

ВІДГУК

рецензента КРІВДИ Віталія Валерійовича

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»

Оцінка актуальності теми дисертації.

Енергетична ефективність автомобіля є комплексною експлуатаційною властивістю, яка залежить від конструкції транспортного засобу, характеристик його силової установки, технічного стану, дорожніх умов і режиму руху. Для електромобілів значення цього показника додатково зростає через обмежену енергоємність акумуляторної батареї та необхідність забезпечення прийняттого запасу ходу.

У реальних умовах експлуатації витрати енергії не залишаються сталими навіть для одного транспортного засобу. На них впливають маса автомобіля, швидкість і прискорення, аеродинамічний опір, властивості шин і дорожнього покриття, температура навколишнього середовища, використання допоміжного обладнання та характер зміни висоти вздовж маршруту.

Топологічний профіль дороги безпосередньо визначає додаткову складову опору руху. Під час руху вгору електропривод повинен забезпечити механічну роботу для збільшення потенціальної енергії автомобіля. Під час руху під гору частина цієї енергії може бути повернена до акумуляторної батареї, однак її фактичне використання обмежується характеристиками транспортного засобу та умовами руху.

Унаслідок цього маршрут із мінімальною довжиною або тривалістю не завжди забезпечує найменші витрати енергії. Для обґрунтованого вибору шляху необхідно враховувати не лише його геометричну довжину, а й топологічний профіль, швидкісний режим та можливість рекуперації.

У дисертаційній роботі Халаїмова Т.О. запропоновано підхід до прогнозування витрат енергії електричного транспортного засобу вздовж альтернативних маршрутів. Практичне застосування такого підходу може сприяти збільшенню запасу ходу, зменшенню частоти заряджання і підвищенню ефективності експлуатації як окремого електромобіля, так і автомобільного парку.

Таким чином, обрана тема є актуальною, відповідає сучасним напрямкам розвитку автомобільного транспорту й електромобільності та має достатнє наукове обґрунтування.

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

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Результати дослідження 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., а також 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.

Розроблення експериментального обладнання, систем вимірювання та дистанційного керування також відповідає тематичному спрямуванню міжнародного проєкту DAAD «LAB4All – Open Access Cyber-Physical Laboratories for Ukrainian Universities».

Наведене підтверджує зв'язок дисертаційного дослідження з науковою та проєктною діяльністю кафедри й університету.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і достовірність результатів.

Обґрунтованість отриманих результатів забезпечується послідовним поєднанням теоретичного аналізу, математичного моделювання та експериментальної перевірки.

Для розрахунку витрат енергії автором використано фізично орієнтовану модель позовжнього руху транспортного засобу. У ній ураховано масу автомобіля, швидкість, прискорення, опір коченню, аеродинамічний опір, складову сили тяжіння, механічну роботу та теоретичний потенціал рекуперативного гальмування.

Особливу увагу приділено підготовці топологічної інформації. Автором порівняно цифрові моделі рельєфу різної просторової роздільної здатності та досліджено вплив кроку дискретизації на розрахункову довжину маршруту, відтворення висотного профілю та прогнозовані витрати енергії.

Встановлено, що для розглянутих маршрутів раціональним є використання кроку дискретизації в межах 10–100 м. За таких значень відхилення результатів не перевищує 8,6 % порівняно з розрахунком за кроку 1 м. Одержаний результат має практичне значення для зменшення обсягу обчислень без надмірної втрати точності.

Експериментальні дослідження проведено на створеній автором лабораторній установці з електричним транспортним засобом. У складі установки використано роликовий навантажувальний механізм, навантажувальну електричну машину, систему вимірювання електричних і механічних параметрів та засоби програмного відтворення швидкісних режимів.

Під час експериментів виокремлено втрати мотор-колеса, роликової системи й навантажувального механізму, досліджено вплив швидкості та додаткової маси, визначено коефіцієнт опору коченню і сформовано еквівалентне топологічне навантаження.

Перевірку розрахункових залежностей виконано під час відтворення LOW-фази WLTC Class 3b. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними результатами становила близько 11 %. Для лабораторної установки з урахуванням прийнятих припущень і особливостей взаємодії колеса з роликами одержану точність можна вважати достатньою.

Отже, основні положення дисертації підтверджуються результатами моделювання та експериментальних досліджень, а сформульовані автором

висновки є достатньо обґрунтованими.

Оцінка структури та змісту дисертації.

Дисертаційна робота Халаїмова Т.О. містить анотації українською та англійською мовами, зміст, перелік умовних позначень і скорочень, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел із 174 найменувань і два додатки.

У вступі наведено обґрунтування актуальності теми, визначено мету, об'єкт, предмет і завдання дослідження. Представлено методи досліджень, положення наукової новизни, практичне значення результатів, інформацію щодо публікацій, апробації та особистого внеску здобувача.

Перший розділ містить аналіз факторів, які визначають енергоспоживання електромобільного транспорту. Розглянуто втрати енергії в акумуляторній батареї, тяговому електроприводі та допоміжних системах, а також проаналізовано методи підвищення енергоефективності.

У розділі виконано порівняння фізично орієнтованих, емпіричних, побудованих на основі даних і гібридних моделей прогнозування. За результатами аналізу автором обґрунтовано вибір фізично орієнтованої моделі, яка забезпечує можливість окремого врахування сил опору руху та топологічного профілю.

У другому розділі розроблено математичну модель визначення механічної роботи та питомих витрат енергії під час руху електромобіля. Проведено порівняння альтернативних маршрутів між однаковими початковою та кінцевою точками.

Автором досліджено вплив джерела висотних даних і кроку дискретизації на результати розрахунку. За підсумками розділу сформульовано рекомендації щодо вибору параметрів топологічної моделі маршруту.

У третьому розділі наведено конструкцію експериментального транспортного засобу та лабораторної установки. Описано навантажувальний механізм, вимірювальну систему, програмні засоби керування та порядок проведення експериментів.

Виконано дослідження витрат під час роботи мотор-колеса й роликової установки, визначено вплив швидкості та додаткової маси, а також встановлено залежність еквівалентного моменту навантаження від топологічного профілю. Результати моделювання перевірено під час відтворення LOW-фази WLTC Class 3b.

У четвертому розділі здійснено техніко-економічне оцінювання застосування запропонованого підходу. Розглянуто можливу економію електричної енергії та коштів для приватного користувача й автомобільного парку. Обґрунтовано передумови створення інформаційного сервісу енергоефективного вибору маршруту.

Загальні висновки відображають результати виконаних досліджень і відповідають поставленим завданням. Матеріал дисертації викладено послідовно, ілюстративний матеріал загалом є достатнім для пояснення отриманих залежностей.

Наукова новизна одержаних результатів

До основних результатів дисертаційної роботи, які мають наукову новизну, належать такі:

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. 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 результатів полягає у встановленні кількісних закономірностей впливу топологічного профілю та параметрів його

дискретизації на прогнозовані витрати енергії електричного транспортного засобу.

Практичне значення результатів роботи.

Практична цінність роботи полягає у створенні методики, яка дає змогу до початку поїздки порівняти альтернативні маршрути за питомими витратами енергії.

Запропонований підхід може бути використаний у навігаційних системах, програмному забезпеченні прогнозування запасу ходу, інформаційних системах транспортних підприємств і системах керування автомобільними парками.

Важливими для практичного застосування є рекомендації щодо вибору кроку дискретизації та джерела цифрових висотних даних. Вони дозволяють зменшити обчислювальні витрати та зберегти прийнятну точність прогнозування.

Створений експериментальний комплекс може використовуватися для подальшого дослідження режимів руху електричних транспортних засобів, сил опору, тягових характеристик і рекуперативного гальмування.

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

Повнота викладення результатів дослідження в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційного дослідження опубліковано у 15 наукових працях.

Три статті індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus, одна стаття опублікована у науковому фаховому виданні України категорії «Б», одинадцять праць є матеріалами наукових конференцій.

Тематика публікацій відповідає змісту дисертації. В опублікованих працях представлено результати аналізу факторів енергоспоживання, математичного моделювання, дослідження топологічних даних, експериментальної перевірки та оцінювання практичного застосування запропонованого підходу.

Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлені у

публікаціях здобувача та пройшли належну апробацію.

Дотримання вимог академічної доброчесності.

Під час ознайомлення з дисертаційною роботою та публікаціями Халаїмова Т.О. порушень принципів академічної доброчесності не виявлено.

Використані автором положення, результати та матеріали інших дослідників супроводжуються відповідними посиланнями на джерела. Результати, винесені на захист, отримані здобувачем особисто.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок Халаїмова Т.О. визначено та наведено у дисертаційній роботі.

Зауваження та дискусійні питання дисертаційної роботи.

1. У розрахунковій моделі коефіцієнт опору коченню приймається як заданий параметр транспортного засобу. Водночас у реальних умовах його значення залежить від типу та стану дорожнього покриття, тиску і температури шин, їх зношеності, швидкості руху та погодних умов. Доцільно пояснити, як у запропонованій методиці можуть ураховуватися різні категорії дорожнього покриття та зміна технічного стану шин під час тривалої експлуатації електромобіля.

2. Експериментальне визначення коефіцієнта опору коченню виконано під час взаємодії колеса з роликами лабораторної установки. Такий контакт відрізняється від руху шини по плоскій дорожній поверхні кривиною опорної поверхні, характером деформації шини та розподілом тиску в зоні контакту. Потребує уточнення, чи необхідно вводити коригувальний коефіцієнт під час перенесення експериментально визначених параметрів стенда на реальні дорожні умови.

3. Запропонований підхід орієнтований на мінімізацію витрат енергії, однак маршрут із найменшим енергоспоживанням не завжди є найбільш раціональним з позиції експлуатаційної безпеки. Значні поздовжні ухили, тривалі ділянки руху під гору, низький коефіцієнт зчеплення та обмеження швидкості можуть підвищувати навантаження на гальмівну систему і погіршувати стійкість автомобіля. Доцільно пояснити можливість введення до алгоритму додаткових обмежень за граничним ухилом, станом дорожнього

покриття, допустимою швидкістю та умовами безпечного гальмування.

4. У техніко-економічній частині ефект від вибору маршруту визначається переважно за зменшенням споживання електричної енергії. Проте експлуатація автомобіля на маршрутах із різною якістю покриття, кількістю розгонів і гальмувань та значними ухилами може по-різному впливати на зношування шин, гальмівних механізмів, підвіски й інших елементів ходової частини. Доцільно уточнити, чи може критерій вибору маршруту бути розширений до мінімізації сукупних експлуатаційних витрат з урахуванням технічного обслуговування та ресурсу компонентів автомобіля.

Зазначені зауваження не знижують наукової новизни, обґрунтованості та практичної цінності дисертаційної роботи.

Висновок.

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 витрат енергії електричного транспортного засобу та вибору енергоефективного маршруту з урахуванням його топологічного профілю.

Отримані автором результати є достатньо обґрунтованими та достовірними, мають наукову новизну і практичне значення для підвищення енергетичної ефективності та вдосконалення експлуатації електричних транспортних засобів.

Матеріали дисертації викладено у логічній послідовності з дотриманням наукового стилю. Основні положення роботи достатньо повно опубліковані у друкованих та електронних наукових виданнях, зокрема у виданнях, що індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus.

Дисертаційна робота за своїм 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,
завідувач кафедри автомобільного транспорту
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»

Віталій КРІВДА