

ВІДГУК

Офіційного опонента ПЕРЕСАДИ Сергія Михайловича 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. Електрифікація автомобільного транспорту переводить проблему збільшення запасу ходу з площини суто акумуляторних технологій у комплексну задачу узгодженого функціонування джерела живлення, тягового електропривода, системи керування та умов руху. Навіть за незмінних технічних характеристик транспортного засобу його енергоспоживання істотно залежить від швидкісного режиму, дорожніх опорів і зміни висоти вздовж маршруту.

З позицій теорії електропривода топологічний профіль формує детерміновану складову моменту навантаження. Під час руху вгору вона збільшує необхідний електромагнітний момент і потужність, а під час руху вниз змінює напрям енергетичного потоку та створює умови для рекуперативного гальмування. Тому попередня оцінка топологічного навантаження є важливою як для прогнозування запасу ходу, так і для формування енергетично доцільного завдання електромеханічній системі.

Наявні картографічні сервіси переважно оптимізують шлях за довжиною або тривалістю поїздки. Однак найкоротший чи найшвидший варіант не обов'язково є мінімальним за витратами енергії, особливо для маршрутів зі значними перепадами висоти. У зв'язку з цим розроблення фізично обґрунтованого методу порівняння альтернативних шляхів за енергетичним критерієм є актуальним науково-прикладним завданням.

Дисертаційна робота Халаїмова Т.О. спрямована на встановлення закономірностей впливу топології маршруту на витрати енергії електричного

транспортного засобу, формування прогнозової моделі та її експериментальну перевірку. Обрана тематика відповідає сучасним напрямам розвитку енергоефективних електромеханічних систем і має безпосереднє практичне значення для електромобілів та систем керування автопарками.

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

Дослідження виконано на кафедрі електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Його результати пов'язані з науково-дослідною роботою «Model Predictive Dynamic Energy Efficient Control in Rotating Field Machines» (номер державної реєстрації 0124U003745, травень 2024 р. – грудень 2025 р.) та з науково-дослідною роботою «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, січень 2026 р. – грудень 2028 р.).

Створена експериментальна база та засоби дистанційного керування також узгоджуються з тематикою міжнародного проєкту DAAD «LAB4All – Open Access Cyber-Physical Laboratories for Ukrainian Universities». Отже, дисертаційна робота є складовою послідовних досліджень кафедри у сфері енергоефективних електромеханічних систем, моделювання та кіберфізичного експерименту.

Оцінка структури та змісту дисертаційної роботи.

Дисертація містить анотації українською та англійською мовами, зміст, перелік умовних позначень і скорочень, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел із 174 найменувань та два додатки. Структура роботи відповідає послідовності розв'язання поставлених завдань: від аналізу факторів і моделей до математичного опису, експериментальної перевірки та оцінювання практичної доцільності.

У першому розділі систематизовано фактори енергоспоживання електромобілів, проаналізовано конструктивні та керувальні методи підвищення енергоефективності, стандартизовані процедури оцінювання запасу ходу та підходи до прогнозування витрат енергії. Окремо зіставлено фізично

орієнтовані, емпіричні, побудовані на основі даних і гібридні моделі. На підставі такого порівняння обґрунтовано вибір фізично орієнтованого підходу, придатного для дослідження окремого впливу топологічного профілю.

У другому розділі сформовано математичний опис механічної роботи та питомих витрат енергії під час руху заданим маршрутом. Модель враховує швидкість, прискорення, масу, опір коченню, аеродинамічний опір, складову сили тяжіння та потенціал рекуперації. На альтернативних шляхах між однаковими початковою і кінцевою точками досліджено вплив топології, а також похибки, що виникають унаслідок вибору цифрової моделі висот і кроку дискретизації.

Третій розділ присвячено створенню експериментальної установки з електричним трициклом, роликовим навантажувальним механізмом, вимірювальною системою та програмно-керованим формуванням швидкісного завдання. Автором виконано розділення складових витрат, визначено коефіцієнт опору коченню, сформовано еквівалентний момент топологічного навантаження та проведено відтворення LOW-фази WLTC Class 3b. Це дало змогу зіставити розрахункові й експериментальні результати.

У четвертому розділі отримані енергетичні результати переведено у показники витрат електричної енергії та коштів для приватного транспортного засобу й автопарку. Розглянуто передумови створення інформаційної системи енергоефективної маршрутизації та наведено техніко-економічне обґрунтування її застосування.

Зміст розділів взаємопов'язаний, а висновки за ними відповідають наведеним результатам. Робота є завершеним дослідженням, у якому теоретичні положення доведено до експериментальної перевірки та практичних рекомендацій.

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів.

Достовірність наукових результатів забезпечена коректним застосуванням рівнянь поздовжнього руху, балансу сил, потужності та енергії, чисельним опрацюванням топологічних даних і порівняльним аналізом альтернативних

маршрутів. Використані припущення сформульовано, а межі застосовності запропонованого підходу визначено.

Важливою складовою роботи є дослідження впливу просторової роздільної здатності цифрових моделей рельєфу та кроку дискретизації. Автором встановлено, що для розглянутих маршрутів використання кроку 10–100 м забезпечує похибку в межах 8,6 % відносно дискретизації 1 м. Це дозволяє узгодити точність розрахунку з обсягом обчислень.

Експериментальна частина побудована на окремому визначенні базових втрат установки, дослідженні впливу додаткової маси й швидкості та відтворенні стандартизованого швидкісного профілю. Порівняння розрахункових і вимірних результатів під час LOW-фази WLTC Class 3b дало розбіжність близько 11 %. З урахуванням масштабу стенда, прийнятих припущень і використаного транспортного засобу такий результат підтверджує працездатність методики.

Наведені теоретичні, розрахункові та експериментальні матеріали є взаємоузгодженими, а сформульовані висновки випливають із результатів дослідження.

Наукова новизна роботи.

До основних результатів дисертації, які мають наукову новизну, слід віднести такі положення:

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. Науково обґрунтовано вимоги до системи тестування електромеханічних систем електричних транспортних засобів, на основі чого розроблено структуру експериментальної установки з формуванням

навантаження за допомогою кінематичної пари кочення, яка дозволила вперше встановити, 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, а також експериментально підтвердити, що на LOW фазі WLTC Class 3b похибка відносно теоретичних результатів не перевищує 11%.

Наукове значення роботи полягає в розвитку методів енергетичного моделювання електричних транспортних засобів та у встановленні кількісного впливу параметрів топологічного профілю на результат вибору маршруту.

Практична цінність одержаних результатів.

Розроблена методика дозволяє до початку поїздки визначати питомі витрати енергії для кількох альтернативних шляхів і ранжувати їх за енергетичним критерієм. Її застосування можливе як для окремого електромобіля, так і для автопарку після параметричного налаштування моделі.

Практично корисними є рекомендації щодо вибору джерела топологічних даних та кроку дискретизації, оскільки вони дають змогу зменшити обсяг розрахунків без неприйнятної погіршення точності. Окрему цінність має створений лабораторний комплекс, придатний для відтворення швидкісних циклів і програмного формування еквівалентного навантаження.

Результати дослідження використано під час підготовки рекомендацій для ТОВ «ПНМЕК «ТОКА» та впроваджено у навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Запропонований підхід може бути покладено в основу програмних модулів навігації, прогнозування запасу ходу та керування автопарками.

Повнота оприлюднення основних результатів.

За тематикою дисертації опубліковано 15 наукових праць. Три статті індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus, одна стаття опублікована у науковому фаховому виданні України категорії «Б», одинадцять праць є матеріалами наукових конференцій.

Зміст публікацій охоплює основні етапи дослідження, експериментальну валідацію та практичне застосування результатів. Кількість і рівень публікацій відповідають вимогам до оприлюднення результатів дисертації на здобуття ступеня доктора філософії.

Дотримання принципів академічної доброчесності.

Під час ознайомлення з дисертацією та публікаціями здобувача ознак порушення академічної доброчесності не виявлено. Запозичені положення супроводжуються посиланнями на відповідні джерела, а результати, винесені на захист, належать автору.

Особистий внесок Халаїмова Т.О. у працях, опублікованих у співавторстві, конкретизовано в дисертації та відповідає результатам, використаним у кваліфікаційній науковій праці.

Зауваження та дискусійні питання дисертаційної роботи.

1. Наукова новизна пункти 3 та 4 сформульована не дуже вдало відповідно до загальної формули « що нове, чим відрізняється, що дає».

2. Запропонована модель визначає необхідну тягову силу за заданим швидкісним профілем, однак не містить динамічної моделі замкненої системи тягового електропривода. Такий квазістатичний розгляд має відомі обмеження, які необхідно було б проаналізувати.

3. Параметри втрат мотор-колеса, роликової системи, навантажувальної установки та опору коченню визначалися послідовно за результатами окремих експериментів. У роботі не наведено формального аналізу ідентифікованості цих параметрів і можливості їх взаємної компенсації. Варто уточнити, яким чином це може впливати на точність оцінок.

4. Під час експериментального відтворення швидкісного профілю WLTC використано замкнену систему регулювання швидкості електричного транспортного засобу. Водночас у дисертації недостатньо розкрито методику вибору структури та параметрів регулятора, а також показники якості

регулювання за зміни еквівалентної маси й моменту навантаження. Наскільки це критично ?

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

Висновок про дисертаційну роботу.

Матеріали дисертаційного дослідження викладено у логічній послідовності з дотриманням наукового стилю. Основні результати достатньо повно оприлюднено у друкованих та електронних наукових виданнях, у тому числі у виданнях, що індексуються міжнародною наукометричною базою Scopus.

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 електричних транспортних засобів та вибору енергоефективного шляху з урахуванням топологічного профілю маршруту.

Отримані теоретичні й експериментальні результати є обґрунтованими, мають наукову новизну та практичне значення для електромеханічних систем електричного транспорту, інформаційних засобів прогнозування запасу ходу та енергоефективної маршрутизації.

За змістом, актуальністю, рівнем наукової новизни, достовірністю результатів, практичною цінністю та повнотою їх опублікування дисертація відповідає спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» і 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 ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

доктор технічних наук, професор,
науковий керівник кафедри автоматизації
електромеханічних систем та електроприводу
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



Сергій ПЕРЕСАДА