 2000 Вт	2000	60	960	19,90
де P_H – номінальна потужність мотор-колеса, Вт; U_H – номінальна напруга, В; n_H – частотою обертання без навантаження, об/хв; M_H – номінальний момент мотор-колеса, Н · м.				

3.6. Перспективні напрямки подальших досліджень та практичного використання розробленої моделі

Отримані у третьому розділі результати формують основу для подальшого розвитку прикладних і науково-методичних напрямів досліджень. З огляду на масштабованість запропонованого підходу та можливість його параметризації для конкретного типу транспортної платформи розроблену модель доцільно розглядати як складову інформаційних систем енергоефективного керування та планування руху електричного транспорту.

Практичні напрями застосування моделі:

1. Сервіси вибору енергоефективних маршрутів для приватних користувачів електромобілів. Розроблена модель може бути інтегрована в мобільні застосунки та вебсервіси як модуль прогнозування витрат електричної енергії для альтернативних шляхів одного маршруту. Це дасть змогу користувачу обирати маршрут із мінімальними витратами енергії з урахуванням топологічного профілю, швидкісного режиму та експлуатаційних параметрів конкретного ТЗ. До таких параметрів належать маса, коефіцієнти опору коченню, ККД тягового ЕП, стан АКБ та доступний запас енергії.

2. Оптимізація маршрутів електричних автопарків. Для служб таксі, доставки та сервісних автопарків модель може використовуватися в системах підтримки прийняття рішень під час вибору маршрутів із мінімальними

витратами електричної енергії. На основі прогнозованого енергоспоживання та залишкового запасу ходу також може виконуватися планування заряджання електричних ТЗ, вибір зарядних станцій та оцінювання економічної ефективності різних маршрутних стратегій.

3. Планування маршрутів міського електротранспорту. Запропонований підхід може бути адаптований для електробусів, тролейбусів з автономним ходом та інших видів громадського електротранспорту. Під час прогнозування енергоспоживання можуть враховуватися топологічний профіль маршруту, пасажирське навантаження, графік руху, кількість зупинок та режими розгону і гальмування. Отримані результати можуть використовуватися для планування маршрутів, визначення необхідного запасу енергії та обґрунтування параметрів зарядної інфраструктури.

4. Міжміська логістика та вантажні перевезення. Для електричних вантажних автомобілів і фургонів модель доцільно застосовувати для попереднього оцінювання витрат енергії на маршрутах зі значними перепадами висот. У таких умовах топологічний профіль істотно впливає на запас ходу та потребу в заряджанні. Подальше розширення моделі може передбачати врахування змінного корисного навантаження, часових обмежень доставки, погодних умов та розташування зарядних станцій.

5. Вбудовані системи енергоефективного керування рухом. Результати досліджень можуть бути використані в алгоритмах предиктивного керування, у яких прогнозовані витрати енергії застосовуються як один із критеріїв оптимізації режимів руху. Такий підхід дає змогу враховувати майбутні зміни швидкості, навантаження і топологічного профілю маршруту під час формування керувальних впливів. Цей напрям узгоджується з тематикою двостороннього проєкту «Model Predictive Dynamic Energy Efficient Control in Rotating Field Machines» (№ ДР 0124U003745).

6. Інтеграція електричного транспорту з мікромережами та зарядною інфраструктурою. Прогнозування витрат енергії на проходження маршруту

може використовуватися під час планування заряджання електричних ТЗ та керування навантаженням локальних електроенергетичних систем. Поєднання даних про топологічний профіль маршруту, стан АКБ, прогнозований час прибуття та доступну потужність зарядних станцій дає змогу узгоджувати режими руху і заряджання електричного транспорту з можливостями мікромережі. Цей напрям відповідає завданням проєкту «Models and means of improving the energy efficiency and reliability of microgrid systems in the context of Industry 4.0 and GreenTech concepts», який виконується у період із січня 2026 року до грудня 2028 року за фінансування Міністерства освіти і науки України коштом державного бюджету (№ ДР 0126U001138).

7. Використання в навчальному процесі та розвиток кіберфізичних лабораторій. Розроблена методика експериментальної валідації та стендова база можуть бути використані для створення навчально-дослідних лабораторних робіт зі спеціальності G3 «Електрична інженерія». Тематика таких робіт може охоплювати моделювання енергоспоживання, дослідження впливу топологічного профілю, експериментальне визначення втрат, аналіз рекуперативних режимів, дослідження АКБ та принципів керування зарядною інфраструктурою. Цей напрям узгоджується з цілями міжнародного проєкту DAAD «LAB4All – Open Access Cyber-Physical Laboratories for Ukrainian Universities» та досвідом цифрової підтримки навчання, отриманим у межах програми DAAD «Ukraine-Digital: Studienerfolg in Krisenzeiten sichern» у період із вересня до грудня 2024 року.

Перспективні напрями експериментальних і методичних досліджень.

1. Проведення довготривалих випробувань у реальних умовах та калібрування моделі. Перспективним є накопичення експериментальних даних щодо енергоспоживання за різних сезонів, температур, стану дорожнього покриття та стилів керування. Це дасть змогу уточнити параметри моделі, зокрема коефіцієнти опору коченню та ефективність рекуперації, зменшити

систематичну похибку та сформувані рекомендації щодо перенесення результатів лабораторних досліджень у реальні умови експлуатації.

2. Розширення функціональних можливостей НУ. Розроблена НУ може використовуватися для дослідження електровелосипедів, електроскутерів та мотор-колес різних типорозмірів. Подальше вдосконалення НУ може передбачати: підвищення стабільності контакту шини з роликами та зменшення паразитних втрат; реалізацію керованих профілів моменту та навантаження для відтворення різних дорожніх сценаріїв; регулювання температурного режиму і контроль тиску в шині; інтеграцію додаткових датчиків моменту, енергії та вібрацій для деталізації балансу втрат і підвищення точності валідації; автоматизацію відтворення топологічних і швидкісних профілів за даними реальних маршрутів.

3. Дослідження стану та деградації АКБ. На базі НУ доцільно розвивати методики оцінювання ступеня зарядженості SoC, стану працездатності SoH та деградації АКБ під час відтворення стандартизованих циклів навантаження. Окрему увагу доцільно приділити впливу режимів рекуперації, температури, глибини розряду, величини струму та швидкості зміни навантаження на параметри АКБ.

4. Дослідження взаємодії електричного транспорту з мікромережами. Перспективним напрямом є спільне моделювання енергоспоживання електричного ТЗ, процесів заряджання АКБ та режимів роботи локальної мікромережі. Подальші дослідження можуть передбачати оптимізацію часу і потужності заряджання з урахуванням прогнозованого маршруту, стану АКБ, локального споживання електричної енергії та генерації з відновлюваних джерел.

5. Удосконалення методів прогнозування енергоспоживання. Подальший розвиток моделі може передбачати врахування температури навколишнього середовища, стану дорожнього покриття, тиску в шинах, швидкості вітру, режимів роботи допоміжного обладнання та зміни параметрів АКБ у процесі

експлуатації. Перспективним є також використання адаптивних методів ідентифікації параметрів, які забезпечуватимуть уточнення моделі на основі накопичених експериментальних даних.

6. Розвиток методів енергоефективного планування руху. Розрахунок прогнозованих витрат енергії може бути доповнений багатокритеріальною оптимізацією, що одночасно враховує тривалість поїздки, відстань, витрати енергії, стан АКБ та доступність зарядної інфраструктури. Це дасть змогу формувати маршрутні рішення залежно від конкретних умов експлуатації та пріоритетів користувача.

Таким чином, подальший розвиток досліджень за визначеними напрямками дасть змогу підвищити точність розробленої моделі та забезпечити її перенесення з лабораторних умов у реальну експлуатацію. Запропонований підхід може бути адаптований для різних типів електричних транспортних платформ, інтегрований у системи планування маршрутів, алгоритми енергоефективного керування та засоби керування заряджанням у складі локальних мікромереж.

Створена експериментальна база також може використовуватися для дослідження стану АКБ, взаємодії електричного транспорту із зарядною та енергетичною інфраструктурою, розвитку кіберфізичних лабораторій та підготовки фахівців у сфері електричної інженерії.

3.7. Висновки за третім розділом

1. Розроблено та виготовлено електричний трицикл, НУ, СМПЕ і ПВКШ, які забезпечують відтворення заданих режимів руху, формування керованого моменту опору та реєстрацію основних електричних і механічних параметрів. Створена експериментальна база забезпечила відтворення фази LOW циклу WLTC Class 3b і дослідження впливу маси та еквівалентного кута топологічного профілю на енергоспоживання трицикла.

2. Експериментально визначено складові втрат потужності на НУ, до яких належать втрати у мотор-колесі в режимі ХХ, втрати у стенді та втрати в контактній парі «шина-ролики». На їх основі визначено коефіцієнт опору кочення мотор-колеса в умовах НУ $f_{rr} = 0,078$. Встановлено, що підвищене значення зумовлене особливостями контакту мотор-колеса з роликами та додатковими механічними втратами НУ. Це підтверджує необхідність експериментального калібрування коефіцієнта опору коченню для конкретної транспортної платформи та умов випробувань.

3. Розроблено лабораторну процедуру відтворення впливу топологічного профілю маршруту шляхом формування НМ додаткового моменту опору в режимі підтримки моменту. Експериментально встановлено лінійну залежність сили скаткування F_{pl} від еквівалентного кута θ , яка дає змогу визначати силову складову опору руху для заданого топологічного профілю в межах дослідженого діапазону.

4. Виконано валідацію математичної моделі за результатами відтворення фази LOW циклу WLTC Class 3b на горизонтальній ділянці ($\theta = 0$) за спорядженої маси 45 кг. Відносна похибка розрахункового значення витрат енергії порівняно з експериментальним результатом становила 10,94 %. Основними причинами відхилення є невраховані вібраційні та механічні втрати НУ, нестабільність контакту шини з роликами, похибки засобів вимірювання та відхилення експериментальної тахограми від заданого швидкісного профілю.

5. Запропоновано критерій оцінювання відповідності тягового ЕП вимогам стандартизованого швидкісного циклу на основі еквівалентного моменту $M_{ек}$. Встановлено, що номінальний момент установленого мотор-колеса є достатнім для відтворення фази LOW циклу WLTC Class 3b. Отримані результати можуть використовуватися для вибору параметрів тягового ЕП під час проектування та модернізації дво- і триколісного електромобільного транспорту, а також для планування стендових випробувань.

6. Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості експериментального визначення параметрів опору руху та топологічної складової для конкретного ТЗ з подальшим використанням у моделях прогнозування енергоспоживання і системах вибору енергоефективних маршрутів. Перспективними напрямками є проведення довготривалих натурних випробувань, удосконалення НУ, дослідження стану і деградації АКБ, інтеграція моделі в алгоритми енергоефективного керування, зарядну інфраструктуру та системи керування мікромережами.

7. Сформульовано перспективні напрямки подальших досліджень та практичного використання розробленої математичної моделі.

РОЗДІЛ 4. РОЗДІЛ. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАРШРУТУ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ З УРАХУВАННЯМ ТОПОЛОГІЇ

На основі досліджень, виконаних у розділах 2 і 3, сформовано методику техніко-економічного обґрунтування вибору найбільш енергоефективного варіанта шляху між заданими початковою та кінцевою точками маршруту електромобіля.

Метою розділу є кількісне оцінювання практичного ефекту від застосування інформаційної системи прогнозування витрат енергії електромобіля з урахуванням топологічного профілю маршруту. Для цього розраховану механічну роботу перераховано у витрати електричної енергії, вартість однієї поїздки та економію, що забезпечується вибором енергоефективного шляху. Окремо оцінено витрати на створення і функціонування програмного сервісу та показники його економічної ефективності.

Для розрахунку використано результати моделювання трьох альтернативних шляхів маршруту з помірною топологією, розташованого в Італії. Оскільки досліджуваний маршрут проходить територією Італії, вартість електричної енергії визначено за цінами для цієї країни. Для побутових споживачів прийнято середню ціну $c_h = 0,2966$ євро/кВт·год, а для непобутових споживачів $c_h = 0,2203$ євро/кВт·год за даними Eurostat за друге півріччя 2025 року [165], [166].

Наведені значення характеризують середню вартість електричної енергії для відповідних категорій споживачів. Вартість заряджання на громадських зарядних станціях може відрізнятися, оскільки додатково враховує тариф оператора зарядної інфраструктури.

Для застосування методики в умовах України послідовність розрахунку не змінюється. У формули підставляється чинна ціна електричної енергії для

відповідної категорії споживача. Для побутових споживачів може використовуватися фіксована ціна 4,32 грн/кВт·год [167], а для непобутових споживачів фактична ціна за договором із постачальником або репрезентативне ринкове значення за даними АТ «Оператор ринку» [168].

Для оцінювання витрат на створення і функціонування інформаційної системи використано публічні умови Google Maps Platform [169], Amazon Web Services [170], Apple Developer Program [171] і Google Play Console [172]. Для визначення ставки дисконтування використано дані НБУ [173], а для оцінювання вартості розроблення ПЗ довідкові дані щодо ставок ІТ-розробників [174].

4.1. Методика розрахунку економічного ефекту від вибору енергоефективного шляху

Для розрахунку використано значення механічної роботи A , отримані в розділі 2 для трьох альтернативних шляхів одного маршруту. Розрахунок виконано в такій послідовності.

Механічну роботу переводили з кілоджоулів у кіловат-години: кВт·год:

$$A_i = \frac{A_{i,\text{кДж}}}{3600}, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (4.1)$$

де A_i є механічною роботою для подолання i -го шляху, кВт·год; $A_{i,\text{кДж}}$ – механічна робота для подолання i -го шляху, кДж; 3600 – коефіцієнтом перерахунку.

Витрати електричної енергії з урахуванням ККД силового агрегату визначали як:

$$W_i = \frac{A_{i,\text{кВт} \cdot \text{год}}}{\eta} \quad (4.2)$$

де W_i – витрати електроенергії для подолання i -го шляху, кВт·год; η – зведений ККД силового агрегату.

Вартість електричної енергії для однієї поїздки визначали за виразом:

$$C_i = W_i \cdot c_e \quad (4.3)$$

де C_i – електричної енергії для подолання i -го шляху, грн; c_e – ціна електроенергії, євро/кВт·год.

Економію електричної енергії для i -го шляху відносно базового шляху № 1 визначали як:

$$\Delta W_i = W_1 - W_i, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (4.4)$$

Відносну економію електричної енергії визначали за співвідношенням:

$$\delta_{W,i} = \left(\frac{W_1 - W_i}{W_1} \right) \cdot 100\%$$

Грошову економію за одну поїздку визначали як:

$$\Delta C_i = \Delta W_i \cdot c_e \quad (4.5)$$

Економію за місяць визначали з урахуванням кількості поїздок:

$$E_{\text{міс}} = \Delta C_i \cdot N_{\text{міс}} \quad (4.6)$$

де $N_{\text{міс}}$ – кількість поїздок на місяць.

4.2. Результати розрахунків для Шляхів № 1-3

Розрахунок виконано за вихідними даними для швидкісного режиму Med_3-2. Зведений ККД силового агрегату прийнято $\eta = 0,88$. Результати розрахунку за формулами (4.1)–(4.6) наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Витрати енергії та її вартість для альтернативних шляхів маршруту

Показник	Позначення	Шлях № 1	Шлях № 2	Шлях № 3
Середня швидкість, км/год	$v_{\text{сер}}$	69,88	45,47	40,42
Довжина шляху, км	L	42,155	28,749	31,128
Механічна робота, кДж	$A_{r,kJ}$	28882,450	20973,110	23427,280
Механічна робота, кВт · год	$A_{\text{кДж}}$	8,023	5,826	6,508
Витрати електроенергії, кВт · год	W	9,117	6,620	7,395
Вартість для побутового споживача, євро	C_h	2,704	1,963	2,193
Вартість для непобутового споживача, євро	C_b	2,008	1,458	1,629
Економія енергії, відносно шляху №1, %	δ_W	0	27,388	18,887
Економія для побутового споживача, євро	ΔC_h	0	0,741	0,511
Економія для непобутового споживача, євро	ΔC_b	0	0,550	0,379

Із таблиці 4.1 видно, що найменші витрати електричної енергії забезпечує шлях № 2. Для його подолання необхідно 6,620 кВт·год, що на 2,497 кВт·год або 27,388 % менше порівняно зі шляхом № 1.

Економія для побутового споживача становить 0,741 євро за одну поїздки, а для непобутового споживача 0,550 євро. Шлях № 3 також є енергоефективнішим за шлях № 1, однак поступається шляху № 2.

Отже, за прийнятих умов шлях № 2 є найбільш доцільним за енергетичним та економічним критеріями. Отриманий результат визначається сукупним впливом довжини шляху, його топологічного профілю та швидкісного режиму.

Вплив швидкісного режиму на витрати електричної енергії та її вартість для побутового споживача наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Витрати електричної енергії та її вартість за різних швидкісних режимів

Фаза	Шлях №1		Шлях №2		Шлях №3	
	W_1 , кВт·год	$C_{h,1}$, євро	W_2 , кВт·год	$C_{h,2}$, євро	W_3 , кВт·год	$C_{h,3}$, євро
Low-3	8,120	2,408	5,960	1,768	6,720	1,993
Med_3-2	9,120	2,705	6,620	1,963	7,390	2,192
High_3-2	8,880	2,634	6,460	1,916	7,230	2,144
Extra-high-3	10,580	3,138	7,580	2,248	8,390	2,488
Total_CI-3b	8,290	2,459	6,002	1,780	6,690	1,984

Найбільші витрати електричної енергії для всіх трьох шляхів отримано в режимі Extra-high-3. Це підтверджує суттєвий вплив швидкісного режиму на енергоспоживання електромобіля.

У всіх розглянутих режимах найменші витрати енергії забезпечує шлях № 2. Отже, його перевага зберігається не лише для режиму Med_3-2, а й для інших досліджених швидкісних режимів.

4.2.1. Капітальні та експлуатаційні витрати на створення та підтримку інформаційної системи

Визначення енергоефективного шляху доцільно реалізувати у вигляді програмного сервісу, інтегрованого з картографічними та навігаційними платформами. Такі платформи надають топографічні дані та програмні інтерфейси API, необхідні для побудови альтернативних шляхів і прогнозування витрат енергії.

У межах розрахункового сценарію витрати на створення інформаційної системи поділено на первісні капітальні інвестиції та поточні експлуатаційні витрати. Первісні інвестиції $K_{\text{перв}}$ охоплюють розроблення, інтеграцію та запуск ПЗ. Експлуатаційні витрати $V_{\text{експ}}$ охоплюють хостинг, використання картографічних API, ліцензійні платежі, підтримку та оновлення системи.

Операційну точку беззбитковості, тобто мінімальну місячну плату за обслуговування одного електромобіля, яка покриває поточні експлуатаційні витрати, визначали як:

$$p_{\text{беззб}} = \frac{V_{\text{експ}}}{N_{\text{авто}}} \quad (4.7)$$

де $p_{\text{беззб}}$ операційна беззбиткова плата, грн/авто·міс; $V_{\text{експ}}$ – місячними експлуатаційними витратами постачальника сервісу, грн/міс; $N_{\text{авто}}$ – кількість активних електромобілів, підключених до сервісу.

Первісні інвестиції у розроблення та запуск програмного продукту оцінювали за виразом:

$$K_{\text{перв}} = \left(3 \text{ люд.} \cdot \text{міс} \cdot 160 \frac{\text{год}}{\text{міс}} \cdot 35 \frac{\text{дол.}}{\text{год}} \right) + 2000 \text{ дол.} = \$18\,800 \text{ дол.} \quad (4.8)$$

$$\approx 780\,000 \text{ грн.}$$

У розрахунку прийнято тривалість розроблення 3 людино-місяці, місячний фонд робочого часу 160 год і ставку 35 дол./год [174]. Додаткові витрати на початкове налаштування інфраструктури, тестування та публікацію програмного

продукту прийнято на рівні 2000 дол. Для подальших розрахунків використано значення $K_{\text{перв}} = 780\,000$ грн.

Амортизацію ПЗ визначали прямолінійним методом:

$$A_{\text{рік}} = \frac{K_{\text{перв}} - K_{\text{лікв}}}{T_{\text{служ}}}; A_{\text{міс}} = \frac{A_{\text{рік}}}{12} \quad (4.9)$$

де $K_{\text{лікв}} = 0$ є ліквідаційною вартістю ПЗ, прийнятою рівною нулю; $T_{\text{служ}}$ є розрахунковим строком використання ПЗ, прийнятим рівним 5 рокам.

За прийнятих вихідних даних річна амортизація становить 156 000 грн, а місячна 13 000 грн.

Оцінку капітальних і поточних витрат наведено в Таблиця 4.3. Значення витрат на хостинг і картографічні API відповідають прийнятому сценарію навантаження системи та можуть змінюватися залежно від кількості користувачів і запитів [169], [170]. Витрати на публікацію застосунку визначено за умовами Apple Developer Program та Google Play Console [171], [172].

Таблиця 4.3 Оцінка капітальних та експлуатаційних витрат на інформаційну систему

Стаття витрат	Розрахункове значення
Розроблення та інтеграція ПЗ, одноразово	780 тис. грн
Амортизація ПЗ за строку 5 років	13 000 грн/міс
Хостинг	310 грн/міс
Запити до API картографічної платформи	725 грн/міс
Ліцензійні платежі Apple Developer і Google Play	370 грн/міс
Підтримка та оновлення ПЗ	14 500 грн/міс

Сумарні грошові експлуатаційні витрати $V_{\text{експл}}$	15 900 грн/міс
Операційна беззбиткова плата за $N_{\text{авто}} = 50$	318 грн/авто·міс

Амортизацію в таблиці 4.3 наведено окремо, оскільки вона характеризує поступове перенесення вартості створення ПЗ, але не є щомісячним грошовим платежем. Тому операційну беззбиткову плату $p_{\text{беззб}} = 318$ грн/авто·міс визначено без урахування амортизації. Повернення первісних інвестицій враховано окремо під час розрахунку NPV.

4.2.2. Економічний ефект для користувача

Для оцінювання можливості комерціалізації інформаційної системи в Україні розглянуто окремий розрахунковий сценарій. У ньому прийнято, що вибір енергоефективного шляху забезпечує таку саму економію електричної енергії, як і для досліджених альтернативних шляхів, але грошовий ефект визначається за цінами електричної енергії в Україні.

За результатами перерахунку економія для побутового користувача становить 10,785 грн за одну поїздку, а для непобутового споживача 17,352 грн за одну поїздку.

Для побутового користувача за 30 поїздок на місяць при виборі шляху №2 відносно шляху №1 економія становить:

$$E_{\text{міс}}^{\text{дом}} = 10,785 \cdot 30 = 323,5, \text{ грн/міс.}$$

Для одного електромобіля бізнес-користувача за інтенсивності 3 поїздки на день і 30 днів роботи місячна економія становить:

$$E_{\text{міс}}^{\text{авто}} = 17,352 \cdot 3 \cdot 30 = 1561,68 \text{ грн/авто·міс}$$

Для автопарку з 50 електромобілів сумарна місячна економія становить:

$$E_{\text{міс}}^{\text{авто}} = 17,352 \cdot 50 \cdot 90 = 78\,084 \text{ грн/авто} \cdot \text{міс} \quad (4.10)$$

Отже, за прийнятого сценарію сумарна економія автопарку істотно перевищує місячні витрати на функціонування інформаційної системи.

Максимальну економічно прийнятну місячну плату за сервіс для одного електромобіля визначали як:

$$p_{\text{max}} = \Delta C_2 \cdot N_{\text{міс}} \quad (4.11)$$

де ΔC_2 є економією за одну поїздку внаслідок вибору шляху № 2, грн; $N_{\text{міс}}$ є кількістю поїздок одного електромобіля за місяць.

Для бізнес-сценарію:

$$p_{\text{max}} = 17,352 \cdot 90 = 1561,68 \text{ грн/авто} \cdot \text{міс}$$

Отже, місячна плата за сервіс не повинна перевищувати 1561,68 грн для одного електромобіля, оскільки за вищої плати користувач не отримуватиме чистої економії.

Економічний ефект для користувача оцінювали за показником рентабельності витрат ROI. Він характеризує співвідношення чистої місячної економії до плати за сервіс:

$$ROI = \frac{E_{\text{міс}} - p}{p} \cdot 100\% \quad (4.12)$$

За прийнятої місячної плати $p = 349$ грн/авто·міс:

$$ROI = \frac{1561,7 - 349}{349} \cdot 100\% = 347,5\%$$

Строк компенсації місячної плати за сервіс визначали як кількість днів, за які накопичена економія дорівнює вартості підписки:

$$T_{\text{окупн}} = \frac{p}{\Delta C^{(2)} \cdot N_{\text{день}}} \quad (4.13)$$

де $N_{\text{день}}$ є кількістю поїздок одного електромобіля за день.

За $N_{\text{день}} = 3$: $T_{\text{окупн}} = 349 / (17,352 \cdot 3) = 6,7$ дня.

Отже, за прийнятого сценарію місячна плата за сервіс компенсується отриманою економією приблизно за 7 днів експлуатації.

Основні показники економічної ефективності для одного електромобіля наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 Показники економічної ефективності для одного електромобіля

Показник	Позначення	Значення	Підстава
Операційна беззбиткова плата, грн/авто·міс	$p_{\text{беззб}}$	318	$V_{\text{експл}}/N_{\text{авто}}$
Максимально прийнятна плата, грн/авто·міс	p_{max}	1562	$\Delta C_2 \cdot 90$
Інтервал взаємовигідних цін, грн/авто·міс	p	318-1562	$p_{\text{беззб}} \leq p \leq p_{\text{max}}$
Прийнята плата, грн/авто·міс	p	349	Розрахунковий сценарій
Економія користувача, грн/авто·міс	$E_{\text{міс}}$	1562	$\Delta C_2 \cdot 90$
ROI користувача, %	ROI	347,5	(4.12)
Строк компенсації плати, днів	$T_{\text{окупн}}$	6,7	(4.13)

4.2.3. Операційна ефективність для постачальника сервісу

Для довгострокового оцінювання проєкту використано чисту приведену вартість NPV. Цей показник характеризує різницю між дисконтованими грошовими надходженнями та первісними інвестиціями:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} - K_{\text{пер}} \quad (4.14)$$

де CF_t є чистим грошовим потоком у місяці t , грн/міс; i є місячною ставкою дисконтування; T - тривалість розрахункового періоду, міс.; $K_{\text{перв}}$ є первісними інвестиціями, грн.

Чистий місячний грошовий потік визначали як:

$$CF_t = p \cdot N_{\text{авто}} - V_{\text{експл}}$$

Для визначення місячної ставки дисконту використано річний орієнтир НБУ на рівні 15 % [173]. Його місячний еквівалент становить:

$$i = (1 + 0,15)^{\frac{1}{12}} - 1 = 0,0117$$

У подальших розрахунках прийнято округлене значення $i = 0,012$, або 1,2 % на місяць.

За плати $p = 349$ грн/авто·міс і кількості $N_{\text{авто}} = 50$ місячні надходження становлять:

$$D_{\text{міс}} = 349 \cdot 50 = 17\,450 \text{ грн/міс.}$$

Чистий місячний грошовий потік становить:

$$CF = 17\,450 - 15\,900 = 1550 \text{ грн/міс}$$

Операційну приведену вартість без урахування первісних інвестицій визначали за анuitетною формулою:

$$NPV_{\text{оп}} = CF \cdot \frac{1 - (1 + i)^{-T}}{i}$$

За $CF = 1550$ грн/міс, $i = 0,012$ і $T = 36$ міс.: $NPV_{\text{оп}} = 45\,095$ грн.

Таблиця 4.5 Операційна приведена вартість постачальника без урахування первісних інвестицій

Показник	Позначення	Значення
Місячна плата, грн/авто·міс	p	349
Кількість авто в парку, шт	$N_{\text{авто}}$	50
Місячні надходження, грн/міс	$D_{\text{міс}}$	17 450
Експлуатаційні витрати, грн/міс	$V_{\text{експл}}$	15 900
Чистий місячний потік, грн/міс	CF	1 550
Місячна ставка дисконту, %·міс	i	1,2
Розрахунковий горизонт, міс	T	36
Операційна приведена вартість, грн	$NPV_{\text{оп}}$	45 095

Отримане додатне значення $NPV_{оп}$ свідчить, що надходження покривають поточні експлуатаційні витрати сервісу. Проте цей показник не враховує повернення первісних інвестицій у розроблення ПЗ.

4.2.4. Умови повної окупності первісних інвестицій

Повна окупність на горизонті 36 місяців досягається за умови $NPV \geq 0$, коли дисконтована сума чистих операційних потоків дорівнює або перевищує первісні інвестиції.

Для сталого місячного потоку використовували анuitетний множник:

$$A(i, T) = \frac{1 - (1 + i)^{-T}}{i}$$

За $i = 0,012$ і $T = 36$ міс. анuitетний множник становить: $A(i, T) = 29,09$.

Мінімальний чистий місячний потік, необхідний для повернення первісних інвестицій протягом 36 місяців, визначали як:

$$CF_{min} = K_{перв} / A(i, T) \quad 4.15$$

За $K_{перв} = 780\,000$ грн:

$$CF_{min} = 780\,000 / 29,09 = 26\,800 \text{ грн/міс.}$$

Умова повної окупності:

$$p \cdot N_{авто} \geq V_{експл} + CF_{min} \quad 4.16$$

Мінімальні місячні надходження для повної окупності становлять:

$$D_{min} = 15\,900 + 26\,800 = 42\,700 \text{ грн/міс}$$

За фіксованої плати $p = 349$ грн/авто·міс необхідна кількість активних електромобілів становить:

$$N_{авто}^* = \frac{42700}{349} = 122,35$$

Оскільки кількість електромобілів має бути цілим числом, мінімальне значення становить 123 електромобілі.

За фіксованої кількості $N_{\text{авто}} = 50$ необхідна місячна плата становить:

$$p^* = \frac{42\,700}{50} = 854 \text{ грн/авто} \cdot \text{міс}$$

Таблиця 4.6 Умови повної окупності первісних інвестицій за 36 місяців

Показник	Позначення	Значення	Формула/підстава
Первісні інвестиції, грн	$K_{\text{перв}}$	780 000	Таблиця 4.3
Місячна ставка дисконту, %	i	1,2	НБУ [173]
Горизонт, міс	T	36	3 роки
Ануїтетний множник	$A(i, T)$	29,09	$\frac{1 - (1 + i)^{-T}}{i}$
Мінімальний чистий потік, грн/міс	CF_{min}	26 800	$K_{\text{перв}}/A(i, T)$
Мінімальні необхідні надходження, грн/міс	D_{min}	42 700	$V_{\text{експл}} + CF_{\text{min}}$
Кількість авто за p = 349 грн/міс	$N_{\text{авто}}^*$	123	D_{min}/p
Плата за $N_{\text{авто}} = 50$ грн/авто ·міс	p^*	854	$D_{\text{min}}/N_{\text{авто}}$

Отримані результати показують, що за 50 активних електромобілів і платі 349 грн/авто·міс сервіс покриває поточні експлуатаційні витрати, але не забезпечує повернення первісних інвестицій протягом трьох років. Повна

окупність за цей період досягається за збільшення кількості активних електромобілів до 123 або підвищення місячної плати до 854 грн за умови збереження 50 активних користувачів.

Обидва значення перебувають нижче максимально прийнятної для бізнес-користувача плати $p_{ma} = 1561,68$ грн/авто·міс. Це свідчить про наявність діапазону параметрів, за якого впровадження сервісу може бути економічно доцільним як для користувача, так і для постачальника.

4.3. Висновки за четвертим розділом

1. На основі перерахунку механічної роботи у витрати електричної енергії та її вартість встановлено, що для дослідженого маршруту найбільш енергоефективним є шлях № 2. Його вибір забезпечує зниження витрат електричної енергії на 27,388 % порівняно зі шляхом № 1.

2. Для маршруту в Італії за прийнятих цін електричної енергії економія під час вибору шляху № 2 становить 0,741 євро за поїздки для побутового споживача та 0,550 євро для непобутового споживача.

3. Для окремого сценарію комерціалізації інформаційної системи в Україні розрахункова економія становить 10,785 грн за поїздки для побутового користувача та 17,352 грн для бізнес-користувача. За 30 поїздок на місяць економія побутового користувача становить 323,55 грн. Для парку з 50 електромобілів за 90 поїздок одного електромобіля на місяць сумарна економія становить 78 084 грн/міс.

4. Первісні інвестиції у створення інформаційної системи оцінено в 780 000 грн, а місячні грошові експлуатаційні витрати в 15 900 грн. За 50 активних електромобілів операційна беззбиткова плата становить 318 грн/авто·міс.

5. За плати 349 грн/авто·міс рентабельність витрат бізнес-користувача становить 347,5 %, а накопичена економія компенсує місячну плату приблизно за 6,7 дня. Операційна приведена вартість постачальника за 36 місяців становить 45 095 грн.

6. Для повного повернення первісних інвестицій протягом 36 місяців необхідний чистий місячний потік 26 800 грн. За плати 349 грн/авто·міс це потребує 123 активних електромобілів. За 50 активних електромобілів необхідна плата становить 854 грн/авто·міс.

7. Розроблена методика поєднує прогнозування витрат енергії з оцінюванням економічного ефекту для користувача та фінансової доцільності створення інформаційної системи. Це дає змогу обґрунтовувати її застосування для приватних користувачів, електричних автопарків, служб таксі та логістичних компаній.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі отриманих теоретичних і експериментальних результатів розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення енергоефективності електромобільного транспорту шляхом розробки та валідації підходу до прогнозування витрат електроенергії з урахуванням фактору топології маршруту, параметрів опору кочення, режимів руху за стандартизованими циклами та рекуперативного гальмування, а також шляхом формування методики техніко-економічного обґрунтування вибору найбільш енергоефективного шляху уздовж маршруту. Основні науково-прикладні результати полягають у наступному:

1. Проведено інформаційний аналіз тенденцій розвитку електромобільного транспорту та сучасних науково-прикладних підходів до прогнозування енергоспоживання. За результатами аналізу обґрунтовано визначальний вплив зовнішніх і внутрішніх факторів руху (опір кочення, аеродинамічний опір, інерційні складові, топологічний профіль маршруту, режими прискорення/гальмування, рекуперація) та показано, що ігнорування топології та параметрів опору кочення призводить до систематичної похибки прогнозу витрат енергії і, відповідно, запасу ходу.

2. Визначено ступінь впливу фактору топології маршруту як складової загального опору руху через силу скаткування та кут топологічного профілю, а також обґрунтовано доцільність урахування цієї складової під час прогнозування витрат електроенергії для задачі вибору найбільш енергоефективного шляху уздовж маршруту. Сформульовано вимоги до математичної моделі щодо вхідних даних.

3. Розроблено алгоритмічний підхід до прогнозування витрат енергії уздовж альтернативних шляхів маршруту з урахуванням топології та режимів руху за стандартизованими випробувальними циклами WLTP включно з урахуванням рекуперативного гальмування як елементу енергетичного балансу.

Підхід забезпечує порівняльну оцінку альтернативних шляхів та вибір найбільш енергоефективного варіанту за критерієм мінімуму витрат енергії.

4. Вперше виконано порівняльну оцінку впливу джерел топологічних даних та кроку їх дискретизації на точність прогнозування механічної роботи/витрат енергії на сегментах маршруту різної довжини. Показано, що вибір кроку дискретизації у діапазоні 10–100 м є раціональним компромісом між точністю та обчислювальним навантаженням: похибка відносно значення при 10 м не перевищує 2,17 %, а відносно розрахунку при 1 м може зростати до 8,6 % (залежно від сегмента та джерела даних). Обґрунтовано допустимі діапазони дискретизації залежно від довжини сегмента та вимог до точності.

5. Експериментально підтверджено адекватність отриманих залежностей на навантажувальній установці шляхом формалізації складових потужності та втрат стенда і трицикла, а також шляхом введення еквівалентних параметрів, що відображають топологічний профіль у лабораторних умовах. Для режиму WLTC Class 3b, фаза LOW, на горизонтальній площині зі спорядженою масою 45 кг отримано відносну похибку моделі близько 11%, що узгоджується з наявністю додаткових неврахованих втрат. Визначено напрями зменшення похибки.

6. Експериментально визначено параметри, критичні для точності прогнозу, зокрема коефіцієнт опору кочення заднього мотор-колеса в умовах стендової схеми з двома точками контакту «колесо–ролики»: отримане значення 0,078 є вищим за типові дорожні значення, що пояснюється геометрією контакту і додатковими втратами стенда. Обґрунтовано, що коефіцієнти опору кочення передніх та задніх коліс мають визначатися для конкретних умов експлуатації та конкретної платформи; інакше модель набуває систематичної похибки.

7. Показано можливість лабораторної імітації впливу топології маршруту шляхом експериментального визначення сили скаткування та встановлення її залежності від еквівалентного кута топологічного профілю. Отримана лінійна залежність дозволяє формувати еквівалентні навантаження на стенді та

переносити їх у модель загального опору руху для подальших розрахунків уздовж маршруту.

8. Запропоновано критерій перевірки спроможності платформи відпрацьовувати стандартизований цикл WLTC class 3b LOW шляхом порівняння номінального приводного двигуна та еквівалентного, що має практичне значення для інженерного добору мотор-колеса/силового агрегату під задані цикли.

9. Виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності використання прогнозової моделі для вибору найбільш енергоефективного шляху уздовж маршруту.

10. Сформульовано перспективні напрямки подальших досліджень та застосувань розробленої моделі й експериментальної бази, зокрема інтеграцію в сервіси енергоефективної маршрутизації для приватних користувачів і бізнесу, застосування для задач планування маршрутів міського електротранспорту, виконання довготривалих натурних випробувань та розвиток навантажувальної установки як універсальної стендової платформи для досліджень двоколісного електротранспорту і пов'язаних задач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] H. M. Hussein *et al.*, “State-of-the-Art Electric Vehicle Modeling: Architectures, Control, and Regulations,” *Electronics*, vol. 13, no. 17, Art. no. 17, Jan. 2024, doi: 10.3390/electronics13173578.
- [2] A. Albatayneh, M. N. Assaf, D. Alterman, and M. Jaradat, “Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles,” *Environ. Clim. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 669–680, Jan. 2020, doi: 10.2478/rtuect-2020-0041.
- [3] X. Zhao, H. Hu, H. Yuan, and X. Chu, “How does adoption of electric vehicles reduce carbon emissions? Evidence from China,” *Heliyon*, vol. 9, no. 9, p. e20296, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20296.
- [4] J. Squalli, “Greening the roads: Assessing the role of electric and hybrid vehicles in curbing CO2 emissions,” *J. Clean. Prod.*, vol. 434, p. 139908, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139908.
- [5] S. Vasiljević, B. Aleksandrović, J. Glišović, and M. Maslač, “Regenerative braking on electric vehicles: working principles and benefits of application,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1271, no. 1, p. 012025, Dec. 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1271/1/012025.
- [6] R. K. Chidambaram *et al.*, “Effect of Regenerative Braking on Battery Life,” *Energies*, vol. 16, no. 14, Art. no. 14, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16145303.
- [7] D. G. Baur and N. Todorova, “Automobile manufacturers, electric vehicles and the price of oil,” *Energy Econ.*, vol. 74, pp. 252–262, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.eneco.2018.05.034.
- [8] European Commission, “The European Green Deal.” Дата звернення: 22.05.2026
[URL] https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [9] *Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure, and*

- repealing Directive 2014/94/EU (Text with EEA relevance)*, vol. 234. 2023. Accessed: Дата звернення: 22.05.2026 [URL] <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj>
- [10] *Regulation (EU) 2023/851 of the European Parliament and of the Council of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO₂ emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles in line with the Union's increased climate ambition (Text with EEA relevance)*, vol. 110. 2023. Дата звернення: 02.03.2026 [URL] <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/851/oj>
- [11] Кабінет Міністрів України, “Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках.” Офіційний вебпортал парламенту України. Accessed: Дата звернення: 22.04.2026 [URL] <https://zakon.rada.gov.ua/go/1550-2024-%D0%BF>
- [12] International Energy Agency (IEA), “Trends in electric cars – Global EV Outlook 2026 – Analysis.” Accessed: Дата звернення: 22.05.2026 [URL] <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026/trends-in-electric-cars>
- [13] Eurostat, “1.45 million new battery-only electric cars in 2024.” Дата звернення: 22.05.2026 [URL] <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250730-1>
- [14] Головний сервісний центр МВС України, “Ринок електромобілів динамічно зростає. Сервісні центри МВС з початку року зареєстрували майже 50 тисяч електрокарів.” Дата звернення: 15.04.2026 [URL] <https://hsc.gov.ua/2025/09/05/rinok-elektromobiliv-dinamichno-zrostaye-servisni-tsentri-mvs-z-pochatku-roku-zareyestruvali-majzhe-50-tisyach-elektrokariv/>
- [15] Р. ІДА, “Ринок електромобілів в Україні: підсумки 2025 року,” Eauto.org.ua. Дата звернення: 7.02.2026 [URL] <https://eauto.org.ua/news/975-rinok-elektromobiliv-v-ukrajini-pidsumki-2025-roku>

- [16] Р. ІДА, “Ринок «свіжопригнаних» електромобілів з пробігом — підсумки 2025 року,” Eauto.org.ua. Дата звернення: 3.02.2026 [URL] <https://eauto.org.ua/news/977-rinok-svizhoprignanih-elektromobiliv-z-probigom-pidsumki-2025-roku>
- [17] S. S. Madani *et al.*, “A Comprehensive Review on Lithium-Ion Battery Lifetime Prediction and Aging Mechanism Analysis,” *Batteries*, vol. 11, no. 4, p. 127, Apr. 2025, doi: 10.3390/batteries11040127.
- [18] M. Etxandi-Santolaya, L. Canals Casals, T. Montes, and C. Corchero, “Are electric vehicle batteries being underused? A review of current practices and sources of circularity,” *J. Environ. Manage.*, vol. 338, p. 117814, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117814.
- [19] M. Fischer *et al.*, “How degradation of lithium-ion batteries impacts capacity fade and resistance increase: A systematic, correlative analysis,” *J. Power Sources*, vol. 656, p. 237921, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.jpowsour.2025.237921.
- [20] F. Zheng, J. Jiang, B. Sun, W. Zhang, and M. Pecht, “Temperature dependent power capability estimation of lithium-ion batteries for hybrid electric vehicles,” *Energy*, vol. 113, pp. 64–75, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.010.
- [21] E. M. Szumska, “Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies, and Efficiency Challenges,” *Energies*, vol. 18, no. 10, p. 2422, Jan. 2025, doi: 10.3390/en18102422.
- [22] E. M. Szumska and R. Jurecki, “The Analysis of Energy Recovered during the Braking of an Electric Vehicle in Different Driving Conditions,” *Energies*, vol. 15, no. 24, p. 9369, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15249369.
- [23] M. Fanoro, M. Božanić, and S. Sinha, “A Review of the Impact of Battery Degradation on Energy Management Systems with a Special Emphasis on Electric Vehicles,” *Energies*, vol. 15, no. 16, Art. no. 16, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15165889.

- [24] J. Schoch, J. Gaerttner, A. Schuller, and T. Setzer, “Enhancing electric vehicle sustainability through battery life optimal charging,” *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 112, pp. 1–18, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.trb.2018.03.016.
- [25] Z. Gao, H. Xie, H. Yu, B. Ma, X. Liu, and S. Chen, “Study on Lithium-Ion Battery Degradation Caused by Side Reactions in Fast-Charging Process,” *Front. Energy Res.*, vol. 10, May 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.905710.
- [26] E. D. Kostopoulos, G. C. Spyropoulos, and J. K. Kaldellis, “Real-world study for the optimal charging of electric vehicles,” *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 418–426, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2019.12.008.
- [27] F. Yang, Y. Xie, Y. Deng, and C. Yuan, “Impacts of battery degradation on state-level energy consumption and GHG emissions from electric vehicle operation in the United States,” *Procedia CIRP*, vol. 80, pp. 530–535, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.procir.2018.12.010.
- [28] F. Yang, Y. Xie, Y. Deng, and C. Yuan, “Predictive modeling of battery degradation and greenhouse gas emissions from U.S. state-level electric vehicle operation,” *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 2429, Jun. 2018, doi: 10.1038/s41467-018-04826-0.
- [29] E. Schaltz, “Electrical Vehicle Design and Modeling,” in *Electric Vehicles - Modelling and Simulations*, IntechOpen, 2011. doi: 10.5772/20271.
- [30] “Станом на 1 липня в Україні зареєстровано вже 166 807 електромобілів!,” IONITY. Дата звернення: 22.05.2026 [URL] <https://ionity.ua/news/stanom-na-1-lypnya-v-ukrayini-zareyestrovano-vzhe-166-807-elektromobiliv/>
- [31] EDS-chargers, “EDS CHARGERS Q 480 kW Technical Specifications.” Дата звернення: 22.05.2026 [URL] <https://eds-chargers.com/>
- [32] TOKA, “Fast Charging Stations Data Sheet.” Дата звернення: 22.05.2026 [URL] <https://toka.energy/uk/shop/fast-chargers/>
- [33] G. Pivnyak, V. Olishevskaya, H. Olishevskiy, I. Lutsenko, A. Lysenko, and D. Sala, “Comprehensive study on electric vehicles and infrastructure for sustainable development in Ukraine,” *E3S Web Conf.*, vol. 567, p. 01025, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202456701025.

- [34] European Commission, “Electric vehicle model statistics | European Alternative Fuels Observatory.” Дата звернення: 27.04.2026 [URL] <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/policymakers-and-public-authorities/electric-vehicle-model-statistics>
- [35] A. Shukla, K. Verma, and R. Kumar, “Impact of EV fast charging station on distribution system embedded with wind generation,” *J. Eng.*, vol. 2019, no. 18, pp. 4692–4697, Jul. 2019, doi: 10.1049/joe.2018.9322.
- [36] H. B. Sonder, L. Cipcigan, and C. E. Ugalde-Loo, “Voltage Analysis on MV/LV Distribution Networks with the Integration of DC Fast Chargers,” in *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, Sep. 2020, pp. 260–265. doi: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236619.
- [37] I. Diahovchenko, A. Chuprun, and Z. Čonka, “Assessment and mitigation of the influence of rising charging demand of electric vehicles on the aging of distribution transformers,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 221, p. 109455, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109455.
- [38] B. Azzopardi and Y. Gabdullin, “Impacts of Electric Vehicles Charging in Low-Voltage Distribution Networks: A Case Study in Malta,” *Energies*, vol. 17, no. 2, p. 289, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17020289.
- [39] I. Diahovchenko, “Analyzing the influence of electric vehicle charging scheduling on distribution transformer lifespan,” *Heliyon*, vol. 10, no. 21, p. e39904, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39904.
- [40] “A pre-winter assessment – Ukraine’s Energy Security – Analysis,” IEA. Дата звернення: 28.03.2026 [URL] <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security/a-pre-winter-assessment>
- [41] “Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released,” World Bank. Дата звернення: 21.05.2026 [URL] <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>

- [42] OHCHR, “Attacks on Ukraine’s Energy Infrastructure: Harm to Civilians.” Дата звернення: 10.05.2026 [URL] https://ukraine.ohchr.org/sites/default/files/2024-12/ENG_Attacks_on_Ukraine%E2%80%99s_Energy_Infrastructure_Harm_to_the_Civilian.pdf
- [43] О. Стецюк, Р. Лозинський, О. Склярська, and Г. Лабінська, “ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНІСТЬ В УКРАЇНІ: РЕАЛІЇ РОЗВИТКУ, ЄВРОПЕЙСЬКИЙ КОНТЕКСТ І ВПЛИВ ВОЄННОГО СТАНУ,” *Наукові Інновації Та Передові Технології*, no. 9(37), Sep. 2024, doi: 10.52058/2786-5274-2024-9(37)-770-795.
- [44] T. Miqdady, J. Benavente, J. F. Coloma, and M. García, “Driving Sustainability: Analyzing Eco-Driving Efficiency Across Urban and Interurban Roads with Electric and Combustion Vehicles,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 16, no. 3, p. 143, Mar. 2025, doi: 10.3390/wevj16030143.
- [45] H. Kato *et al.*, “The eco-driving effect of electric vehicles compared to conventional gasoline vehicles,” *AIMS Energy*, vol. 4, no. 6, pp. 804–816, 2016, doi: 10.3934/energy.2016.6.804.
- [46] Y. Zhang, R. Fu, Y. Guo, and W. Yuan, “Eco-driving strategy for connected electric buses at the signalized intersection with a station,” *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 128, p. 104076, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.trd.2024.104076.
- [47] X. Shan, C. Wan, P. Hao, G. Wu, and X. Zhang, “Connected eco-driving for electric buses along signalized arterials with bus stops,” *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 579–591, 2023, doi: 10.1049/itr2.12285.
- [48] S. Li, B. Yu, and X. Feng, “Research on braking energy recovery strategy of electric vehicle based on ECE regulation and I curve,” *Sci. Prog.*, vol. 103, no. 1, p. 0036850419877762, Sep. 2019, doi: 10.1177/0036850419877762.
- [49] E.-H. Zu, M.-H. Shu, J.-C. Huang, and H.-T. Lin, “Energy Recovery Decision of Electric Vehicles Based on Improved Fuzzy Control,” *Processes*, vol. 12, no. 12, p. 2919, Dec. 2024, doi: 10.3390/pr12122919.

- [50] T. Han, B. Zeng, and Y. Tong, "Theoretical study on energy recovery rate of regenerative braking for hybrid mining trucks with different parameters," *J. Energy Storage*, vol. 42, p. 103127, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103127.
- [51] X. Hao, H. Wang, Z. Lin, and M. Ouyang, "Seasonal effects on electric vehicle energy consumption and driving range: A case study on personal, taxi, and ridesharing vehicles," *J. Clean. Prod.*, vol. 249, p. 119403, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119403.
- [52] K. He, Y. Song, H. Xie, and F. Cao, "Winter driving range optimization of electric bus based on CO₂ thermal management system and thermal energy cascade utilization," *Energy*, vol. 323, p. 135668, May 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.135668.
- [53] F. Del Pero, M. Delogu, and M. Pierini, "The effect of lightweighting in automotive LCA perspective: Estimation of mass-induced fuel consumption reduction for gasoline turbocharged vehicles," *J. Clean. Prod.*, vol. 154, pp. 566–577, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.013.
- [54] B. Romowicz, M. Machno, and K. Weigel-Milleret, "A study on the electric energy consumption of a lightweight four-wheeled vehicle powered by the hub-mounted brushless direct-current hub motors designed for disabled people," *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 19, no. 10, pp. 173–187, 2025, doi: 10.12913/22998624/208036
- [55] S. T. Kaluva, A. Pathak, and A. Ongel, "Aerodynamic Drag Analysis of Autonomous Electric Vehicle Platoons," *Energies*, vol. 13, no. 15, p. 4028, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13154028.
- [56] J. Ruan, P. Walker, and N. Zhang, "A comparative study energy consumption and costs of battery electric vehicle transmissions," *Appl. Energy*, vol. 165, pp. 119–134, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.12.081.
- [57] E. Gözen, M. S. Çevirgen, and E. Özgül, "Transmission speed and ratio optimization for heavy-duty electric truck," *Heliyon*, vol. 8, no. 8, p. e10028, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10028.

- [58] H. Su, L. Zhang, D. Meng, Y. Li, N. Han, and Y. Xia, “Modeling and Evaluation of SiC Inverters for EV Applications,” *Energies*, vol. 15, no. 19, p. 7025, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15197025.
- [59] I. Miri, A. Fotouhi, and N. Ewin, “Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 1, pp. 501–520, 2021, doi: 10.1002/er.5700.
- [60] A. Amin, M. S. Amin, H. Park, and D. Lee, “Electric Vehicle Range Prediction Models: A Systematic Review of Machine Learning, Mathematical, and Simulation Approaches,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 16, no. 11, p. 607, Nov. 2025, doi: 10.3390/wevj16110607.
- [61] A. Di Martino, S. M. Miraftebzadeh, and M. Longo, “Strategies for the Modelisation of Electric Vehicle Energy Consumption: A Review,” *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 8115, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15218115.
- [62] Y.-W. Huang, C. Prehofer, W. Lindskog, R. Puts, P. Mosca, and G. Kauermann, “Predictive Energy Management for Battery Electric Vehicles with Hybrid Models,” vol. 486, 2023, pp. 182–196. doi: 10.1007/978-3-031-30855-0_13.
- [63] A.-R. Houalef, F. Delavernhe, S.-M. Senouci, and E.-H. Aglzim, “Data-driven, personalized route planning for connected electric vehicles: Optimizing time, energy, and charging stops,” *Appl. Energy*, vol. 402, p. 126887, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.126887.
- [64] “Outlook for electric mobility – Global EV Outlook 2024 – Analysis,” IEA. Дата звернення: 11.09.2025 [URL] <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/outlook-for-electric-mobility>
- [65] IEA, Paris, “Trends in electric cars – Global EV Outlook 2024 – Analysis,” IEA. Дата звернення: 11.09.2025 [URL] <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars>
- [66] EV Database, “Range of full electric vehicles cheatsheet. Quick reference for all plug-in hybrid en full electric cars,” EV Database. Дата звернення: 11.09.2025 [URL] <https://ev-database.org/cheatsheet/range-electric-car>

- [67] “EVSSpecifications - Electric vehicle specifications, electric car news, EV comparisons,” EVSpecifications. Дата звернення: 11.09.2026 [URL] <https://www.evspecifications.com>
- [68] A. Isilti and J. E. Tate, “Technical performance evolution of BEVs: range, consumption and weight projections to 2050,” *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 152, p. 105172, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.trd.2025.105172.
- [69] “How far can you travel in an electric car? | TNO,” [tno.nl/en](https://www.tno.nl/en). Дата звернення: 22.05.2026 [URL] <https://www.tno.nl/en/newsroom/insights/2025/12/how-far-battery-electric-car/>
- [70] G. Readfearn, “Some electric cars fall short of claimed range by up to 23%, Australian motoring group finds,” *The Guardian*, Aug. 06, 2025. Дата звернення: 19.05.2026 [URL] <https://www.theguardian.com/environment/2025/aug/06/some-electric-cars-fall-short-of-claimed-range-by-up-to-23-australian-motoring-group-finds>
- [71] S. Tsiakmakis, G. Fontaras, C. Cubito, J. Pavlovic, K. Anagnostopoulos, and B. Ciuffo, “From NEDC to WLTP: effect on the type-approval CO2 emissions of light-duty vehicles,” JRC Publications Repository. Дата звернення: 19.05.2026 [URL] <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC107662>
- [72] DieselNet, “Emission Standards: Europe: Cars and Light Trucks.” Дата звернення: 26.02.2025 [URL] <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>
- [73] “Emission Test Cycles: WLTC.” Дата звернення: 26.02.2025 [URL] <https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>
- [74] J. Pavlovic, A. Marotta, and B. Ciuffo, “CO2 emissions and energy demands of vehicles tested under the NEDC and the new WLTP type approval test procedures,” *Appl. Energy*, vol. 177, pp. 661–670, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.110.
- [75] “WLTP: the benefits of the new test cycle,” WLTPfacts.eu. Дата звернення: 26.02.2025 [URL] <https://www.wltpfacts.eu/wltp-benefits/>

- [76] “On the way to ‘real-world’ CO₂ values? The European passenger car market after 5 years of WLTP,” International Council on Clean Transportation. Дата звернення: 26.02.2025 [URL] <https://theicct.org/publication/real-world-co2-emission-values-vehicles-europe-jan24/>
- [77] Y. Liu, K. Ma, H. Yu, J. Li, and X. An, “Influence of Test Cycles on Energy Consumption Test of Electric Vehicles,” *E3S Web Conf.*, vol. 241, p. 02004, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202124102004.
- [78] X. Zhao, Q. Yu, J. Ma, Y. Wu, M. Yu, and Y. Ye, “Development of a Representative EV Urban Driving Cycle Based on a k-Means and SVM Hybrid Clustering Algorithm,” *J. Adv. Transp.*, vol. 2018, no. 1, p. 1890753, 2018, doi: 10.1155/2018/1890753.
- [79] X. Zhao, J. Ma, S. Wang, Y. Ye, Y. Wu, and M. Yu, “Developing an electric vehicle urban driving cycle to study differences in energy consumption,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, no. 14, pp. 13839–13853, May 2019, doi: 10.1007/s11356-018-3541-6.
- [80] K. Liu, T. Yamamoto, and T. Morikawa, “Impact of road gradient on energy consumption of electric vehicles,” *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 54, pp. 74–81, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.trd.2017.05.005.
- [81] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), “Regulation No. 101 – Uniform provisions concerning the approval of passenger cars powered by an internal combustion engine only, or powered by a hybrid electric power train with regard to the measurement of the emission of carbon dioxide and fuel consumption,” Geneva, Switzerland, 2013.
- [82] R. Gutiérrez-Moreno, Á. Llamazares, P. Revenga, M. Ocaña, and M. Antunes-García, “Electric Vehicle Route Optimization: An End-to-End Learning Approach with Multi-Objective Planning,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 17, no. 1, p. 41, Jan. 2026, doi: 10.3390/wevj17010041.
- [83] M. Tang, W. Zhuang, B. Li, H. Liu, Z. Song, and G. Yin, “Energy-optimal routing for electric vehicles using deep reinforcement learning with transformer,” *Appl.*

- Energy, vol. 350, Art. no. 121711, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121711.
- [84] T. Perger and H. Auer, “Energy efficient route planning for electric vehicles with special consideration of the topography and battery lifetime,” *Energy Effic.*, vol. 13, no. 8, pp. 1705–1726, Dec. 2020, doi: 10.1007/s12053-020-09900-5.
- [85] A. Emadi, Ed., *Advanced Electric Drive Vehicles*. Boca Raton: CRC Press, 2014. doi: 10.1201/9781315215570.
- [86] K. Sevdari, L. Calearo, B. H. Bakken, P. B. Andersen, and M. Marinelli, “Experimental validation of onboard electric vehicle chargers to improve the efficiency of smart charging operation,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 60, p. 103512, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103512.
- [87] P. Techalimsakul and A. Niyomphol, “Installation Design and Efficiency Evaluation of an EV Transform Powertrain and a 3.3 kW Multi-Charging System Driven by a 30 kW Permanent-Magnet Synchronous Motor,” *Energies*, vol. 17, no. 18, p. 4584, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17184584.
- [88] E. Roshandel, A. Mahmoudi, S. Kahourzade, A. Yazdani, and G. M. Shafiullah, “Losses in Efficiency Maps of Electric Vehicles: An Overview,” *Energies*, vol. 14, no. 22, p. 7805, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14227805.
- [89] H. Umegami, T. Harada, and K. Nakahara, “Performance comparison of Si IGBT and SiC MOSFET power module driving IPMSM or IM under WLTC,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 14, no. 4, Art. no. 112, Apr. 2023, doi: 10.3390/wevj14040112.
- [90] T. Petr, J. Brousek, J. Jezek, T. Zvolsky, and R. Vozenilek, “Measuring the Efficiency of Reduction Gearboxes for Electric Utility Vehicles during Specific Driving Cycles,” *Stroj. Vestn. - J. Mech. Eng.*, vol. 68, no. 5, pp. 303–313, May 2022, doi: 10.5545/sv-jme.2021.7437.
- [91] C. C. Chan, K. T. Chau, C. C. Chan, and K. T. Chau, *Modern Electric Vehicle Technology*. in Monographs in Electrical and Electronic Engineering. Oxford, New York: Oxford University Press, 2001.

- [92] Y. Liang *et al.*, “Energy-efficient driving for distributed electric vehicles considering wheel loss energy: A distributed strategy based on multi-agent architecture,” *Appl. Energy*, vol. 384, p. 125462, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.125462.
- [93] H. Yin, C. Ma, H. Wang, Z. Sun, and K. Yang, “Optimal Driving Torque Control Strategy for Front and Rear Independently Driven Electric Vehicles Based on Online Real-Time Model Predictive Control,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 15, no. 11, p. 533, Nov. 2024, doi: 10.3390/wevj15110533.
- [94] Y. Xu, A. Kersten, S. Klacar, B. Ban, J. Hellsing, and D. Sedarsky, “Improved efficiency with adaptive front and rear axle independently driven powertrain and disconnect functionality,” *Transp. Eng.*, vol. 13, p. 100192, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.treng.2023.100192.
- [95] L. Li, L. Dai, S. Niu, W. Fu, and K. T. Chau, “Critical Review of Direct-Drive In-Wheel Motors in Electric Vehicles,” *Energies*, vol. 18, no. 6, p. 1521, Jan. 2025, doi: 10.3390/en18061521.
- [96] “EV Database,” EV Database. Accessed: Nov. 11, 2024. Дата звернення: 13.08.2025 [URL] <https://ev-database.org/>
- [97] L. De Novellis, A. Sorniotti, and P. Gruber, “Design and comparison of the handling performance of different electric vehicle layouts,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Automob. Eng.*, vol. 228, no. 2, pp. 218–232, Feb. 2014, doi: 10.1177/0954407013506569.
- [98] R. Levickas and V. Žuraulis, “Stability Issues of Rear–Wheel–Drive Electric Vehicle During Regenerative Braking,” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 20, p. 10926, Jan. 2025, doi: 10.3390/app152010926.
- [99] S. Fadili, R. German, A. Bouscayrol, C. Mayet, P. Fiani, and E. Noirtat, “Comparison of High-Energy Density and High-Power Density Batteries for an Electric Vehicle,” *IEEE Open J. Veh. Technol.*, vol. 6, pp. 1910–1919, 2025, doi: 10.1109/OJVT.2025.3583070.

- [100]J. Koloch, J. Schneider, M. Seidenfus, and M. Lienkamp, “Beyond lithium: A comprehensive use-case-analysis of sodium-ion-battery technology in battery electric vehicles,” *E-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, vol. 12, p. 100995, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.prime.2025.100995.
- [101]Md. A. Islam, I. Jahan, and O. Farrok, “Fuel cell hybrid electric vehicle with real-world driving cycle: six-step control strategy for dynamic energy management and fuel optimization,” *Energy Convers. Manag. X*, vol. 29, p. 101435, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.ecmx.2025.101435.
- [102]B. Lindström *et al.*, “Diesel fuel reformer for automotive fuel cell applications,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 34, no. 8, pp. 3367–3381, May 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.02.013.
- [103]V. Bisaria and R. J. B. Smith, “Hydrogen production by onboard gasoline processing – Process simulation and optimization,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 76, pp. 746–752, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2013.08.006.
- [104]C. V. M. Gopi and R. Ramesh, “Review of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles,” *Results Eng.*, vol. 24, p. 103598, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103598.
- [105]A. A. Ahmed, Y. I. Lee, S. Al Dawsari, A. A. Z. Diab, and A. A. Ezzat, “Energy Management and Power Distribution for Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles with Regenerative Braking Control,” *Math. Comput. Appl.*, vol. 30, no. 4, p. 82, Aug. 2025, doi: 10.3390/mca30040082.
- [106]A. Wangsupphaphol, S. Phichaisawat, N. R. Nik Idris, A. Jusoh, N. D. Muhamad, and R. Lengkayan, “A Systematic Review of Energy Management Systems for Battery/Supercapacitor Electric Vehicle Applications,” *Sustainability*, vol. 15, no. 14, p. 11200, Jan. 2023, doi: 10.3390/su151411200.
- [107]European Environment Agency (EEA), “New registrations of electric cars in Europe.” Дата звернення: 2.02.2026 [URL] <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/new-registrations-of-electric-vehicles>

- [108]“New car registrations: +0.8% in 2024; battery-electric 13.6% market share,” ACEA - European Automobile Manufacturers’ Association. Дата звернення: 2.02.2026 [URL] <https://www.acea.auto/pc-registrations/new-car-registrations-0-8-in-2024-battery-electric-13-6-market-share/>
- [109]“First Commission report on real-world CO2 emissions of cars and vans using data from on-board fuel consumption monitoring devices - Climate Action.” Дата звернення: 5.02.2026 [URL] https://climate.ec.europa.eu/news-other-reads/news/first-commission-report-real-world-co2-emissions-cars-and-vans-using-data-board-fuel-consumption-2024-03-18_en
- [110]“Analysis: Real-world Fuel Consumption and Potential Future Regulation of Plug-In Hybrid Electric Vehicles in Europe – An Empirical Analysis of about one Million Vehicles | Ariadne.” Дата звернення: 11.02.2026 [URL] <https://ariadneprojekt.de/en/publication/analysis-real-world-fuel-consumption-and-potential-future-regulation-of-plug-in-hybrid-electric-vehicles-in-europe-an-empirical-analysis/>
- [111]M. Alhanouti and F. Gauterin, “A generic model for accurate energy estimation of electric vehicles,” *Energies*, vol. 17, no. 2, Art. no. 434, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17020434.
- [112]H. Shen *et al.*, “Electric Vehicle Energy Consumption Estimation with Consideration of Longitudinal Slip Ratio and Machine-Learning-Based Powertrain Efficiency,” *IFAC-Pap.*, vol. 55, no. 37, pp. 158–163, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.11.177.
- [113]X. Sun, J. Fu, H. Yang, M. Xie, and J. Liu, “An energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles based on deep learning and improved model predictive control,” *Energy*, vol. 269, p. 126772, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.126772.
- [114]C. Chen, X. Wang, Z. Xie, Z. Lei, and C. Shangguan, “Research on Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Energy Management Strategy with Dynamic Planning

- Considering Engine Start/Stop,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 15, no. 8, p. 350, Aug. 2024, doi: 10.3390/wevj15080350.
- [115]J. Song, “Evaluation of driving resistance and energy consumption in electric vehicles under various ambient and tire temperatures using real-world driving data,” *eTransportation*, vol. 25, p. 100454, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.etrans.2025.100454.
- [116]A. Desreveaux, A. Bouscayrol, E. Castex, R. Trigui, E. Hittinger, and G.-M. Sirbu, “Annual Variation in Energy Consumption of an Electric Vehicle Used for Commuting,” *Energies*, vol. 13, no. 18, Art. no. 18, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13184639.
- [117]F. S. Hwang *et al.*, “Review of battery thermal management systems in electric vehicles,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 192, p. 114171, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114171.
- [118]M. D. Gennaro *et al.*, “Experimental Investigation of the Energy Efficiency of an Electric Vehicle in Different Driving Conditions,” presented at the SAE 2014 World Congress & Exhibition, SAE International, Apr. 2014. doi: 10.4271/2014-01-1817.
- [119]P. Iora and L. Tribioli, “Effect of Ambient Temperature on Electric Vehicles’ Energy Consumption and Range: Model Definition and Sensitivity Analysis Based on Nissan Leaf Data,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 10, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2019, doi: 10.3390/wevj10010002.
- [120]K. Y. Gómez Díaz, S. E. De León Aldaco, J. Aguayo Alquicira, M. Ponce Silva, S. Portillo Contreras, and O. Sánchez Vargas, “Thermal Management Systems for Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: A Review,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 16, no. 7, p. 346, Jul. 2025, doi: 10.3390/wevj16070346.
- [121]M. A. Alghassab, “Advanced thermal management system of Lithium-Ion Batteries: Integrating thermoelectric modules with phase change materials,” *J. King Saud Univ. – Sci.*, vol. 36, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.jksus.2024.103570.
- [122]J. Wang, H. Zhu, and Z. G. Yang, “Study of Aerodynamic Drag Reduction on a Compact Electric Vehicle,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 694–697, pp. 51–55, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.694-697.51.

- [123]Z. Yi and P. H. Bauer, “Effects of environmental factors on electric vehicle energy consumption: a sensitivity analysis,” *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 7, no. 1, pp. 3–13, 2017, doi: 10.1049/iet-est.2016.0011.
- [124]C. Fiori *et al.*, “The effect of electrified mobility on the relationship between traffic conditions and energy consumption,” *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 67, pp. 275–290, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.trd.2018.11.018.
- [125]N. A. Q. Muzir, M. Hasanuzzaman, and J. Selvaraj, “Modeling and Analyzing the Impact of Different Operating Conditions for Electric and Conventional Vehicles in Malaysia on Energy, Economic, and the Environment,” *Energies*, vol. 16, no. 13, p. 5048, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16135048.
- [126]B. Pałasz, K. J. Waluś, and Ł. Warguła, “The determination of the rolling resistance coefficient of a passenger vehicle with the use of roller test bench method,” *MATEC Web Conf.*, vol. 254, p. 04007, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201925404007.
- [127]Q. Wang, A. Li, and J. Yan, “Study on the relationship between the steady-state rolling resistance of radial tires and energy consumption of electric vehicles,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 45406, Nov. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-29797-3.
- [128]J. Chun, J. McKeown, and S. Kang, “Impact of vehicle electrification on road roughness induced greenhouse gas (GHG) emissions,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 64, p. 103701, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.seta.2024.103701.
- [129]X. Liu and I. L. Al-Qadi, “Development of a Simulated Three-Dimensional Truck Model to Predict Excess Fuel Consumption Resulting from Pavement Roughness,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2675, no. 9, pp. 1444–1456, Sep. 2021, doi: 10.1177/03611981211007849.
- [130]W. Cieslik, “Research into the Impacts of Driving Cycles and Load Weight on the Operation of a Light Commercial Electric Vehicle,” *Sustainability*, vol. 13, no. 24, p. 13872, 2021. Дата звернення: 18.05.2026 [URL] <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/24/13872>
- [131]W. Cieslik and W. Antczak, “Research of Load Impact on Energy Consumption in an Electric Delivery Vehicle Based on Real Driving Conditions: Guidance for

- Electrification of Light-Duty Vehicle Fleet,” *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 775, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020775.
- [132] A. Skuza and R. S. Jurecki, “Analysis of factors affecting the energy consumption of an EV vehicle - a literature study,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1247, no. 1, p. 012001, Jul. 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1247/1/012001.
- [133] J. Suarez *et al.*, “The impact of drivers’ acceleration style on the vehicle energy performance: a real-world case study,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 82, pp. 3300–3319, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.trpro.2024.12.093.
- [134] I. Evtimov, R. Ivanov, and M. Sapundjiev, “Energy consumption of auxiliary systems of electric cars,” *MATEC Web Conf.*, vol. 133, p. 06002, 2017, doi: 10.1051/mateconf/201713306002.
- [135] O. Travesset-Baro, M. Rosas-Casals, and E. Jover, “Transport energy consumption in mountainous roads. A comparative case study for internal combustion engines and electric vehicles in Andorra,” *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 34, pp. 16–26, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.trd.2014.09.006.
- [136] J. Wang, I. Besselink, and H. Nijmeijer, “Electric Vehicle Energy Consumption Modelling and Prediction Based on Road Information,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 7, no. 3, pp. 447–458, Sep. 2015, doi: 10.3390/wevj7030447.
- [137] J. Kropiwnicki and T. Gawłás, “Energy efficiency of a car driving with regenerative braking,” *Combust. Engines*, vol. 202, no. 3, pp. 20–26, Aug. 2025, doi: 10.19206/CE-207152.
- [138] T. Perger and H. Auer, “Energy efficient route planning for electric vehicles with special consideration of the topography and battery lifetime,” *Energy Effic.*, vol. 13, no. 8, pp. 1705–1726, Dec. 2020, doi: 10.1007/s12053-020-09900-5.
- [139] J. Fridlund and O. Wilén, *Parameter Guidelines for Electric Vehicle Route Planning*. 2020. Дата звернення: 22.07.2025 [URL] <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-279555>
- [140] S. Ben Abbes, L. Rejeb, and L. Baati, “Route planning for electric vehicles,” *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 7, pp. 875–889, 2022, doi: 10.1049/itr2.12182.

- [141]J. Wang, A. Elbery, and H. A. Rakha, “A real-time vehicle-specific eco-routing model for on-board navigation applications capturing transient vehicle behavior,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 104, pp. 1–21, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.trc.2019.04.017.
- [142]A. Graser, J. Asamer, and W. Ponweiser, “The elevation factor: Digital elevation model quality and sampling impacts on electric vehicle energy estimation errors,” in *2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, Jun. 2015, pp. 81–86. doi: 10.1109/MTITS.2015.7223240.
- [143]A. Graser, J. Asamer, and M. Dragaschnig, *How to Reduce Range Anxiety? The Impact of Digital Elevation Model Quality on Energy Estimates for Electric Vehicles*, vol. Volume 1. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 2014, pp. 165–174. doi: 10.1553/giscience2014s165.
- [144]A. Fotouhi, N. Shateri, D. Shona Laila, and D. J. Auger, “Electric vehicle energy consumption estimation for a fleet management system,” *Int. J. Sustain. Transp.*, vol. 15, no. 1, pp. 40–54, Jan. 2021, doi: 10.1080/15568318.2019.1681565.
- [145]Y. Chen, G. Wu, R. Sun, A. Dubey, A. Laszka, and P. Pugliese, “A Review and Outlook of Energy Consumption Estimation Models for Electric Vehicles,” Feb. 21, 2021, *arXiv*: arXiv:2003.12873. doi: 10.48550/arXiv.2003.12873.
- [146]J. Zhang, Z. Wang, P. Liu, and Z. Zhang, “Energy consumption analysis and prediction of electric vehicles based on real-world driving data,” *Appl. Energy*, vol. 275, p. 115408, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115408.
- [147]N. Junhuathon, G. Sakulphaisan, S. Prukmahachaikul, and K. Chayakulkheeree, “Route-Based Optimization Methods for Energy Consumption Modeling of Electric Trucks,” *Energies*, vol. 18, no. 8, p. 1986, Jan. 2025, doi: 10.3390/en18081986.
- [148]D. Afianto, Y. Han, P. Yan, Y. Yang, A. F. A. Elbarghthi, and C. Wen, “Optimisation and Efficiency Improvement of Electric Vehicles Using Computational Fluid Dynamics Modelling,” *Entropy*, vol. 24, no. 11, p. 1584, Nov. 2022, doi: 10.3390/e24111584.

- [149]G. Sivaraj, K. M. Parammasivam, and G. Suganya, “Reduction of Aerodynamic Drag Force for Reducing Fuel Consumption in Road Vehicle using Basebleed,” *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 11, no. 6, pp. 1489–1495, Nov. 2018, doi: 10.29252/jafm.11.06.29115.
- [150]J. Jagelčák, J. Gnap, O. Kuba, J. Frnda, and M. Kostrzewski, “Determination of Turning Radius and Lateral Acceleration of Vehicle by GNSS/INS Sensor,” *Sensors*, vol. 22, no. 6, p. 2298, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22062298.
- [151]Y. J. J. Heuts, R. Velpari, and M. C. F. Donkers, “Eco-driving and road curvature estimation: Retrospective analysis of experimental data of a fully electric coach,” *Energy*, vol. 334, p. 137526, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.137526.
- [152]W. Sun, Y. Chen, J. Wang, X. Wang, and L. Liu, “Research on TVD Control of Cornering Energy Consumption for Distributed Drive Electric Vehicles Based on PMP,” *Energies*, vol. 15, no. 7, p. 2641, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15072641.
- [153]B. Šarkan, M. Loman, J. Caban, A. Malek, M. Richtář, and M. Stopková, “Changing Fuel Consumption Data in Official Vehicle Documents—Case Study in the Slovak Republic,” *Vehicles*, vol. 7, no. 1, p. 27, Mar. 2025, doi: 10.3390/vehicles7010027.
- [154]E. Grano, M. Villani, H. de Carvalho Pinheiro, and M. Carello, “Are We Testing Vehicles the Right Way? Challenges of Electrified and Connected Vehicles for Standard Drive Cycles and On-Road Testing,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 16, no. 2, p. 94, Feb. 2025, doi: 10.3390/wevj16020094.
- [155]Google, “Google Maps.” Дата звернення: 22.06.2026 [URL] <https://www.google.com/maps>
- [156]Z. Hu, J. Peng, Y. Hou, and J. Shan, “Evaluation of Recently Released Open Global Digital Elevation Models of Hubei, China,” *Remote Sens.*, vol. 9, no. 3, Art. no. 3, Mar. 2017, doi: 10.3390/rs9030262.
- [157]M. Rabah, A. El-Hattab, and M. Abdallah, “Assessment of the most recent satellite based digital elevation models of Egypt,” *NRIAG J. Astron. Geophys.*, vol. 6, no. 2, pp. 326–335, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.nrjag.2017.10.006.

- [158]“USGS.gov | Science for a changing world.” Дата звернення: 22.06.2026 [URL] <https://www.usgs.gov/>
- [159]Sonny, “Sonny’s LiDAR Digital Terrain Models of Europe.” Accessed: Mar. 12, 2025. Дата звернення: 22.06.2026 [URL] <https://sonny.4lima.de/>
- [160]“USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) | U.S. Geological Survey.” Дата звернення: 22.06.2026 [URL] <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm>
- [161]Безщітковий контролер для електровелосипеда КЕВ48201Х, 24–48 В, 150 А, 2,0 кВт, з рекуперацією: ціна, продаж в Україні.” Дата звернення: 22.06.2026 [URL] <https://kellycontroller.com.ua/keb48201x-24v-48v-150a-e-bike-brushless-controller-regen/>
- [162]J. O’Connor, “Nissan Leaf Module Details,” Off Grid Solar Book. Accessed: Jun. 22, 2026. Дата звернення: 22.06.2026 [URL] <https://offgridsolarbook.com/blog/2020/9/8/nissan-leaf-module-details>
- [163]“Rolling Resistance.” Дата звернення: 22.06.2026 [URL] https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html
- [164]QS Motor, “10 inch Scooter Motor (Hub Motor) Specifications.” Дата звернення: 22.06.2026 [URL] <https://www.qsmotor.com/10-inch-scooter-motor/>
- [165] “[nrg_pc_204] Electricity prices for household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards).” Дата звернення: 17.05.2026 [URL] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_204/default/table?lang=en
- [166]Eurostat, “[nrg_pc_205] Electricity prices for non-household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards).” Дата звернення: 17.05.2026 [URL] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_205/default/table?lang=en
- [167]“Про внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 5 червня 2019 р. № 483,” Офіційний вебпортал парламенту України. Дата звернення: 17.05.2026 [URL] <https://zakon.rada.gov.ua/go/632-2024-%D0%BF>

- [168]“Оператор ринку.” Дата звернення: 17.05.2026
[URL]<https://www.oree.com.ua/index.php/newsctr/n/30075>
- [169]“Google Maps Platform Documentation | Pricing and Billing,” Google for Developers. Дата звернення: 17.05.2026
[URL]<https://developers.google.com/maps/billing-and-pricing>
- [170]“Pricing,” Amazon Web Services, Inc. Дата звернення: 17.05.2026 [URL]
<https://aws.amazon.com/ec2/pricing/>
- [171]“Choosing a Membership - Support - Apple Developer.” Дата звернення: 17.05.2026 [URL] <https://developer.apple.com/support/compare-memberships/>
- [172]“Get started with Play Console - Play Console Help.” Дата звернення: 17.05.2026
[URL] <https://support.google.com/googleplay/android-developer/answer/6112435>
- [173]“Speech by NBU Governor Andriy Pyshnyy at Press Briefing on Monetary Policy Decisions,” National Bank of Ukraine. Дата звернення: 17.05.2026 [URL]
<https://bank.gov.ua/en/news/all/vistup-golovi-natsionalnogo-banku-andriya-pishnogo-pid-chas-presbrifingu-schodo-rishen-z-monetarnoyi-politiki-21619>
- [174]“IT Outsourcing Cost: Key Factors Impacting Price.” Дата звернення: 17.05.2026
[URL] <https://onix-systems.com/blog/what-factors-impact-the-cost-of-outsourcing-it-services>

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. O. Beshta, D. Cichoń, O. Beshta Jr., T. Khalaimov, and E. C. Cabana, “Analysis of the Use of Rational Electric Vehicle Battery Design as an Example of the Introduction of the Fit for 55 Package in the Real Estate Market,” *Energies*, vol. 16, no. 24, Art. no. 7927, 2023, doi: 10.3390/en16247927. (Стаття в періодичному науковому виданні *Scopus*, квартиль $Q1(SJR)$. Особистий внесок здобувача: аналіз апріорної інформації про об’єкт дослідження, обробка даних, узагальнення висновки).

2. O. S. Beshta, O. O. Beshta, S. S. Khudolii, T. O. Khalaimov, and V. S. Fedoreiko, “Electric vehicle energy consumption taking into account the route topology,” *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 2, pp. 104–112, 2024, doi: 10.33271/nvngu/2024-2/104. (Стаття в періодичному науковому виданні *Scopus*, квартиль $Q3(SJR)$. Особистий внесок здобувача: обґрунтування методології досліджень, підготовка експериментальні даних, підготовка ілюстрації та таблиць).

3. O. S. Beshta, D. O. Beshta, T. O. Khalaimov, and V. A. Burlaka, “Impact of topographic data on electric vehicle energy prediction,” *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 5, pp. 78–85, 2025, doi: 10.33271/nvngu/2025-5/078. (Стаття в періодичному науковому виданні *Scopus*, квартиль $Q3(SJR)$. Особистий внесок здобувача: формулювання задачі досліджень, підготовка експериментальні даних, підготовка ілюстрації, формулювання висновків).

4. О. С. Бешта і Т. О. Халаїмов, «Оцінка енергоефективності наземних мехатронних рухомих платформ з урахуванням фактору топології», *eis*, вип. 108, с. 8–17, Груд 2025, <https://doi.org/10.32782/EIS/2025-108-2>. (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б. Особистий внесок здобувача: проведення експерименту, підготовка ілюстрацій та таблиць, математичні розрахунки та формулювання висновків).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

5. O. S. Beshta, O. O. Beshta, D. Beshta, S. Tkachenko, T. Khalaimov and D. Skliar, "Technologies for Increasing the Energy Efficiency of Electric Vehicles," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402470 (*Публікація у матеріалах міжнародної конференції IEEE (conference proceedings), ISBN 979-8-3503-5978-7 / 979-8-3503-5979-4; індексується у Scopus (conference paper). Особистий внесок здобувача: постановка задачі дослідження, підготовка ілюстрацій, доповідь на конференції*).

6. Бешта О., Бешта О., Халаїмов Т. "Вплив топології маршруту на витрати механічної роботи електромобіля". Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2022: Збірник тез. Дніпро. НТУ «ДП». 25 грудня 2022 р. — С. 50-51. URL: https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/EE_%202022.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень*).

7. Бешта О.О., Халаїмов Т.О, Яремчук І.С, Шегера І.П. «Штучний інтелект – як інструмент дослідження впливу фактора манери керування водія на енергоефективність електричного транспорту» Молодь: наука та інновації: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 22–24 листопада 2023 року: у 2-х т. / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2023. Том 1. С. 429-430. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2023/molod-2023-vol1.pdf> (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: формулювання постановки задачі*).

8. Ткаченко С.М., Халаїмов Т.О., Скляр Д.Є. "Використання комунікації по CAN-bus з електромобілями для збору експериментальних даних з метою підвищення їх енергоефективності" Молодь: наука та інновації: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 22–24 листопада 2023 року: у 2-х т. / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2023. Том 1. С.

424-425. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2023/molod-2023-vol1.pdf> (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: аналіз літератури, узагальнення висновків*).

9. Ципленков Д.В., Халаїмов Т.О., Лобода А.Ю. "Технології акумулювання електричної енергії для електромобілів: минуле, сучасність, майбутнє". Молодь: наука та інновації: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 22–24 листопада 2023 року: у 2-х т. / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2023. Том 1. С. 413-414. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2023/molod-2023-vol1.pdf> (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: підготовка ілюстрацій, узагальнення висновків*).

10. Бешта О.С., Халаїмов Т.О. "Дослідження інструментів оцінки енергетичної ефективності системи рекуперації електромобілів". Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2024. Збірник тез. Дніпро. НТУ "ДП". 15 грудня 2024 р. – С. 13-15. URL: https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/EE_2023.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: аналіз літератури, підготовка матеріалів доповіді*).

11. Халаїмов Т.О., Лобода А.Ю., "Спосіб оцінки енергоспоживання електричного трициклу в лабораторних умовах". «Молодь: наука та інновації» 2024: матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 13–15 листопада 2024 року (у 3-х томах) / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. Том 2. 32-33 с. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2024/molod-2024-vol2.pdf> (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задач дослідження, підготовка ілюстрацій*).

12. Халаїмов Т.О., "Виклики енергосистеми України в умовах збільшення попиту на електромобілі". Міжнародний форум «Безпечна, комфортна,

спроможна, територіальна громада» - 2024: матеріали міжнар. конф., 16-18 жовтня 2024 р., м. Дніпро. – Д.: НТУ «Дніпровська політехніка», 2024. – 45 -46 с. URL: <https://science.nmu.org.ua/ua/conferences/Forum/Zbirnyk2024.pdf> (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: тези доповіді*).

13. Халаїмов Т.О., "Компоненти стенду для дослідження енергоефективності електричного трициклу". «Наукова весна» 2025: матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 26–28 березня 2025 року Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2025. С. 164 – 165. URL: https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/Scientific_Spring_2025.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: тези доповіді*).

14. Бешта О.С., Бешта О.О., Халаїмов Т.О. "REMOTE CONTROL SYSTEM FOR A LABORATORY TEST BENCH FOR REAL-TIME ASSESSMENT OF BATTERY-ELECTRIC VEHICLE ENERGY CONSUMPTION". XX Міжнародної конференції з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості. НТУ "ДП". С. 540-544, 2025 рік. URL: https://pzks.nmu.org.ua/ua/science/2025_fin.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: аналіз літератури, підготовка ілюстрацій, формування висновків*).

15. Халаїмов Т.О., "Сучасні напрями досліджень акумуляторних батарей електромобілів та їх значення для України ". «Наукова весна» 2026: матеріали XVI міжнародної науковотехнічної конференції аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 4–6 березня 2026 року Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2026. С. 230-231. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2026/Scientific_Spring_2026.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: тези доповіді*).

ДОДАТОК Б

Акти впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Халаїмова Тараса
Олександровича

на тему

«Підвищення енергетичної ефективності електромобільного транспорту з
урахуванням фактору топології маршруту»

Науково-практичні результати, рекомендації та підходи дисертаційної роботи Халаїмова Тараса Олександровича, що стосуються оцінювання енергоспоживання електромобілів з урахуванням топології маршруту, були використані ТОВ «ПНМЕК «ТОКА» при аналізі умов експлуатації електромобілів, плануванні користування зарядною інфраструктурою та формуванні рекомендацій щодо ефективного вибору маршрутів руху і заряджання.

Виконавчий директор



Стефан БЛАГОВІСНИЙ

ТОВ «ПНМЕК «ТОКА»

Код ЄДРПОУ 40062282

Юридична адреса: 01014, місто Київ, вул.Соловцова Миколи, будинок 2, офіс 38

Тел.: 044-222-66-88

merежа toka enoгom

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор Національного технічного
університету

«Дніпровська політехніка»

д.т.н., професор Павличенко А.В.

25 травня 2026 р.



впровадження наукових результатів дисертаційної роботи

Халаїмова Тараса Олександровича на тему:

«Підвищення енергетичної ефективності електромобільного транспорту з урахуванням фактору топології маршруту»

Цим документом підтверджується впровадження результатів дисертаційної роботи на тему: «Підвищення енергетичної ефективності електромобільного транспорту з урахуванням фактору топології маршруту» здобувача Халаїмова Тараса Олександровича у навчальний процес кафедри електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» під час підготовки здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (ГЗ «Електрична інженерія») в таких освітніх компонентах:

- у дисципліні «Управління енергією та оптимізація руху електромобіля» використано результати досліджень, що стосуються оцінювання енергоспоживання електромобіля з урахуванням топології маршруту, дорожнього ухилу, сил опору руху та режимів рекуперативного гальмування, а також підходи до оптимізації режимів руху з метою підвищення енергоефективності транспортного засобу;
- у дисципліні «Основи гібридних та електричних транспортних засобів та їх силові агрегати» використано результати досліджень щодо особливостей формування енергетичних витрат електромобіля, принципів взаємодії тягового електропривода, акумуляторної батареї та систем керування, а також підходи до аналізу впливу параметрів маршруту і режимів руху на ефективність роботи силового агрегату.

Затверджено членами комісії:

Завідувач кафедри електропривода, к.т.н., професор

Сергій ХУДОЛІЙ

Завідувач кафедри електротехніки, к.т.н., доцент

Олександр БЕШТА

Декан електротехнічного факультету, к.т.н., доцент

Святослав КОШЕЛЕНКО