

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Автомобільний факультет

Кафедра автомобілів ім. А.Б. Гредескула

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
МАГІСТРА**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЛЬМІВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ДЛЯ
СПОРТИВНИХ ПЕРЕГОНІВ**

Завідувач, кафедри д-р. техн. наук, проф.



Валерій КЛИМЕНКО

Нормоконтролер, канд. техн. наук, доц.



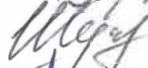
Михайло ХОЛОДОВ

Консультант, д-р. техн. наук, проф.



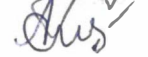
Микола МИХАЛЕВИЧ

Керівник, д-р. техн. наук, проф.



Сергій ШУКЛНОВ

Здобувач, гр. АА-61-24



Андрій ХОЛОД

Харків – 2025

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет автомобільний

Кафедра автомобілів ім. А.Б. Гредескула

Освітній магістр _____

(шифр і назва)

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва)

Освітня програма Автомобілебудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автомобілів
ім. А.Б. Гредескула

проф. Клименко В.І.

20 10 2025

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Холод Андрію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження гальмівних властивостей електромобілів для спортивних перегонів

керівник Шуклінов Сергій Миколайович, д-р техн. наук, професор.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора ХНАДУ від "08.10" 2025 року № 155

2. Строк подання здобувачем роботи 12 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Повна маса електромобіля $m_a = 732$ кг;

- на передню вісь $m_1 = 231$ кг;

- на задню вісь $m_2 = 501$ кг;

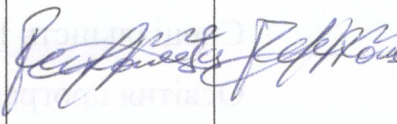
База автомобіля $L = 2,545$ м.

Коефіцієнт опору повітря $k_v = 0,429$ Н·с²/м⁴

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. 1 Огляд та аналіз робіт що до дослідження гальмівних властивостей електромобілів. 2 Основи теоретичних положень динаміки гальмування електромобіля. 3 Теоретичні дослідження динаміки гальмування електромобіля; 4. Оцінка економічної ефективності розробки. Висновки. Перелік посилань. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників): Огляд та аналіз гальмівних систем гібридів та електромобілів (ТЧ, А1); Огляд та аналіз видів спортивних змагань електромобілів (ТЧ, А1x3); Математична модель колеса у гальмовому режимі (ТЧ, А1); Швидкісні характеристики електродвигуна (ТЧ, А1); Рівняння руху електромобіля при гальмуванні (ТЧ, А1); Нагрів фрикційних гальмових механізмів (ТЧ, А1x2); Теоретичні дослідження та імітаційна модель динаміки гальмування електромобіля (ТЧ, А1x3); Аналіз результатів дослідження динаміки гальмування електромобіля (ТЧ, А1x4); Оцінка економічної ефективності розробки (ТЧ, А1)

6. Консультанти розділів роботи

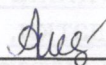
| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--|---|---|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Оцінка економічної ефективності розробки | Михалевич М.Г., проф. |  | |

7. Дата видачі завдання 12 жовтня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1 | Вступ. Огляд та аналіз робіт що до дослідження гальмівних властивостей електромобілів. | 16.10.25 | |
| 2 | Основи теоретичних положень динаміки гальмування електромобіля | | |
| | Математичні моделі гальмівних систем | 10.11.25 | |
| | Рівняння руху електромобіля при гальмуванні | 14.11.25 | |
| | Нагрів фрикційних гальмових механізмів | 20.11.25 | |
| 3 | Теоретичні дослідження динаміки гальмування електромобіля | 05.12.25 | |
| 4 | Оцінка економічної ефективності розробки | 08.12.25 | |
| 5 | Оформлення пояснювальної записки. | 10.12.25 | |
| 6 | Підготовка презентації до захисту. | 12.12.25 | |

Здобувач

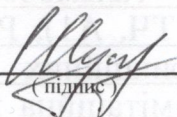


(підпис)

Холод А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Шуклінов С.М.

(прізвище та ініціали)

ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить: 98 с., 39 рис., 12 табл., 27 джерел.

ГАЛЬМІВНІ ВЛАСТИВОСТІ, ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, ПЕРЕГОНИ, ГАЛЬМІВНІ ВЛАСТИВОСТІ, ГАЛЬМІВНА СИСТЕМА, СПОРТИВНИЙ АВТОМОБІЛЬ, ГІДРАВЛІЧНА СИСТЕМА ГАЛЬМ, ЕЛЕКТРОДВИГУН.

Об'єкт дослідження – гальмівна система електромобілів для спортивних перегонів.

Мета роботи – дослідження гальмівних властивостей електромобілів для спортивних перегонів.

Методи дослідження – теоретичні, аналітичні та методи досліджень гальмівних властивостей електромобілів для спортивних перегонів.

Гальмівна система електромобілів є одним із ключових елементів, що визначає рівень безпеки та ефективності експлуатації транспортного засобу. Її значення зростає через специфіку електротранспорту, адже він має більшу масу порівняно з традиційними автомобілями, що підвищує навантаження на гальмівні механізми. Використання рекуперативного гальмування створює додаткові переваги, оскільки дає змогу частково відновлювати витрачену енергію та знижувати споживання електроенергії. Проте для досягнення стабільного, прогнозованого та безпечного процесу уповільнення необхідна чітка взаємодія між рекуперативною та механічною системами гальмування.

Особливу увагу приділяють надійності, швидкодії та зносостійкості гальмівних механізмів, оскільки саме вони відповідають за зупинку автомобіля у критичних ситуаціях, коли можливості рекуперації обмежені. Важливим аспектом також є вдосконалення систем керування, які забезпечують оптимальний розподіл гальмівних зусиль та узгодженість роботи електронних блоків. Результати кваліфікаційної роботи можуть бути використані в навчальному процесі і при проектуванні об'єктів оборонної техніки.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ..... | 7 |
| 1. Огляд та аналіз робіт, що до дослідження гальмівних властивостей електромобілів | 8 |
| 1.1 Огляд та аналіз гальмівних систем гібридів та електромобілів | 8 |
| 1.2 Огляд та аналіз видів спортивних змагань електромобілів | 20 |
| 1.3 Електромобілі ЛША ХАДІ | 29 |
| 1.4 Мета дослідження та постановка наукових завдань | 34 |
| 2 Основи теоретичних положень динаміки гальмування електромобіля | 36 |
| 2.1 Математична модель колеса у гальмовому режимі | 37 |
| 2.2 Швидкісні характеристики електродвигуна | 39 |
| 2.3 Рівняння руху електромобіля при гальмуванні | 42 |
| 2.4 Нагрів фрикційних гальмових механізмів | 47 |
| 3. Теоретичні дослідження динаміки гальмування електромобіля | 52 |
| 3.1 Імітаційна модель динаміки гальмування електромобіля | 52 |
| 3.2 Дослідження та аналіз результатів дослідження динаміки гальмування електромобіля..... | 59 |
| 4. Оцінка економічної ефективності розробки | 68 |
| Висновки..... | 77 |
| Перелік посилань | 78 |
| Додаток А Презентаційний матеріал до кваліфікаційної роботи магістра..... | 79 |

ВИСНОВКИ

Встановлено, що за відсутності рекуперативного гальмування вся кінетична енергія транспортного засобу перетворюється на теплову енергію в механічних гальмівних механізмах, що призводить до значного нагрівання гальмівних дисків, особливо передньої та задньої осей. Максимальні температури в окремих режимах досягають понад 110 °С, що свідчить про високий рівень термічного навантаження та потенційне зростання зносу гальмівних елементів.

Застосування електродвигуна в режимі рекуперативного гальмування забезпечує суттєвий перерозподіл енергії гальмування між механічними гальмами та електричною частиною силової установки. Частина кінетичної енергії перетворюється на електричну та повертається до батарейного блоку, що зменшує теплове навантаження на гальмівні механізми.

Виявлено, що використання рекуперації дозволяє знизити максимальні температури гальмівних дисків передньої осі на 23–94 %, а задньої осі — на 37–96 % залежно від зусилля на педалі гальма. Найбільший ефект зниження температур спостерігається при менших значеннях зусилля на педалі, коли внесок електродвигуна у гальмування є максимальним.

Показано, що зі зменшенням зусилля на педалі гальма зростає частка енергії, яка поглинається електродвигуном. Це підтверджується значним підвищенням його температури (до 187 °С при зусиллі 100 Н), що необхідно враховувати при проектуванні системи охолодження електродвигуна та силової електроніки.

Аналіз сил, що діють під час гальмування, засвідчив, що без рекуперації основне навантаження припадає на гальмівні механізми передньої осі, тоді як при використанні електродвигуна частина гальмівної сили ефективно компенсується електричним гальмуванням. Аеродинамічний опір повітря та сила опору коченню мають другорядний вплив і зменшуються зі зниженням швидкості руху.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. United Nations Economic Commission for Europe. (2015). *Regulation No. 13 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking*. Geneva: UNECE.
2. Шуклінов, С. М., & Альокса, М. М. (2022). *Автомобіль. Теорія та експлуатаційні властивості: навчальний посібник*. Харків: ФОП Бровін О. В. ISBN 978-617-8009-77-9.
3. Wawrzyniec Gołębiewski, *Relacje pomiędzy zużyciem energii a parametrami trakcyjnymi pojazdu elektrycznego* (2016) *Eksplatacja i testy*. AUTOBUSY, 90-92.
4. Shuklinov, S. M., Klymenko, V. I., Leontiev, D. M., & Aloksa, M. M. (2023). *Automobile: Theory and operational properties: Study guide*. Kharkiv: Brovin O. ISBN 978-617-8238-19-3.
5. Shuklinov, S., Kholodov, M., Verbitskiy, V., Makarov, V., & Ryzhykh, L. (2020). Simulation of the combined braking control system for hybrid electric vehicles. *SAE Technical Paper 2020-01-0217*. <https://doi.org/10.4271/2020-01-0217>
6. Туренко, О. М., & Шуклінов, С. М. (2010). Адаптивне гальмівне керування колісних машин. *Журнал автомобільних інженерів*, 5(64), 18–21.
7. Nissan Motor Co. Ltd. (2025). *Керівництво з експлуатації Nissan LEAF*. Отримано з <https://www.nissan.ua/content/dam/Nissan/ua.pdf>
8. Lange, J., Wachter, S., Engelhardt, T., Oechslen, S., & Heitmann, A. (2020). Highly integrated electric axle. In **E-MOTIVE Expert Forum Electric Vehicle Drives** (pp. 1–6).
9. *Service Repair Manual: Brake circuit – Operating diagram*. (2025). Отримано з https://www.rkoleos.com/319/brake_circuit_operating_diagram.html.
10. Leontiev, D., Savchenko, Y., Harmash, A., Suhomlyn, O., & Sinelnik, D. (2022). On the issue of using expenditure functions in simulation of pneumatic links of the

“throttle–capacity” type. *Automobile Transport*, (51), 43–57.
<https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2022.51.0.05>

11. Леонтъев Д. М. (2013) Вплив алгоритмів роботи автоматичних систем на ефективність гальмування транспортного засобу. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, (61-62), 158-161.

12. Леонтъев Д. М., Смирнова Н. В. (2014) Узагальнення рівнянь руху автомобілів для розрахунку швидкості вільного руху. *Автомобільний транспорт*, (34), 44-48.

13. Леонтъев Д. М. (2015) Про розрахунковий спосіб визначення висоти координати центру ваги типових автомобілів. *Автомобільний транспорт*, 37, 101 – 107.

14. Туренко, А. Н., Клименко, В. И., Богомолов, В. А., Рижих, Л. А., Леонтъев, Д. М., Красюк, А. Н., Михалевич, М. Г. (2015). Реалізація інтелектуальних функцій в електронно-пневматичному гальмівному керуванні транспортними засобами.

15. Leontiev, D., Klimenko, V., Mykhalevych, M., Don, Y., & Frolov, A. (2019). Simulation of working process of the electronic brake system of the heavy vehicle. In *International scientific-practical conference*. Springer International Publishing. 1019, 50-61. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25741-5_6

16. Туренко, А. Н., Клименко, В. И., Рижих, Л. А., Леонтъев, Д. М., Красюк, А. Н. (2012). *Основи створення та дослідження електронно-пневматичного гальмівного керування транспортних засобів*. Монографія.

17. Александров, С. С., Богомолов, В. О., Клименко, В. И., & Леонтъев, Д. М. (2025). *Прикладна теорія коливань для студентів автомобільних спеціальностей вищів: навчальний посібник*.

18. Богомолов, В. О., & Леонтъев, Д. М. (2025). *Математичне моделювання робочих процесів колісних та гусеничних транспортних засобів: навчальний посібник*.

19. Леонт'єв Д. М., Туренко А. Н., Ломака С. І., Рудих Л. А., Бикадоров А. В. (2011) Дослідження кочення автомобільного колеса з максимальною ефективністю в гальмівному режимі. *Автомобільний транспорт* (29), 23-28.

20. Туренко, А. М., Клименко, В. І., Рижих, Л. О., Ломака, С. Й., Леонт'єв, Д. М. (2006). Сучасні електронні гальмівні системи автомобілів. *Вісник КДПУ*. (2). 64-66.

21. Клименко, В. І., Ломака, С. Й., Рижих, Л. О., & Туренко, А. М. (2006). Аналіз алгоритмів регулювання гальмівних сил регулятором з електронним керуванням. *Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки"*, 4 (39), 26-35.

22. Leontiev, D., & Don, Y. (2019). Обґрунтування раціонального закону зміни тиску в електропневматичному гальмовому приводі під час екстреного гальмування. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, (84), 21-21.

23. Рижих, Л. О., Леонт'єв, Д. М., & Куріпка, О. В. (2020). Щодо питання моделювання електропневматичного гальмового приводу. *Науково-практична конференція «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація»*. 15-16.

24. Леонт'єв Д.М., Серикова Е.А., Быкадоров А.В., Дон Е.Ю. (2012). Аналіз та вибір принципів керування електропневматичними модуляторами робочої гальмівної системи автомобілів. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. (60). 67 – 72.

25. Рижих, Л. А., Леонт'єв, Д. М. (2011). Особливості електронно-пневматичної гальмівної системи транспортних засобів. *Автомобільний транспорт*, (29), 68-70.

26. Богомолів, В. О., Клименко, В. І., Леонт'єв, Д. М., Савченко, Є. Л., Гармаш, А. А. (2020). Щодо питання використання витратних функцій під час моделювання пневматичних ДС-ланок з високою та низькою швидкістю.

Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції ННІ механотроніки і систем менеджменту. 72-73.

27. Туренко, А. М., Ломака, С. Й., Клименко, В. І., Рижих, Л. О., Леонтьєв, Д. М., Чебан, А. А., Красюк, О. М., & Тишковець, С. В. (2008). *Модулятор електронної гальмівної системи* (Патент України № 84437 С2). ХНАДУ. Заявка № а 2006 02536, подана 09.03.2006. Опубліковано 27.10.2008 у *Бюлетені № 20*.