

ВІДГУК

рецензента ЛУЦЕНКА Івана Миколайовича

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.

Зростання кількості електричних транспортних засобів супроводжується підвищенням попиту на електричну енергію та формуванням нового типу навантаження в розподільних мережах. На відміну від традиційних побутових споживачів, електромобіль характеризується значною одиничною потужністю заряджання, просторовою мобільністю та можливістю зміни часу споживання електроенергії. За наявності двонапрявленого перетворювача й відповідної системи керування він також може виконувати функції накопичувача енергії та споживача-регулятора у складі Smart Grid.

Водночас для власника електромобіля ключовим експлуатаційним показником залишається доступний запас ходу. Він залежить не лише від номінальної ємності акумуляторної батареї, а й від умов руху, швидкісного режиму, температури, роботи допоміжних систем та топологічного профілю маршруту. Зменшення питомих витрат енергії під час поїздки дає змогу скоротити потребу в заряджанні та відповідно зменшити навантаження на зарядну інфраструктуру й електричні мережі.

Особливої уваги потребує рух маршрутами зі значними перепадами висоти. Додаткова робота під час руху вгору та обмежена можливість повернення енергії під час руху вниз можуть призводити до того, що найкоротший або найшвидший шлях не буде найкращим за енергетичним критерієм. Отже, обґрунтоване порівняння альтернативних маршрутів потребує врахування топологічних даних і режимів руху.

Для України ця проблема має додаткове значення через нерівномірний розвиток зарядної інфраструктури, обмежену пропускну здатність окремих ділянок розподільних мереж та періодичні обмеження електропостачання. За таких умов підвищення енергоефективності електромобільного транспорту є одним зі способів зменшення частоти заряджання і підвищення автономності пересування.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Халаїмова Т.О. є актуальною, відповідає сучасним тенденціям розвитку електромобільності та пов'язана з практичними завданнями енергоефективного використання електричних транспортних засобів і зарядної інфраструктури.

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 проєктом DAAD «LAB4All – Open Access Cyber-Physical Laboratories for Ukrainian Universities». Результати дисертаційного дослідження становлять складову зазначених напрямів наукової та проєктної діяльності.

Обґрунтованість і достовірність результатів дослідження.

Поставлені в дисертації завдання відповідають сформульованій меті та послідовно розв'язуються в теоретичній, розрахунковій та експериментальній частинах роботи.

Для прогнозування витрат енергії автором використано фізично орієнтований підхід, що базується на балансі сил, механічної потужності та

роботи. У моделі враховано масу транспортного засобу, швидкість, прискорення, опір коченню, аеродинамічний опір, складову сили тяжіння та потенціал рекуперативного гальмування.

Окремо досліджено вплив якості вихідної топологічної інформації. Автор порівняв цифрові моделі рельєфу різної просторової роздільної здатності й визначив вплив кроку дискретизації на довжину маршруту, його висотний профіль і розрахункові витрати енергії. Для розглянутих умов обґрунтовано використання кроку 10–100 м, за якого відхилення не перевищує 8,6 % порівняно з дискретизацією 1 м.

Експериментальну перевірку виконано на спеціально створеній лабораторній установці з електричним транспортним засобом типу «трицикл». Автором визначено базові втрати мотор-колеса та стенда, оцінено вплив додаткової маси, експериментально визначено коефіцієнт опору коченню і сформовано еквівалентне топологічне навантаження.

Перевірка розрахункових залежностей під час відтворення LOW-фази WLTC Class 3b показала розбіжність близько 11 %. З урахуванням прийнятих припущень, масштабу установки та особливостей контакту колеса з роликами цей результат підтверджує працездатність запропонованого підходу.

Використані методи, обсяг проведених розрахунків і результати експериментальної перевірки дають підстави вважати основні наукові положення та висновки дисертації достатньо обґрунтованими й достовірними.

Оцінка структури та змісту дисертації.

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

У першому розділі проаналізовано сучасний стан електромобільного транспорту, фактори його енергоспоживання, втрати в акумуляторній батареї, тяговому електроприводі та допоміжних системах. Розглянуто методи підвищення енергоефективності й виконано порівняння фізично орієнтованих, емпіричних, побудованих на основі даних і гібридних моделей прогнозування.

Обґрунтовано вибір фізично орієнтованого підходу для дослідження впливу топології маршруту.

У другому розділі розроблено математичну модель визначення механічної роботи та питомих витрат енергії під час руху. На її основі виконано порівняння альтернативних шляхів між однаковими початковою та кінцевою точками. Встановлено вплив джерела висотних даних і кроку дискретизації на точність енергетичного оцінювання маршруту.

Третій розділ містить опис створеного електричного трицикла, навантажувальної установки, систем вимірювання і програмного керування. Наведено методику визначення окремих складових втрат та результати експериментального дослідження впливу швидкості, маси й еквівалентного топологічного навантаження. Проведено валідацію розрахункових залежностей за швидкісним профілем LOW-фази WLTC Class 3b.

У четвертому розділі виконано оцінювання практичного й економічного ефекту від вибору енергоефективного маршруту.

У загальних висновках узагальнено основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати. Структура роботи є логічною, а зміст розділів відповідає поставленим завданням.

Основні результати в дисертаційній роботі, які мають наукову новизну.

1. Отримала 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. Удосконалено методи порівняльної оцінки енергоефективності BEV за фазами WLTC за критерієм питомих витрат механічної енергії на 1 км шляху.

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.

4. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено на LOW фазі WLTC Class 3b з похибкою 11% використання запропонованої методики для

лабораторної установки з трициклом.

Наукове значення отриманих результатів полягає в розвитку методів прогнозування енергоспоживання електричних транспортних засобів та встановленні кількісного впливу топологічних даних на вибір альтернативного маршруту.

Практичне значення результатів роботи.

Розроблена методика дає змогу порівнювати альтернативні шляхи за питомими витратами енергії та здійснювати обґрунтований вибір маршруту до початку поїздки.

Практичне значення мають рекомендації щодо вибору кроку дискретизації та джерела висотних даних, які дозволяють узгодити точність прогнозування з обчислювальним навантаженням.

Запропонований підхід може бути застосований у програмних модулях прогнозування запасу ходу, навігаційних системах і системах керування автопарками. Для конкретної моделі електромобіля потрібне калібрування маси, характеристик опору руху, параметрів електропривода й акумуляторної батареї.

Створена лабораторна установка може використовуватися для подальших досліджень тягових режимів, рекуперативного гальмування та алгоритмів керування електричними транспортними засобами.

Результати роботи використано під час підготовки рекомендацій для ТОВ «ПНМЕК «ТОКА» та впроваджено в навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Повнота викладення результатів дослідження в опублікованих працях. Основні результати дисертації Тараса Халаїмова опубліковано у 15 наукових працях. Три статті індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus, одна стаття опублікована у фаховому виданні України категорії «Б», одинадцять праць є матеріалами наукових конференцій.

Тематика публікацій відповідає змісту дисертаційної роботи. В них відображено результати аналізу факторів енергоспоживання, математичного моделювання, дослідження топологічних даних, експериментальної перевірки та оцінювання практичного застосування запропонованого підходу.

Основні наукові положення дисертації достатньо повно висвітлені у публікаціях здобувача.

Академічна доброчесність. Ознак порушення академічної доброчесності у дисертаційній роботі та публікаціях здобувача не виявлено. Використані результати інших авторів супроводжуються відповідними посиланнями.

Наукові результати, винесені на захист, отримані Халаїмовим Т.О. особисто. У працях, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувача визначено і наведено в дисертації.

Зауваження та дискусійні питання дисертаційної роботи.

1. Запропонована методика ранжує альтернативні маршрути за критерієм питомих витрат енергії. Водночас у роботі не повною мірою розглянуто випадки, коли для користувача важливим є не лише мінімальне енергоспоживання під час поїздки, а й забезпечення заданого залишкового рівня заряду АКБ у кінцевій точці. Така вимога може бути пов'язана з подальшим рухом, відсутністю гарантованого заряджання або використанням електромобіля як резервного джерела енергії. Доцільно пояснити, яким чином до алгоритму вибору маршруту може бути введено обмеження за мінімально допустимим кінцевим рівнем SoC.

2. У техніко-економічному обґрунтуванні ефективність вибору маршруту оцінено переважно за значенням зекономленої електроенергії та її вартістю. Водночас зменшення електроспоживання також скорочує її сумарну конвертацію через АКБ і потенційно впливає на ступінь її деградації. Доцільно було б оцінити можливість доповнення запропонованого критерію показником еквівалентного циклування батареї, особливо для електромобілів, які можуть використовуватися як споживачі-регулятори або компенсатори активного навантаження в розподільних мережах.

3. Розроблена модель передбачає порівняння маршрутів за відомими топологічними та швидкісними профілями. Для практичної реалізації інформаційного сервісу доцільно враховувати, що доступність зарядної інфраструктури, завантаженість зарядних пунктів і тривалість очікування можуть змінюватися протягом поїздки. Потребує уточнення, як ці параметри можуть бути введені до процедури вибору маршруту поряд з основним

енергетичним критерієм без втрати фізичної інтерпретованості розрахунку.

4. У роботі показано можливість застосування запропонованого підходу як для одного електромобіля, так і для автопарку. Водночас перехід від індивідуального прогнозування до групового використання потребує врахування різних технічних характеристик транспортних засобів, початкових рівнів SOC, маршрутів і часу завершення поїздок. Доцільно пояснити, яким чином результати прогнозування для окремих електромобілів можуть бути агреговані для оцінювання сумарного електроспоживання автопарку та подальшого планування його заряджання.

Наведені зауваження мають дискусійний характер, стосуються можливостей подальшого розвитку запропонованої методики та її інтеграції в сучасні системи енергоменеджменту, не знижуючи загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи, її наукової новизни та практичного значення.

Висновок про дисертаційну роботу.

Дисертаційна робота Халаїмова Тараса Олександровича на тему «Підвищення енергетичної ефективності електромобільного транспорту з урахуванням фактору топології маршруту» є завершеною самостійною кваліфікаційною науковою працею, у якій розв'язано актуальну науково-прикладну задачу прогнозування енергоспоживання електричного транспортного засобу та вибору енергоефективного маршруту з урахуванням його топологічного профілю.

Отримані результати є достатньо обґрунтованими, мають наукову новизну та практичне значення. Матеріали дисертації викладено послідовно, а основні положення повною мірою опубліковано у наукових працях здобувача.

Дисертаційна робота за змістом відповідає спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та вимогам пунктів 6, 7, 8 і 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 ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

РЕЦЕНЗЕНТ

кандидат технічних наук, доцент,
директор Навчально-наукового інституту
електроенергетики
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»



Іван ЛУЦЕНКО