Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИВОДА ДЛЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ НАДМАЛОГО КЛАСУ

Виконала:
здобувачка вищої освіти денної форми навчання освітнього ступеня «Бакалавр», освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
_____Олександра ЖУРАВЛЕНКО

Керівник: канд. техн. наук, доцент
_____**Ігор ГАРАСИМЧУК**

Оцінка захисту:
Національна шкала_____
Кількість балів _____Шкала ECTS_____

Допускається до захисту:
«____» _____2026 р.
Гарант освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» кандидат технічних наук, доцент _____**Ігор ГАРАСИМЧУК**

м. Кам'янець-Подільський, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП 8
РОЗДІЛ 1 ОБҐРУНТУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ПРИВОДА ДЛЯ МІКРОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ 11
1.1 Класифікація та характеристика мікротранспортних засобів як об'єктів приводної системи 11
1.1.1 Конструктивні різновиди та типова компоновка 12
1.1.2. Нормативна та регуляторна база 13
1.2. Технічна характеристика базового об'єкта проектування 14
1.2.1. Вибір прототипу та визначення розрахункових параметрів 14
1.2.2. Трансмісійна схема і місце приводу в загальній конструкції 15
1.3. Аналіз вимог до електромеханічного привода 17
1.3.1. Тягові вимоги 17
1.3.2. Вимоги до акумуляторної батареї 18
1.4. Порівняльний аналіз типів тягових двигунів для триколісного міні-електромобіля 18
1.4.1. Щітковий двигун постійного струму (DC Brushed) 18
1.4.2. Безщітковий двигун постійного струму / PMSM (BLDC / PMSM) 19
1.4.3. Асинхронний двигун (AIM) із частотним керуванням 20
1.5. Концепція системи керування приводом триколісного міні-електромобіля 21
1.5.1. Функціональна структура системи керування 21
1.5.2. Алгоритм рекуперативного гальмування 22

1.5.3. Функція обмеження швидкості на поворотах (Electronic Stability Function) 23
1.6. Вибір джерела живлення 23
1.6.1. Порівняльний аналіз акумуляторних технологій 23
1.7. Зведена специфікація концепції 25
1.7.1. Очікувані техніко-економічні показники 26
Висновки до розділу 1 27
РОЗДІЛ 2 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМИ 28
2.1. Визначення розрахункових навантажень та побудова тягової характеристики 28
2.1.1. Вихідні дані для розрахунку 28
2.1.2. Розрахунок сил опору руху в характерних режимах 29
2.1.3. Визначення потужності та моменту тягового двигуна 30
2.2. Електромагнітний розрахунок тягового двигуна PMSM 32
2.2.1. Розрахунок обмотки статора 32
2.2.2. Розрахунок активного і індуктивного опорів фази 33
2.3. Розрахунок втрат і ККД двигуна 33
2.3.1. Втрати в сталі статора 33
2.3.2 Механічні та додаткові втрати 34
2.3.3. Зведений баланс потужностей і ККД двигуна 34
2.4. Розрахунок та вибір акумуляторної батареї 35
2.4.1. Визначення ємності та конфігурації 35
2.4.2. Розрахунок струмів акумулятора у режимах роботи 37
2.4.3. Вибір BMS і системи підігріву 37
2.5. Розрахунок та вибір силового електронного перетворювача 40
2.5.1. Визначення параметрів інвертора 40
2.6. Розрахунок і вибір системи керування 41
2.6.1. Вибір мікроконтролера 41

2.7. Розрахунок редуктора і трансмісійного вузла 44
2.7.1. Розрахунок зубчастої передачі 44
2.8. Зведена специфікація обладнання та техніко-економічна оцінка 45
2.8.1. Повна специфікація системи 45
2.9.2. Орієнтовна вартість компонентів. 47
Висновки до розділу 2 48
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ. 49
3.1. Загальна концепція та ієрархічна структура САК 49
3.2 Синтез регуляторів струму (внутрішній контур) 50
3.2.1. Структура внутрішнього контуру 51
3.2.2. Синтез ПІ-регулятора струму методом модульного оптимуму 51
3.3. Алгоритм просторово-векторної модуляції (SVPWM) 52
3.4. Синтез спостерігача положення ротора (BEMF-метод) 53
3.4.1. Структура спостерігача Люенбергера 53
3.5. Алгоритм рекуперативного гальмування 54
3.5.1. Принцип реалізації рекуперації 54
3.6. Алгоритм захисту від відкочування (Anti-Rollback) 57
3.6.1. Алгоритм ARB 57
3.7. Реалізація алгоритмів у мікроконтролері STM32G474 58
3.7.1. Програмна архітектура 58
3.8. Моделювання системи керування 58
3.8.1. Структура моделі 58
3.8.2. Результати моделювання 59
Висновки до розділу 3 61
РОЗДІЛ 4ТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБКИ 62
4.1. Просторове компонування приводного комплексу у конструкції транспортного засобу 62

4.2. Конструктивне виконання силового блоку (контролера привода) 63
4.2.1. Структура друкованої плати контролера 63
4.2.2. Конструктивні параметри та захист 65
4.3. Економічна оцінка розробки 66
4.3.1. Структура витрат на НДДКР 66
4.3.2. Собівартість серійного виробу 67
Висновки до розділу 4 68
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 72

ВСТУП

Актуальність теми

У сучасному світі питання сталого розвитку міської інфраструктури, зниження рівня викидів шкідливих речовин та підвищення енергетичної ефективності транспортних систем набувають дедалі більшого стратегічного значення. Безпрецедентна урбанізація, постійне зростання щільності населення в мегаполісах та постійні затори в традиційних транспортних системах сприяють формуванню абсолютно нових парадигм особистої мобільності. У цьому сенсі ультракомпактні особисті електромобілі, такі як електросамокати, електричні скейтборди, моноколеса, гіросамокати та портативні електровелосипеди, перетворилися з нішевого технічного рішення на широко прийнятий ринковий сегмент.

За оцінками провідних аналітичних компаній, зокрема Mordor Intelligence та Grand View Research, світовий ринок особистих електромобілів демонструє стабільне зростання продажів із середнім річним темпом зростання (CAGR) понад 7–9%, а за різними оцінками, до 2030 року його обсяг перевищить позначку в 40–50 млрд доларів США. В Україні попит на малогабаритні електромобілі залишається високим попри складну соціально-політичну ситуацію, а проблема вітчизняних науково-технічних розробок у цій сфері стає все гострішою через необхідність технологічного суверенітету та відновлення промисловості.

Основною робочою частиною електромобіля є привід — фізичний механізм, що складається з електродвигуна та електромеханічної системи, яка перетворює електричну енергію на корисну роботу у вигляді лінійного або обертального руху.

Динамічна реакція автомобіля, запас ходу на одному заряді акумулятора, експлуатаційні характеристики в різних умовах, режим теплового режиму та загальна маса системи — все це залежить від приводу. Крім того, існує кілька інших аспектів, що впливають на розробку, зокрема для класу мініатюрних електромобілів: обмеження щодо ваги та розмірів, суворі вимоги до ефективності, необхідність рекуперативного гальмування та забезпечення широкого діапазону регулювання швидкості — це, по суті, інженерні виклики.

Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є розробка, теоретичне обґрунтування та практична верифікація електромеханічного приводу для персонального електротранспорту надмалого класу, що забезпечує оптимальне поєднання енергетичної ефективності, динамічних характеристик, надійності та технологічності виготовлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-технічні задачі:

1. Провести системний аналіз наявних конструктивних рішень електромеханічних приводів для надмалого класу транспортних засобів та виявити їхні переваги, недоліки і перспективні напрями вдосконалення.

2. Розробити математичну модель тягового електродвигуна з урахуванням нелінійності магнітної системи, теплового режиму та втрат у широкому діапазоні частот обертання.

3. Обґрунтувати вибір структури та елементної бази силового перетворювача, розробити алгоритм широтно-імпульсної модуляції з мінімальним рівнем електромагнітних збурень.

4. Синтезувати систему векторного керування тяговим приводом із функціями рекуперативного гальмування та адаптивного обмеження струму в перехідних режимах.

5. Виконати комп'ютерне моделювання розробленої системи з метою оцінки динамічних характеристик, енергетичних показників та поведінки в граничних режимах.

6. Виготовити фізичний макет або дослідний зразок приводу і провести його експериментальні випробування за стандартизованими методиками.

7. Сформулювати рекомендації щодо промислового впровадження розробленого рішення та можливих напрямів його подальшого розвитку.

Об'єкт, предмет і методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес електромеханічного перетворення енергії в тягових системах персонального електротранспорту надмалого класу.

Предметом дослідження є конструктивні, схемотехнічні та алгоритмічні рішення приводного комплексу, що визначають його енергетичну ефективність, динамічні властивості та надійність.

Методи дослідження: аналітичне та чисельне моделювання електромагнітних та теплових процесів методом скінченних елементів (FEM); математичне моделювання динаміки системи керування в середовищах MATLAB/Simulink, PSIM або аналогічних; методи теорії автоматичного керування для синтезу регуляторів; інженерне проектування з використанням CAD/CAE-інструментів; фізичний і стендовий експеримент із застосуванням вимірювальних приладів та систем збору даних.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглядається проєктування електромеханічної приводної системи для надлегких особистих електромобілів на прикладі триколісного міні-електромобіля китайського зразка загальною масою 550 кг, що відповідає категорії L5e згідно з Регламентом ЄС № 168/2013. У ході роботи було розроблено та вирішено низку взаємопов'язаних науково-технічних проблем, вирішення яких охоплює весь процес проєктування – від обґрунтування концепції до економічної оцінки рішення.

1. На основі результатів порівняння типів тягових двигунів вибір внутрішньороторного PMSM з одноступінчастою конічною коробкою передач $i = 6{,}5$ та конічним диференціалом був обґрунтований як найкращий варіант трансмісійної системи. В якості джерела живлення було обрано акумуляторну батарею LiFePO4 конфігурації 24S3P (76,8 В / 120 А·год / 9,2 кВт·год), яка забезпечує розрахунковий пробіг понад 80 км, має термін служби понад 2000 циклів та відповідає стандартам безпеки UN 38.3 та IEC 62133.

2. Електрична система була повністю розрахована. Для двигуна 48S8P були визначені магнітна система (магніти NdFeB N38SH, товщина $l_m = 5{,}0$мм) та обмотки статора (W_1=32 витки, клас ізоляції H), а також постійна крутного моменту $k_T = 0{,}238$Н·м/А. Трифазний інвертор VSI, що використовує 12 MOSFET IRFB4321 з драйвером DRV8323RS на частоті ШІМ 16 кГц, забезпечує ККД 94,5% і задовольняє всі розраховані вимоги до струму. ККД приводу системи становить 76,9% у номінальному режимі.

3. Розроблено та реалізовано ієрархічний FOC-регулятор із трьома контурами на мікроконтролері STM32G474 (170 МГц, FPU). Внутрішній контур регулювання струму (16 кГц, метод модульного оптимуму) забезпечує смугу пропускання ~795 Гц і час встановлення 0,47 мс без перевищення. Зовнішній контур швидкості (симетричний оптимальний метод) з фільтром опорного сигналу має час встановлення ~9 мс з перевищенням менше 5%. Обидва контури мають достатні запаси стійкості: фазовий запас перевищує 45°, а амплітудний запас — 8 дБ. Обсервер Luenberger BEMF з фільтром PLL здійснює безсенсорне визначення кута повороту ротора на швидкостях понад 10% від номінальної швидкості з автоматичним переходом у резервний режим датчика Холла. Алгоритми Anti-rollback (утримання на схилах до 9°), ESF (обмеження крутного моменту під час поворотів) та адаптивне рекуперативне гальмування (відновлення ≈ 68 % теоретичної кінетичної енергії) реалізовані виключно в програмному забезпеченні – додаткове обладнання не потрібне.

4. Створену систему було перевірено за допомогою комп'ютерного моделювання, і всі динамічні показники були виконані: час розгону до 40 км/год становив 11,8 с (номінальне значення — 12 с), перевищення швидкості — 5,2 %, а ефективність відновлення — 68,4 %. Аналіз надійності, проведений на основі підходу MIL-HDBK-217F, показав, що середній час між відмовами (MTBF) контролера становить ~66 млн годин, а ймовірність відсутності відмов протягом 5 років — 99,93%. Розроблена програма випробувань включає лабораторні та дорожні випробування при температурі від –20 °C до +45 °C.

5. Економічний розрахунок показав, що собівартість одиниці продукції при масовому виробництві обсягом 500 одиниць на рік становить приблизно 60 000 грн (близько 1 500 дол. США), а термін окупності порівняно з бензиновим аналогом становить 2–3 роки при пробігу 15 000 км на рік, що підтверджує економічну доцільність цієї інновації.

Отже, всі завдання даного дослідження були успішно виконані, а отримані результати мають практичне значення для підприємств, які орієнтуються на розвиток або локалізацію виробництва електромобілів в Україні. Результати цього дослідження можуть бути практично застосовані в інженерному проектуванні та слугувати основою для стандартизації та сертифікації відповідної продукції відповідно до вимог українського законодавства та директив Європейського Союзу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chan C. C., Chau K. T. Modern Electric Vehicle Technology. Oxford : Oxford University Press, 2001. 338 p.

2. Ehsani M., Gao Y., Emadi A. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2010. 557 p.

3. Chau K. T., Chan C. C., Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, No. 6. P. 2246–2257.

4. Sanguesa J. A., Torres-Sanz V., Garrido P., Martinez F. J., Marquez-Barja J. M. A review on electric vehicles: technologies and challenges. Smart Cities. 2021. Vol. 4, No. 1. P. 372–404.

5. Grand View Research. Electric Three-Wheeler Market Size & Share Report, 2022–2030. San Francisco : Grand View Research, 2022. URL: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-three-wheeler-market

6. Бурєнніков Ю. А., Козлов Л. Г., Піонткевич О. В. Система автоматичного керування електрогідравлічним приводом з асиметричним циліндром. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2019. № 3. С. 7–15.

7. Krishnan R. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. Boca Raton : CRC Press, 2010. 611 p.

8. Bianchi N., Bolognani S., Frare P. Design criteria for high-efficiency SPM synchronous motors. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2006. Vol. 21, No. 2. P. 396–404.

9. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 3rd ed. New York : Wiley, 2003. 824 p.

10. Yang M.-H., Dhayalan E., Shih Y.-C. A review of lithium iron phosphate batteries for electric vehicles: latest developments and future prospects. Journal of Power Sources. 2024. Vol. 601. Article 234228.

11. Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й., Рябінін Г. Ю., Замаруєв В. В. Моделювання електромеханічних систем : навчальний посібник. Кременчук : КДПУ, 2001. 376 с.

12. STMicroelectronics. STM32G474xE Advanced Arm-based 32-bit MCUs: Reference Manual RM0440. Rev. 8. Geneva : STMicroelectronics, 2023. 2158 p. URL: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0440.pdf

13. Державний стандарт України ДСТУ IEC 60034-1:2014. Машини електричні обертальні. Частина 1. Номінальні характеристики та робочі властивості. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 78 с.

14. Sul S.-K. Control of Electric Machine Drive Systems. Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2011. 416 p.

15. Morimoto S., Kawamoto K., Sanada M., Takeda Y. Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame. IEEE Transactions on Industry Applications. 2002. Vol. 38, No. 4. P. 1054–1061.

16. Kim H., Son J., Lee J. A high-speed sliding-mode observer for the sensorless speed control of a PMSM. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58, No. 9. P. 4069–4077.

17. Ogata K. Modern Control Engineering. 5th ed. Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2010. 905 p.

18. Rahimi-Eichi H., Ojha U., Baronti F., Chow M.-Y. Battery management system: an overview of its application in the smart grid and electric vehicles. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2013. Vol. 7, No. 2. P. 4–16.

19. Saw L. H., Ye Y., Tay A. A. O. Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack. Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 113. P. 1032–1045.

20. MIL-HDBK-217F (Notice 2). Reliability Prediction of Electronic Equipment. Washington : Department of Defense, 1995. 205 p.