

ВІДГУК

офіційного опонента Щура Ігоря Зеноновича на дисертаційну роботу ХАЛАІМОВА Тараса Олександровича на тему: «Підвищення енергетичної ефективності електромобільного транспорту з урахуванням фактору топології маршруту», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми. Розвиток акумуляторного електромобільного транспорту є одним із пріоритетних напрямів підвищення енергетичної ефективності транспортного сектору та зменшення його залежності від викопних видів палива. Водночас практичне поширення батарейних електромобілів (BEV) значною мірою обмежується запасом ходу, тривалістю заряджання, деградацією тягових акумуляторних батарей та залежністю від доступності зарядної інфраструктури.

Фактичні витрати енергії електричного транспортного засобу визначаються не лише ємністю акумуляторної батареї та коефіцієнтом корисної дії тягового електропривода. На них впливають швидкість і прискорення, маса транспортного засобу, опір коченню, аеродинамічний опір, режими роботи допоміжних систем, температура навколишнього середовища та топологічний профіль маршруту. Зокрема, зміна висоти вздовж шляху визначає додаткову механічну роботу під час руху вгору та потенціал рекуперації енергії під час руху вниз.

Поширені навігаційні та картографічні сервіси переважно формують маршрут за критеріями мінімальної довжини або часу поїздки. Для електромобільного транспорту такі критерії не завжди відповідають мінімальним витратам енергії, оскільки альтернативні шляхи можуть істотно відрізнятися топологічним і швидкісним профілями. Тому актуальним є розроблення методів прогнозування енергоспоживання, які дають змогу до початку поїздки порівнювати альтернативні маршрути за енергетичним критерієм.

Для України актуальність цього напряму додатково посилюється нерівномірністю розвитку зарядної інфраструктури, значною часткою вживаних електромобілів та обмеженнями електропостачання в умовах воєнного стану. Зменшення питомих витрат енергії дає змогу збільшити автономність пересування, скоротити частоту заряджання і знизити залежність користувача від доступності зарядних станцій.

Таким чином, дисертаційна робота Халаїмова Тараса Олександровича, присвячена підвищенню енергетичної ефективності електромобільного транспорту шляхом урахування топології маршруту під час прогнозування

витрат енергії та вибору шляху руху, є актуальною і відповідає сучасним науковим та практичним завданням електроенергетики, електротехніки й електромеханіки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

Дисертаційне дослідження виконано на кафедрі електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Одержані результати пов'язані з виконанням науково-дослідної роботи «Model Predictive Dynamic Energy Efficient Control in Rotating Field Machines» (номер державної реєстрації 0124U003745, термін виконання: травень 2024 р. – грудень 2025 р.) та науково-дослідної роботи «Models and means of improving the energy efficiency and reliability of microgrid systems in the context of Industry 4.0 and GreenTech concepts» (номер державної реєстрації 0126U001138, термін виконання: січень 2026 р. – грудень 2028 р.).

За тематикою створення та використання експериментальних кіберфізичних засобів простежується також зв'язок із міжнародним проектом DAAD «LAB4All – Open Access Cyber-Physical Laboratories for Ukrainian Universities». Результати дисертаційного дослідження становлять складову зазначених напрямів наукової та проектної діяльності.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій. Сформульовані в дисертації наукові положення, висновки та рекомендації є достатньо обґрунтованими. Їх достовірність забезпечується застосуванням фізично обґрунтованих моделей поздовжнього руху транспортного засобу, рівнянь балансу сил, механічної роботи та енергії, чисельних методів оброблення топологічних даних, а також порівняльного і статистичного аналізу результатів.

Під час побудови розрахункової моделі автором ураховано масу транспортного засобу, швидкість, прискорення, опір коченню, аеродинамічний опір, складову сили тяжіння, параметри тягового електропривода та теоретичний потенціал рекуперації. Для уніфікації режимів руху використано швидкісні профілі процедури WLTP та циклу WLTC.

Обґрунтованість висновків щодо впливу топологічних даних підтверджується порівнянням цифрових моделей рельєфу різної просторової роздільної здатності та аналізом зміни результатів за різного кроку дискретизації маршруту.

Експериментальну перевірку виконано на лабораторній навантажувальній установці з електричним транспортним засобом типу «трицикл». Валідацію проведено під час відтворення LOW-фази WLTC Class 3b. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними результатами становила близько 11 %, що можна вважати прийнятним для прийнятих припущень та масштабу експериментальної установки.

Сукупність теоретичних розрахунків, чисельного моделювання та експериментальних досліджень підтверджує достовірність основних результатів дисертаційної роботи.

Основні результати отримані Тарасом Халаїмовим в дисертаційній роботі, які мають наукову новизну.

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

2. Удосконалено методи порівняльної оцінки енергоефективності BEV за фазами WLTC за критерієм питомих витрат механічної енергії на 1 км шляху. Це забезпечує можливість порівняння шляхів різної протяжності та з різними топологічними профілями.

3. 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.

Наукове значення одержаних результатів полягає у розвитку методів прогнозування енергоспоживання електромобільного транспорту та встановленні кількісних закономірностей впливу топологічних даних на результат порівняльного оцінювання альтернативних маршрутів.

Практичне значення результатів роботи.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні методики прогнозування витрат енергії електромобіля вздовж альтернативних шляхів з урахуванням топологічного профілю, швидкісного режиму та рекуперативного гальмування. Запропонований підхід дає змогу ранжувати альтернативні шляхи за критерієм питомих витрат енергії та обґрунтовано обирати енергоефективний маршрут.

Розроблена методика може бути застосована для одного транспортного засобу або автопарку після калібрування маси, коефіцієнта опору коченню, аеродинамічних параметрів і характеристик силового тракту. Отримані результати можуть використовуватися під час розроблення навігаційних сервісів, систем керування автопарками та інформаційних модулів підтримки прийняття рішень.

Практичну цінність має також створена лабораторна експериментальна база, яка забезпечує відтворення швидкісних профілів WLTC та імітацію топологічного навантаження шляхом формування еквівалентного моменту опору. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено на LOW фазі WLTC Class 3b з похибкою 11% використання запропонованої методики для лабораторної установки з трициклом.

Результати роботи використано під час формування рекомендацій для

підприємства ТОВ «ПНМЕК «ТОКА», а також у навчальному процесі Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» під час підготовки фахівців у 14 галузі знань «Електрична інженерія».

Загальна характеристика структури та змісту дисертації.

Дисертаційна робота Халаїмова Т.О. складається з анотацій українською та англійською мовами, змісту, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 174 найменувань та двох додатків.

Перший розділ присвячено аналізу факторів, методів підвищення та прогнозування енергоефективності електромобілів під час руху. Розглянуто сучасний стан електромобільного транспорту, його переваги та експлуатаційні обмеження, проаналізовано втрати в акумуляторній батареї, тяговому електроприводі й допоміжних системах. Виконано порівняльний аналіз фізично орієнтованих, емпіричних, побудованих на основі даних і гібридних моделей прогнозування енергоспоживання. Обґрунтовано вибір фізично орієнтованого підходу як основи подальших досліджень.

У другому розділі розроблено фізично орієнтовану математичну модель визначення механічної роботи та питомих витрат енергії електромобіля під час руху за заданим маршрутом. Досліджено вплив топологічного профілю на витрати енергії під час руху альтернативними шляхами між однаковими початковою та кінцевою точками. Проведено аналіз впливу джерела цифрових висотних даних і кроку дискретизації маршруту на його розрахункову довжину, профіль висоти та прогнозовані витрати енергії. За результатами аналізу сформульовано рекомендації щодо вибору параметрів підготовки топологічних даних.

У третьому розділі виконано експериментальне дослідження впливу топології маршруту на витрати енергії електричного трицикла в лабораторних умовах. Наведено конструкцію транспортного засобу та навантажувальної установки, описано системи вимірювання і керування, розроблено методику виокремлення складових потужності та втрат. Експериментально визначено коефіцієнт опору коченню та залежність сили скочування від еквівалентного кута топологічного профілю. Проведено валідацію розрахункових залежностей під час відтворення LOW-фази WLTC Class 3b та визначено основні джерела похибки.

У четвертому розділі наведено техніко-економічне обґрунтування застосування прогнозованої моделі для вибору найбільш енергоефективного маршруту. Оцінено можливу економію енергії та коштів, а також основні показники доцільності реалізації інформаційного сервісу енергоефективної маршрутизації.

Повнота викладення результатів дослідження в опублікованих працях. За матеріалами дисертаційної роботи Тараса Халаїмова опубліковано 15 наукових праць, з яких 3 статті індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus, одна стаття опублікована у науковому фаховому виданні України категорії «Б» та 11 праць є матеріалами наукових конференцій.

Тематика публікацій відповідає змісту дисертації. В опублікованих працях достатньо повно відображено основні теоретичні положення, результати математичного моделювання, аналіз топологічних даних, експериментальні дослідження та питання практичного застосування розробленого підходу.

Кількість і рівень публікацій забезпечують належну апробацію результатів дисертаційного дослідження.

Академічна доброчесність. За результатами ознайомлення з дисертаційною роботою та науковими публікаціями здобувача порушень академічної доброчесності не виявлено. Використані положення й результати інших авторів супроводжуються відповідними бібліографічними посиланнями.

Основні результати, винесені на захист, отримані здобувачем особисто. У публікаціях, виконаних у співавторстві, використано результати, що відповідають особистому внеску Халаїмова Т.О., зазначеному в дисертаційній роботі.

Зауваження та дискусійні питання дисертаційної роботи.

1. У розрахунковій моделі перехід від механічної роботи до витрат електричної енергії виконується із застосуванням узагальнених значень ККД силового тракту. Водночас ефективність тягової електричної машини та інвертора істотно залежить від робочої точки, напруги ланки постійного струму, температури та алгоритму роботи системи керування. Доцільно пояснити, за яких умов використання сталого ККД не впливає на ранжування альтернативних маршрутів та як зміняться результати після введення карт ефективності електродвигуна й силового перетворювача.

2. У роботі оцінюється теоретичний потенціал рекуперативного гальмування. Проте фактична рекуперативна потужність обмежується допустимими режимами тягової електричної машини й інвертора, рівнем заряду, температурою та станом технічного здоров'я акумуляторної батареї. Бажано уточнити, яким чином ці обмеження можуть бути інтегровані до запропонованої методики та як їх урахування впливатиме на вибір енергоефективного маршруту.

3. Експериментальну валідацію проведено на електричному трициклі під час відтворення LOW-фази WLTC Class 3b. Водночас у роботі недостатньо формалізовано критерії перенесення отриманих результатів на повнорозмірні легкові BEV та на режими Medium, High і Extra High, у яких зростає вплив аеродинамічного опору та змінюються робочі точки тягового електропривода. Доцільно конкретизувати критерії, необхідні для такого масштабування.

4. Значна частина великого 2-го розділу дисертації, зокрема підрозділи 2.1 – 2.4, базуються лише на аналізі літературних даних, тому їх доцільно було б перенести в 1-й розділ. Водночас, у цьому розділі бракує детальнішого пояснення методики поєднання розрахунку складових витрат енергії з поточними даними топологій маршрутів та швидкісних режимів руху, а також вказання комп'ютерного середовища, в якому ці розрахунки проводилися.

5. Автор не вірно трактує термін «споряджена маса», що видно з табл. 3.2 та опису експериментів на стор. 161.

6. У детальному описі експериментального стенда все ж таки бракує інформації про те, куди скидається енергія гальмівної машини, якою була методика розрахунку моменту на ведучому колесі трицикла та як задавалася його швидкість руху відповідно до застосованої тахограми фази LOW циклу WLTC Class 3b.

7. У виразі (2.15), де визначається сила опору коченню, не зрозуміло, звідки появився квадрат косинуса кута нахилу дороги. Традиційно тут цей множник фігурує в першому степені.

8. У виразах (2.44), (2.45), (2.48) та (2.49), які відображають складові витрат енергії на подолання складових опору рухові, пропущені відповідні сили.

9. Не дивлячись на дуже добре оформлення та грамотність написання дисертації, в ній помічено наступні помилки:

- на рис. 1.6 швидкість руху має бути в км/год, а не в м/с;
- на стор. 78 та 79 повторюється один і той же абзац;
- автор чомусь вживає означення «рух вгору» замість «рух під гору» або «рух на підйом» та «рух під гору» замість «рух згори» чи «рух на спуску»;
- автор також плутає терміни «параметри» та «змінні» або «координати» (стор. 155);
- замість часто вживаного в дисертації терміну «холостій хід» чи його позначення ХХ треба вживати «неробочий хід»;
- на осях графічних залежностей та інших підписах на рисунках вживаються, окрім українських, також і англійські слова та одиниці вимірювань»;
- момент сили в дисертації позначається різними буквами, М і Т;
- у позначення одиниць вимірювань часто в знаменниках бракує дужок, особливо в 4-у розділі.

Зазначені недоліки і зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Тараса Халаїмова, її наукову новизну і практичну цінність.

Висновок про дисертаційну роботу.

Дисертаційна робота Халаїмова Тараса Олександровича на тему «Підвищення енергетичної ефективності електромобільного транспорту з

урахуванням фактору топології маршруту» є завершеною, самостійно виконаною кваліфікаційною науковою працею, в якій розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення енергетичної ефективності електромобільного транспорту шляхом розроблення та експериментальної перевірки підходу до прогнозування енергоспоживання з урахуванням топологічного профілю маршруту. Одержані автором теоретичні та експериментальні результати є науково обґрунтованими й достовірними, мають наукову новизну та практичне значення для розвитку методів прогнозування витрат енергії, оцінювання запасу ходу та вибору енергоефективних маршрутів електричних транспортних засобів.

За актуальністю теми, змістом, рівнем наукової новизни, ступенем обґрунтованості результатів, практичним значенням та повнотою висвітлення основних положень у наукових публікаціях дисертаційна робота відповідає спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та вимогам пунктів 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами.

Халаїмов Тарас Олександрович заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

доктор технічних наук, професор, завідувач
кафедри електромеханічних та електротехнічних систем
Національного університету «Львівська політехніка»

Ігор ЩУР

Підпис проф. Щура І.З. засвідчую.

Проректор Національного університету «Львівська політехніка»

06 серпня 2026 р.



Ірина ЯРЕМЧУК