

Розробка електропривода для легкого персонального електричного транспортного засобу

Смирнов О. П.¹, Борисенко А. О.¹, Марченко Д. О.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. Стаття присвячена проблемі підвищення інклюзивної мобільності та екологічної чистоти за рахунок розробки тягового електропривода для легкого персонального електричного транспортного засобу на базі триколісного велосипеда. Проведено дослідження сучасних систем електропривода легких персональних електричних транспортних засобів. Розроблено функціональну та електричну схему системи керування електричним двигуном, обґрунтований вибір двигуна та контролера. Проведений розрахунок та обґрунтування джерела живлення для електропривода триколісного транспортного засобу.

Ключові слова: легкий персональний електричний транспортний засіб, електропривод, електричний двигун, система керування, акумуляторна батарея, енергоємність, електричний велосипед

Вступ

Електромобільність є перспективним варіантом реформування транспортної системи в Україні та інших промислово розвинутих країнах. Тому Президент України 17 березня 2023 року підписав законопроект №8172 «Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами та внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрозарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів», в якому визначений термін «легкий персональний електричний транспортний засіб – колісний транспортний засіб, який оснащений та приводиться в рух виключно електричними тяговими двигунами (одним чи декількома) із потужністю у діапазоні до 1000 Вт, системою акумуляування електричної енергії (акумуляторною батареєю), яка здатна заряджатися шляхом підключення до зовнішнього джерела електричної енергії, з одним, двома, трьома або чотирма колесами, який має максимальну конструктивну швидкість у діапазоні до 25 кілометрів на годину».

Ще 10-15 років тому продажі легких персональних електричних транспортних засобів

(ЕТЗ) були не дуже високі. Повільний вихід на ринок електричних транспортних засобів пояснюється високими початковими витратами та невизначеністю щодо зрілості електронних та електрохімічних технологій, особливо щодо ємності та довговічності акумуляторних батарей.

За останні роки промисловість легких персональних ЕТЗ зазнала значного зростання. Такі фактори, як підвищення інтересу до сталого розвитку, зростання цін на вичопне паливо, завантаженість міського транспорту сприяли цьому зростанню. Компанія глобальних маркетингових досліджень Fortune Business Insights оцінює ринковий сегмент легких персональних електричних транспортних засобів в 37,47 млрд \$ у 2022 р., і, згідно з прогнозами, до 2030 р. ринок може досягти обороту в 119,72 млрд \$ [1].

На європейському рівні велосипедна еко-система складається з приблизно 1000 виробників, 180 000 співробітників, 20 млн велосипедів (традиційних і електричних), з оборотом 21,2 млрд €. Сегмент електричних велосипедів становить близько однієї п'ятої як за вартістю, так і за обсягом, причому Німеч-

чина, Велика Британія та Франція є найважливішими ринками збуту [2].

Використання ЕТЗ зростає з кожним роком, особливо в міському контексті, де легкі персональні електричні транспортні засоби стали одним із основних елементів переходу до більш екологічних та стійких міст [3]. Тому тематика статті є актуальною, своєчасною та перспективною.

Аналіз публікацій

Останніми роками кількість досліджень, пов'язаних із розробкою, впровадженням та експлуатацією легких персональних ЕТЗ, збільшилася, але в літературі не знайдено систематичного аналізу та синтезу науково-технічних рішень щодо проектування та розробки їх тягового електропривода. Науково-технічна література про електричну мобільність була в основному зосереджена на електромобілях та гібридних ЕТЗ, а легкі персональні ЕТЗ досліджені значно менше.

У дослідженні [4] наведено детальний огляд історії, розробки та дослідження легких персональних ЕТЗ, зроблена їх класифікація. На основі попередніх досліджень, надається корисна інформація для науковців, а також дослідників для подальшої розробки легких персональних ЕТЗ. Довгострокова оцінка успішної системи спільного використання легких персональних ЕТЗ розглянуто у дослідженні [5]. У статті [6] досліджені електромобільність стійких міст і виявлені майбутні напрямки досліджень.

У статті [7] проведено дослідження динамічних характеристик та оптимізація необхідної потужності електричних двигунів легких персональних ЕТЗ, оснащених напівавтоматичною трансмісією. Проведений аналіз динамічних та робочих характеристик електричного велосипеда при кожному передавальному відношенні на основі ефектів вхідних параметрів, таких як швидкість передачі та ухил за допомогою Matlab-Simulink. За допомогою цього моделювання проводиться аналіз, щоб максимізувати генерацію електроенергії.

Для живлення електропривода в ЕТЗ використовують різні типи літій-іонних акумуляторів, які є хорошим і перспективним рішенням через їх високу потужність і щільність енергії, низький саморозряд, тривалий термін служби та відсутність ефекту пам'яті [8]. Ма-

тематичне моделювання літій-іонних акумуляторних батарей і методи ідентифікації параметрів роботи батарей для тягового привода ЕТЗ є дуже важливим для правильного прогнозування їх стану заряду (англ. State of Charge, SoC), стану працездатності (здоров'я) батареї (англ. State of Health, SoH) та зниження процесів деградації. У літературі [9, 10] показано, що було розроблено та запропоновано численні моделі літій-іонних акумуляторів і методи оцінки їх параметрів. Крім того, також повідомляється про дослідження їх електричного, термічного моделювання та моделювання деградації.

Огляд методів оцінки працездатності літій-іонних акумуляторів в ЕТЗ та їх актуальності для систем зберігання енергії акумуляторів докладно розглянуто у дослідженні [11]. У статті подано короткий критичний огляд конфігурації модуля акумуляторів для максимізації щільності енергії, з врахуванням точок зору, пов'язані як з підходами до оптимізації, орієнтованими на матеріал, так і на параметри акумулятора.

Для більш ефективного моделювання та керування системою літій-іонної батареї у дослідженні [12] проведено фракційне моделювання та ідентифікація параметрів літій-іонної батареї. Алгоритм керування акумуляторною батареєю для ЕТЗ наведені у дослідженні [13]. Ефективність літій-іонних акумуляторів залежить від робочої температури та струму. Інтенсивні цикли водіння створюють високе термічне навантаження на акумуляторні батареї, що призводить до проблем з безпекою та підвищують процеси деградації.

У статті [14] пояснюється електрохімія батарей та аналізується залежність їх внутрішніх параметрів батареї від температури та сили струму на основі їх електрохімічної природи. У дослідженні [15] розроблено інноваційну мезомасштабну електротермічну модель для літій-іонних батарей, що працюють в ЕТЗ. Емпірична електрична модель і модель деградації акумуляторів електромобілів розроблена у статті [16].

Оптимальна зарядка літій-іонних акумуляторів із сумісною динамікою електротермічної деградації розглянута у дослідженні [17]. Дослідження [18] висвітлює математичну модель електричного велосипеда з динамічними характеристиками та розраховує потужність, необхідну для руху велосипеда в гірському регіоні в паралельному гібридному режимі.

Додаток підтримується операційною системою Android, яка відстежує цикл, що видається потенційним користувачем.

Аналіз досліджень, пов'язаних з електромобільністю та легкими персональними ЕТЗ, показують, що розробки в основному проводилися Китаєм і США та в основному стосувалися наукової галузі інженерії, безпеки та розробки акумуляторних батарей.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є підвищення інклюзивної мобільності та екологічної чистоти за рахунок розробки тягового електропривода для легкого персонального електричного транспортного засобу, що створений на базі триколісного велосипеда.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести дослідження сучасних систем електропривода легких персональних ЕТЗ;
- провести розробку функціональної та електричної схем системи керування електроприводом;
- провести вибір та обґрунтування тягового електричного двигуна та системи керування;
- провести вибір та обґрунтування джерела живлення;
- за результатами дослідження сформулювати висновки.

Дослідження сучасних систем електропривода легких персональних електричних транспортних засобів

Французька компанія Valeo розробила електричну допоміжну систему для велосипеда Valeo Smart e-bike System (рис. 1) [19, 20].



Рис. 1. Електрична допоміжна система Valeo Smart e-bike System [19]

Система призначена для встановлення на місце каретки велосипеда. Вона складається з двох складових. Перша – це електричний дви-

гун Smart e-Bike, створений Valeo в співробітництві з фірмою Effigear, який працює від напруги 48 В. Двигун Smart e-Bike має крутний момент до 130 Н·м та може в 8 разів підсилувати зусилля, яке прикладається велосипедистом до педалей. Потужність електричного двигуна залежить від сили, прикладеної велосипедистом до педалей, і вибраного режиму допомоги, як це показано у Таблиці 1 [20].

Таблиця 1. Режими допомоги Valeo Smart e-bike System

Рівень допомоги	Опис
Off	Допомога деактивована
Eco	Режим економії батареї
Predict	Розумний адаптивний режим
Turbo	Режим максимальної допомоги

Друга складова допоміжної системи Valeo Smart e-bike System – це прихований в корпусі двигуна механізм автоматичного перемикавання передач (дивись рис. 1). Він складається з задньої передачі та функції блокування, яка посилює стійкість електричного велосипеда. Механізм можна розміщувати на велосипеди будь-якого виду: міські, гірські або вантажні. Визначальна особливість системи полягає в тому, що велосипедисту не потрібно перемикати передачі згідно з умовами траси. Трансмсія автоматично прилаштовується до стилю велосипедиста. Максимально допустиме навантаження складає 150 кг.

Valeo Smart e-Bike System містить вбудовані датчики, завдяки яким систематично відстежується частота обертання педалей велосипедистом і зусилля, які він прикладає. Електричний велосипед оснащений електронною системою керування, яка здатна включити електричний двигун і підбирати потрібну передачу. Для утворення крутного моменту силової установки до заднього колеса прикріплюється ремінь зубчастої форми, який не потребує мастила. Акумуляторна батарея встановлюється на нижній трубі рами електричного велосипеда.

Електронна система підтримує важливу функцію різкого прискорення, яка здатна за короткий час активувати всю потужність мотора. Функція є корисною при обгоні інших транспортних засобів. Також у Valeo Smart e-Bike System встановлений режим допомоги при ходьбі. Він полегшує пересування, в той час, коли велосипедисту необхідно вести електричний велосипед поруч на крутих підйомах й в інших складних ситуаціях.

Дисплей дозволяє велосипедисту бачити важливу інформацію про стан систем електровелосипеда. Перші серійні електричні велосипеди Valeo Smart e-Bike System доступні для покупки з 2023 р.

Проведемо дослідження системи Bosch Smart System для електричного велосипеда. Система приводу Bosch Smart System – це система приводу для електричного велосипеда з додатковими функціями, які роблять поїздку безпечнішою та зручнішою. Перший варіант Bosch Smart System був розроблений у 2022 р. На сьогоднішній час існує декілька варіантів таких систем. Проведемо порівняльне дослідження та розглянемо більш докладно електричні двигуни та акумуляторні батареї різних систем Bosch Smart System.

Система електроприводу Bosch Smart System для електричного велосипеда може використовувати на вибір 3 види електричних двигунів, технічні характеристики яких зведені до Таблиці 2 [21-23].

Таблиця 2. Технічні характеристики електричних двигунів Bosch Smart System

Параметр	Performance Line	Performance Line Sport Speed	Cargo Line
Швидкість, км/год	25	45	25
Крутний момент, Нм	75	85	85
Максимальна підтримка, %	300	340	400
Варіанти	втулка і перемикач	маточина	втулка і перемикач
Вага, кг	2,9	2,9	2,9

На рис. 2 наведена система приводу для електричного велосипеда Bosch Smart System та її комплектуючі: 3 види електричних двигунів та приводу, 2 типорозміру акумуляторних батарей, інформаційні дисплеї, блоки керування, GPS-трекер, програмне забезпечення на смартфоні (додаток Flow) та безпосереднє система приводу для електричного велосипеда Bosch Smart System, яка може використовувати на вибір різні види та комплектуючі системи [22].

Акумулятори системи приводу Bosch Smart System використовують елементи типу 21700 для свого PowerPack, такі елементи використовуються не тільки в електромобілі Tesla, але й іншими компаніями в велосипедній індустрії, такими як Akku Vision, BMZ і Specialized.

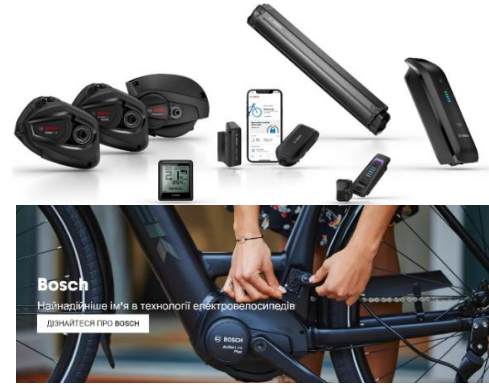


Рис. 2. Система приводу Bosch Smart System та її комплектуючі

Компанія Bosch представила акумуляторні батареї двох різних розмірів: PowerPack 545 і PowerPack 725. Також їх можна комбінувати з інтегрованими в раму акумуляторами PowerTubes. Технічні характеристики акумуляторних батарей зведені до Таблиці 3 [21-23].

Таблиця 3. Технічні характеристики акумуляторних батарей Bosch Smart System

Параметр	Bosch PowerPack		Bosch PowerTube	
	545	725	500	625
Потужність, Вт·год	545	725	500	625
Сумісність з DualBattery	так	так	так	так
Вага, кг	3,0	4,0	3,6	3,0

На повноколірному дисплеї Bosch Kiox системи приводу для електричного велосипеда Bosch Smart System можна відстежувати свою фізичну форму, показники їзди та переглядати всі важливі дані, необхідні для поїздки, наприклад, швидкість і поточний вибраний режим, відстань, час катання, діапазон, середню швидкість, загальну відстань тощо. Можна скласти карту поїздок за допомогою функції навігації або активувати eBike Lock як додатковий захист від крадіжки.

Розробка електропривода для легкого персонального електричного транспортного засобу

Функціональна схема електропривода легкого персонального ЕТЗ (велосипеда) наведена на рис. 3.

Система керування бездатчиковим безколекторним двигуном виконує визначення положення ротора шляхом вимірювання ЕРС на вільній фазі. В кожний момент часу до однієї з фаз підключена напруга "+", до іншої "-", одна з фаз залишається вільною (рис. 4).

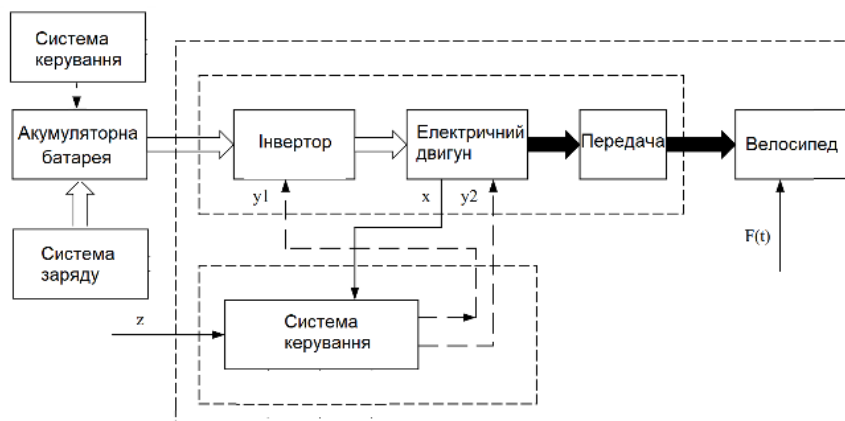


Рис. 3. Схема функціональна електропривода легкого персонального ЕТЗ

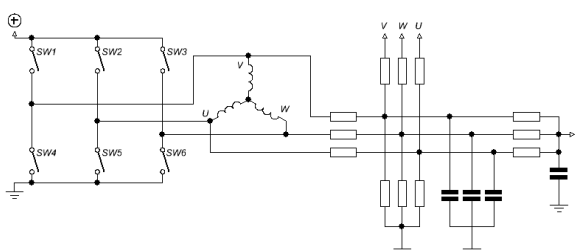


Рис. 4. Електрична принципова схема підключення тягового двигуна

Обертаючись, двигун наводить зворотну ЕРС у вільній обмотці. При обертанні напруга на вільній фазі змінюється. Вимірюючи напругу на вільній фазі, можна визначити момент перемикавання до наступного положення ротора. Зазвичай, визначають момент переходу напруги на вільній фазі через нульову точку (половину напруги живлення). Тобто, необхідно відстежити момент, коли напруга на вільній фазі зрівняється із середньою точкою. Такий метод добре працює при порівняно високих обертах двигуна.

Для того, щоб мікроконтролер зміг виміряти напругу, застосовуються кола узгодження сигналів – ділники напруги та RC-фільтри для згладжування коливань (дивись рис. 4).

Якщо двигун отримує напругу 48 В, то в середній точці напруга може перебувати в межах від 0 В до 48 В. Мікроконтролери зазвичай мають межу виміру 5 В. Без схем узгодження рівнів сигналів не обійтися, оскільки з підвищенням напруги живлення двигуна необхідно змінити ділники напруги в колах узгодження. В іншому випадку напруга може перевищити допустиму і вивести з ладу мікроконтролер. Для запобігання таким ситуаціям додатково застосовують схеми захисту.

Алгоритм комутацій системи керування наступний. На вільній фазі потрібно вимірювати зворотну ЕРС. Напругу можна вимірювати за допомогою АЦП і порівнювати із середньою точкою. АЦП мають час перетворення, що вносить похибку обчислення. Логічніше використовувати компаратори. Адже не обов'язково знати значення напруги. Важливо визначити сам момент переходу через середню точку. Компаратор спрацьовує саме в момент переходу напруги через середню точку і може генерувати переривання мікроконтролера. Розглянемо часову діаграму, що наведена на рис. 5.

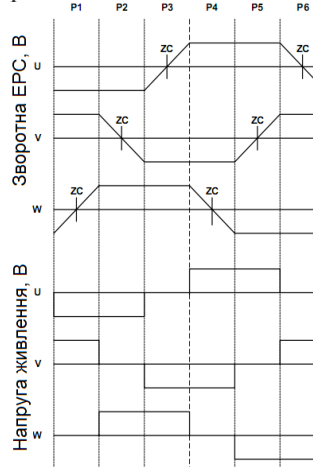


Рис. 5. Часова діаграма комутацій

На першому етапі P1 на фазу V подається “+”, “-” – на фазу U. При цьому зворотна ЕРС на фазі W починає рости й у середині періоду P1 перетинає нульову точку – половину напруги між фазами V і U, тобто половину напруги живлення. Як видно з діаграми (дивись рис. 5), зміну стану ключів потрібно виконати на половині періоду між подією перетинання нульової крапки (ZC).

Після перемикаання стану ключів (етап P2) виміри виконуються на вільній фазі V. Важливо пам'ятати, що зворотна ЕРС на вільній фазі може зростати або знижатись, що приходить враховувати при роботі компараторів.

Таким чином, регулятор повинен пам'ятати, на якому кроці від P1 до P6 перебуває, і переходити до наступного стану, виходячи з розрахунків часу, обчислених між подіями ЗС.

У Таблиці 4 наведено відповідності стану ключів та вільних фаз для кожного з 6 положень ротора.

Таблиця 4. Відповідності стану ключів та вільних фаз для кожного з 6 положень ротора

Етапи керування	Живлення -	Живлення +	Відкриті ключі	Вимірювання на фазі
P1	V	U	SW1, SW5	W↑
P2	W	U	SW3, SW5	V↓
P3	W	V	SW3, SW4	U↑
P4	U	V	SW2, SW4	W↓
P5	U	W	SW2, SW6	V↑
P6	V	W	SW1, SW6	U↓

Проведемо вибір частоти ШІМ. Найчастіше у приводах визначення положення ротора, вимірювання струму, напруги тощо синхронізують із сигналом ШІМ. Тобто у певні моменти з періодичністю, яка залежить від частоти ШІМ сигналу.

Припустимо ситуацію, коли частота ШІМ 8 кГц, шпаруватість 100 % (повний газ), двигун обертається зі швидкістю, при якій частота комутацій теж дорівнює 8 кГц. Тобто. від моменту перемикаання ключів до наступного перемикаання проходить рівно один період ШІМ сигналу. Якщо швидкість обертання зростає і частота комутацій перевищить частоту ШІМ, виникне ситуація, коли ШІМ сигнал буде утримувати ключі відкритими довше необхідного і протидіяти обертанню двигуна. Крім того, вимірювання напруги на вільній фазі синхронізовані частотою ШІМ сигналу, тому немає технічної можливості обчислити швидкість комутації вище частоти ШІМ. Тобто контролер теоретично не зможе керувати двигуном, якщо той обертається зі швидкістю, при якій частота комутацій перевищує частоту ШІМ сигналу. Це лише теоретичні розрахунки. Насправді, бажано, щоб частота ШІМ у кілька разів перевищувала частоту комутацій.

Максимальна теоретично можлива частота обертання валу двигуна буде, об./хв.:

$$\omega = \frac{f/6}{N/2} \cdot 60, \quad (1)$$

де f – частота ШІМ, Гц; 6 – кількість комутацій за один електричний оборот; N – кількість магнітів; $N/2$ – кількість пар магнітів; 60 – кількість секунд за хв.

Якщо маємо регулятор із частотою ШІМ 8 кГц, і двигун із 14 магнітами, то $\omega=11428$ об./хв. Якщо двигун має 28 магнітів, то $\omega=5714$ об./хв. Тобто, якщо потрібно керувати багатополосним двигуном на високих оборотах, доведеться використовувати регулятор із вищою частотою ШІМ. Наприклад, щоб розкрутити двигун з 24 магнітами до 10000 об./хв знадобиться регулятор із частотою ШІМ не нижче 24 кГц. Потрібно також пам'ятати, що чим вища частота ШІМ, тим більше перехідних процесів відбувається на ключах за одиницю часу. Це може призвести до збільшення втрат і збільшення тепловиділення на ключах.

Для електроприводу легкого ЕТЗ вибираємо мотор-колеса на 10 дюймів, які зроблені з урахуванням новітніх вимог і стандартів якості. Вони є зносостійкими, що призведе до тривалого використання. В легкому електричному транспортному засобі будуть тяговими два задні мотор-колеса. Вони мають однакові характеристики та дадуть змогу посилити потужність транспортного засобу.

Вибір та обґрунтування мотор-колес для електроприводу легкого електричного транспортного засобу обумовлений наступними вимогами:

- універсальність та можливість швидкої заміни при необхідності;
- легкий монтаж та ремонтпридатність;
- добра керованість на всьому діапазоні швидкостей;
- велика потужність та високий ККД;
- зносостійкість, довговічність та великий термін служби;
- працездатність з датчиками Холла та без них;
- для виготовлення використовуються якісні матеріали, наприклад, мідна обмотка в 4 жили.

На рис. 6 наведено мотор-колеса в розібраному та зібраному стані, які використовуються для електроприводу легкого ЕТЗ. Основні характеристики мотор-колеса:

- діаметр колеса: 10 дюймів;
- напруга живлення: від 36 В до 48 В;

- номінальна потужність: 350 Вт.

Для керування тягового електропривода обираємо контролери, що спеціально розроблені для мотор-колів потужністю 350 Вт, напруга живлення від 36 В до 48 В, струм 18 А.



Рис. 6. Фото мотор-колів для електроприводу

Такі системи керування призначені для використання в різних легких ЕТЗ, таких як: електровелосипеди, триколісні електровелосипеди, електроскутери, електросамокати, гіроскутери тощо.

На рис. 7 наведено контролери для мотор-колів.



Рис. 7. Фото контролерів для мотор-колів

Основні технічні характеристики контролера:

- напруга живлення: від 36 В до 48 В;
- номінальна потужність: 350 Вт;
- максимальний струм: 18 А;
- під'єднання до двигуна (3 фази);
- під'єднання до вимірювальних приладів (діагностична лінія);
 - під'єднання до LCD-дисплея;
 - під'єднання до ручки газу (дросельна лінія);
 - під'єднання до датчиків (Холла тощо);
 - під'єднання до акумуляторної батареї.

Основні функціональні можливості контролера:

- круїз-контроль;
- рекуперативне гальмування;
- елементи штучного інтелекту (самонавчання);
- протиугінна сигналізація (протиугінна силова лінія та електрична лінія блокування).

Для живлення тягового електропривода легкого ЕТЗ раціонально використовувати літій-іонні акумуляторні батареї. Тому нами обрані акумуляторні батареї, які використовуються у електромобілях Nissan Leaf. В Nissan Leaf, як і в багатьох інших ЕТЗ (Chevrolet Volt, BMW i3, тощо) використовується комбіновані типи акумуляторних батарей, а саме: літій-марганцевого типу LiMn_2O_4 та літій-нікель-марганець-кобальтовими LiNiMnCoO_2 типу. Така комбінація хімічних елементів використовує позитивні якості обох систем за рахунок чого підвищується питома енергоємність і термін служби акумуляторів. Акумулятори літій-марганцевого типу забезпечують високу потужність, тобто високі прискорювальні можливості ЕТЗ, а літій-нікель-марганець-кобальтова частина акумуляторної батареї відповідає за енергоємність та відповідно за дальність автономного пробігу.

Для джерела живлення легкого ЕТЗ раціонально застосовувати модулі від акумуляторної батареї електромобілів, які вже втратили 20 % своєї початкової ємності (згідно стандарту ISO 12405-4:2018 [24]) та більше не використовуються для приводу електромобілів. Тому, для живлення електропривода легкого ЕТЗ нами обрані модулі від акумуляторної батареї електромобіля Nissan Leaf 2015 р. випуску. Оригінальна акумуляторна батарея має початкову ємність 24 кВт·год та складається з 48 модулів.

На рис. 8 наведені фото такого модуля акумуляторів.



Рис. 8. Фото модуля від акумуляторної батареї Nissan Leaf

Основні характеристики модуля акумуляторів: напруга 7,6 В, енергетична ємність 66,2 А·год., довжина – 303 мм, ширина – 223 мм, товщина – 35 мм, вага – 3,8 кг.

Залишкова ємність знятої з експлуатації акумуляторної батареї складає 77,95 % за програмою Leaf Spy Pro. Програма Leaf Spy Pro дозволяє контролювати акумуляторну батарею та іншу інформацію про електромобіль Nissan Leaf за допомогою Bluetooth-адаптера ELM327 OBDII та будь-якого пристрою з Android із підтримкою Bluetooth. Зведена інформація надає всі відповідні дані про акумуляторну батарею, такі як напруга, енергоємність, стан заряду *SoC* та стан працездатності *SoH* акумуляторної батареї, відстань, яку пройшов електромобіль, тощо.

Деякі параметри знятої з експлуатації акумуляторної батареї Nissan Leaf 2015 р. наведені в Таблиці 5. Для подальшого розрахунку з Таблиці 5 визначимо, що стан працездатності *SoH* (тобто відношення поточної ємності до початкової ємності) акумуляторної батареї становить 77,95 %, тобто, є нижчим 80 %, а остаточно енергоємність складає 18,7 кВт·год.

Таблиця 5. Параметри акумуляторної батареї електромобіля Nissan Leaf 2015 р.

Параметри батареї	Стан батареї
Напруга, В	370,42
Ємність, А·год.	50,5
Стан заряду (<i>SoC</i>), %	54,3
Стан працездатності (<i>SoH</i>), %	77,95
R_x – величина внутрішній провідності батареї від номінального значення нового акумулятора, %	57,07
Одометр, милі	62 314

У дослідженні [25] проведений опис швидкої оцінки ємності знятих з експлуатації модулів акумуляторів електромобілів за допомогою тесту на частковий розряд. Для дослідження використано 48 літій-іонних модулів від знятої з експлуатації батареї Nissan Leaf на 24 кВт·год.

Результати експерименту показують, що запропонований метод здатний оцінити повну енергоємність з максимальною похибкою 5 %. Крім того, досягається значне скорочення часу тестування, оскільки використовуються лише напруга на клеммах і струм розряду, що має велике практичне значення для галузі переробки батарей, де домінують вартість і час.

Модель електрична еквівалентної схеми акумулятора, що наведена на рис. 9, демонструє його загальну структуру [25].

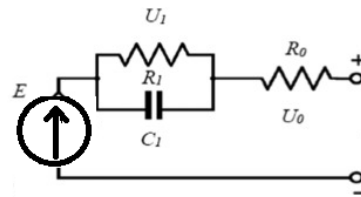


Рис. 9. Модель електрична еквівалентної схеми акумулятора

На рис. 10 показаний типовий графік часткового розряду модуля акумуляторів електромобіля Nissan Leaf, коли постійний імпульсний розряд застосовується протягом декількох хв. [25].

Оцінка номінальної ємності модуля акумуляторів за допомогою процедури часткового розряду можна визначити за допомогою рівняння:

$$Q = \frac{\int_{t_0}^t i(t) dt}{SoC(t_0) - SoC(t)}, \quad (2)$$

де $SoC(t)$ – стан заряду модуля акумуляторів в час t , %; $SoC(t_0)$ – початковий стан заряду модуля акумуляторів в час t_0 , %; $i(t)$ – розрядний струм, як правило, постійний імпульсний, А; Q – номінальна ємність модуля акумуляторів, А·год.

Проведемо розрахунок основних характеристик джерела живлення електропривода легкого ЕТЗ, яке зібрано з модулів акумуляторів від знятої з експлуатації акумуляторної батареї Nissan Leaf на 24 кВт·год.

Енергетична ємність одного модуля акумуляторів, кВт·год.:

$$Q_1 = \frac{Q_{LEAF} \cdot SoH}{N \cdot 100\%}, \quad (3)$$

де Q_1 – енергетична ємність одного модуля акумуляторів, кВт·год.; Q_{LEAF} – повна початкова енергетична ємність акумуляторної батареї Nissan Leaf, що дорівнює 24 кВт·год.; SoH – стан працездатності знятої з експлуатації акумуляторної батареї Nissan Leaf з Таблиці 5 становить 77,95 %; N – кількість модулів в акумуляторної батареї, $N=48$ шт.

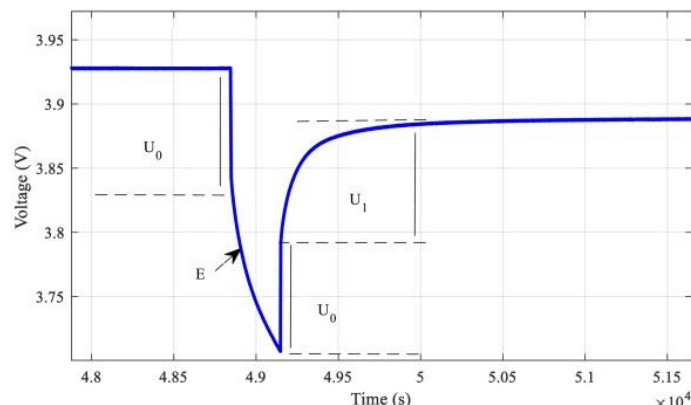


Рис. 10. Типовий графік часткового розряду модуля акумуляторів Nissan Leaf

В результаті розрахунку визначено, що енергетична ємність одного модуля акумуляторів дорівнює 0,3898 кВт·год. Для отримання напруги живлення електропривода 48 В достатньо підключити послідовно 6 модулів.

Повна енергетична ємність акумуляторної батареї легкого ЕТЗ буде складати $Q=6 \cdot Q_1=2,3388$ кВт·год. З урахуванням того, що оптимальна глибина розряду знятих з експлуатації літій-іонних акумуляторів складає приблизно 20 %, то реальна можлива використана ємність не перевищує 1,871 кВт·год. З урахуванням того, що розроблений електропривод для триколісного електричного велосипеда (рис. 11) для подолання 1 км в перехідних режимах (розгін – гальмування), по пересічній місцевості (підйом – спуск) та в різних дорожніх умовах (асфальт, сільські дороги, стежки) споживає в середньому 25 Вт·год., можна розрахувати дальність поїздки на одному заряді акумуляторної батареї, яка буде складати близько 75 км.

Таким чином, повторне використання акумуляторних батарей з електромобілів, які втратили 20 % своєї початкової ємності, для живлення електропривода легких ЕТЗ є раціональним та обґрунтованим. Причому, деградація акумуляторної батареї, що встановлена на електричний велосипед, буде проходити не так інтенсивно, як це було на електромобілі, у зв'язку з невисоким навантаженням.



Рис. 11. Триколісний легкий персональний електричний транспортних засіб

Висновки

За результатами дослідження можна дійти до висновку, що з метою підвищення інклюзивної мобільності та екологічної чистоти проведена розробка електропривода для легкого персонального електричного транспортного засобу на базі триколісного велосипеда.

Визначена актуальність дослідження та проведено дослідження сучасних систем електропривода легких персональних ЕТЗ, таких як електрична допоміжна система для велосипеда Valeo Smart e-bike System та система Bosch Smart System.

При розробці тягового електропривода для легкого персонального ЕТЗ створена функціональна схема електропривода, проведено дослідження системи керування бездатчиковим безколекторним тяговим двигуном, проведено дослідження електричної принципової схеми при підключенні тягового електричного двигуна.

Для тягового електропривода триколісного транспортного засобу обрано два мотор-колеса номінальною потужністю кожного 350 Вт, напругою живлення від 36 В до 48 В, діаметром колеса 10 дюймів. Для керування обраний контролер, який спеціально розроблений для мотор-колес потужністю 350 Вт, напруга живлення від 36 В до 48 В, струм 18 А.

Для живлення електричного двигуна обґрунтований вибір 6 послідовно з'єднаних акумуляторних модулів від електромобіля Nissan Leaf загальною напругою 48 В. Енергетична ємність одного модуля зі станом працездатності акумуляторної батареї електромобіля Nissan Leaf 77,95 % складає 0,3898 кВт·год. Повна енергетична ємність акумуляторної батареї легкого персонального ЕТЗ складає 2,3388 кВт·год, але реальна використана ємність не перевищує

1,871 кВт·год. Дальність поїздки на одному заряді акумуляторної батареї складає приблизно 75 км. Такий результат демонструє раціональність повторного використання акумуляторних батарей з електромобілів, які втратили 20 % своєї початкової ємності, для живлення електропривода легких ЕТЗ.

Подяка

Ця робота проводилась у рамках науково-дослідної роботи «Розробка енергоефективних та високоманеврених багатовісних автомобілів подвійного призначення для Збройних Сил України», державний реєстраційний номер: 0123U101766, що фінансується Міністерством освіти і науки України.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

- Electric Bike Market Growth & Trends | Industry Analysis [2030]. (2023). Fortune Business Insights™ | Global Market Research Reports & Consulting. <https://www.fortunebusinessinsights.com/electric-e-bike-market-102022>
- Mina, G., Bonadonna, A., Peira, G., & Beltramo, R. (2024). How to improve the attractiveness of e-bikes for consumers: Insights from a systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 140957. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140957>
- Cai, J., Zhao, Z., Zhou, Z., & Wang, Y. (2024). Predicting the carbon emission reduction potential of shared electric bicycle travel. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 129, 104107. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104107>
- Hung, N. B., & Lim, O. (2020). A review of history, development, design and research of electric bicycles. *Applied Energy*, 260, 114323. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114323>
- Julio, R., & Monzon, A. (2022). Long term assessment of a successful e-bike-sharing system. Key drivers and impact on travel behaviour. *Case Studies on Transport Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.04.019>
- Alarcón, F. E., Cawley, A. M., & Sauma, E. (2023). Electric mobility toward sustainable cities and road-freight logistics: A systematic review and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, 138959. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138959>
- Hung, N. B., Sung, J., & Lim, O. (2018). A simulation and experimental study of operating performance of an electric bicycle integrated with a semi-automatic transmission. *Applied Energy*, 221, 319–333. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.195>
- Khan, F. M. N. U., Rasul, M. G., Sayem, A. S. M., & Mandal, N. (2023). Maximizing energy density of lithium-ion batteries for electric vehicles: A critical review. *Energy Reports*, 9, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.08.069>
- Смирнов, О., Борисенко, А. (2023). Порівняльний аналіз електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (24), 50–61. <https://doi.org/10.30977/veit.2023.24.0.5>
- Smyrnov, O., & Borysenko, A. (2023). Porivnialnyi analiz elektrychnykh modelei litii-ionnykh akumuliatornykh batarei elektromobiliv. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, (24), 50–61. <https://doi.org/10.30977/veit.2023.24.0.5>
- Barcelona, S., & Piegari, L. (2017). Lithium Ion Battery Models and Parameter Identification Techniques. *Energies*, 10(12), 2007. <https://doi.org/10.3390/en10122007>
- Urquiza, J., & Singh, P. (2023). A review of health estimation methods for Lithium-ion batteries in Electric Vehicles and their relevance for Battery Energy Storage Systems. *Journal of Energy Storage*, 73, 109194. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109194>
- Jiang, Z., Li, J., Li, L., & Gu, J. (2022). Fractional modeling and parameter identification of lithium-ion battery. *Ionics*. <https://doi.org/10.1007/s11581-022-04658-5>
- Xiong, R. (2020). *Battery Management Algorithm for Electric Vehicles*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0248-4>
- Yang, Z., Patil, D., & Fahimi, B. (2019). Electrothermal Modeling of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(1), 170–179. <https://doi.org/10.1109/tvt.2018.2880138>
- Xie, Y., Li, W., Hu, X., Zou, C., Feng, F., & Tang, X. (2020). Novel Mesoscale Electrothermal Modeling for Lithium-Ion Batteries. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(3), 2595–2614. <https://doi.org/10.1109/tpe.2019.2927014>
- Saldana, G., Martin, J. I. S., Zamora, I., Asensio, F. J., Onederra, O., & Gonzalez, M. (2020). Empirical Electrical and Degradation Model for Electric Vehicle Batteries. *IEEE Access*, 8, 155576–155589. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3019477>
- Perez, H. E., Hu, X., Dey, S., & Moura, S. J. (2017). Optimal Charging of Li-Ion Batteries With Coupled Electro-Thermal-Aging Dynamics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(9), 7761–7770. <https://doi.org/10.1109/tvt.2017.2676044>
- Kumar, R., Pachauri, R. K., Badoni, P., Bhadrwaj, D., Mittal, U., & Bisht, A. (2022). Investigation on parallel hybrid electric bicycle along with issuer management system for mountainous region. *Journal of Cleaner Production*, 132430. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132430>
- Smart e-Bike System. (2022). Effigear. <https://www.effigear.com/en/content/24-smart-e-bike-system>
- Valeo 2BCXA-VIEWPLUS Cyclee System In-

- struction Manual. (2022). <https://device.report/manual/10651994>
21. Bosch to expand smart system in a big way for the 2023 season. (2022). E-Bike Blog. <https://www.ebike24.com/blog/ebike-bosch-novelties-2023>
 22. Bosch e-bike motors - revolutionize your ride! (2024). Trek Bikes - Die besten Bikes und das hochwertigste Zubehör der Welt - Trek Bikes (DE). https://www.trekbikes.com/us/en_US/bosch/
 23. The Bosch Smart System for Tern Bikes | Tern Bicycles. (2024). Tern Bicycles | Electric Bikes, Cargo eBikes and Folding Bikes. <https://www.ternbicycles.com/en/explore/choosing-bike/bosch-smart-system-tern-bikes>
 24. Electrically propelled road vehicles —Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems – Part 4: Performance testing (ISO 12405-4:2018). (2018). <https://www.iso.org/standard/55854.html>
 25. Ahmeid, M., Muhammad, M., Lambert, S., Attidekou, P. S., & Milojevic, Z. (2022). A rapid capacity evaluation of retired electric vehicle battery modules using partial discharge test. *Journal of Energy Storage*, 50, 104562. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104562>

Смирнов Олег Петрович¹, д.т.н., професор кафедри автомобільної електроніки, e-mail: smirnovloleg@gmail.com, тел. +38 068-609-94-58, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-9042>

Борисенко Анна Олегівна¹, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільної електроніки, e-mail: anutochka2111@gmail.com, тел. +38 096-110-69-49, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>

Марченко Данило Олександрович¹, студент групи АЕ-41-20, ae120mdo@stud.khadi.kharkov.ua, тел. +38 099-565-85-49,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Development of an electric drive for personal light electric vehicles

Abstract. Problem. The article addresses the challenge of enhancing inclusive mobility and environmental cleanliness by developing a traction electric drive for personal light electric vehicles. A study was conducted on modern electric drive systems for personal light electric vehicles. **Goal.** The aim is to boost inclusive mobility and environmental cleanliness through the development of a traction electric drive for a personal light electric vehicle, specifically based on a tricycle. **Methodology.** The methodology involves scientific analysis and synthesis of traction electric drives for electric vehicles. An assessment of the nominal capacity of the battery module from the Nissan Leaf electric car was conducted using both partial dis-

charge procedures and the Leaf Spy Pro program. **Results.** Based on an analysis of existing electric drive systems, a traction electric drive for a tricycle was developed. A functional diagram of the electric bicycle drive was generated. A control system for a sensorless brushless motor was developed, determining rotor position by measuring EMF in the free phase. This led to the creation of a stable voltage electrical circuit with a virtual midpoint. The tricycle's electric drive utilizes two 10-inch motor wheels on the rear wheels, enabling high speed and efficiency. Controllers specifically designed for electric wheel motors with a power of 350 W were selected to control the traction electric drive. Modules from the 2015 Nissan Leaf electric car's battery, which had depleted 20% of their capacity, were chosen to power the electric drive. The battery health status is 77.95%. A model of the battery's electrical equivalent circuit was constructed, and partial discharge graphs of the Nissan Leaf battery module were analyzed. **Originality.** The results provide a comprehensive insight into the development of a traction electric drive for personal light electric vehicles, using a tricycle as an example. **Practical value.** The research led to the development of an electric drive for a three-wheeled vehicle, with two motor wheels of 350 W nominal power each. The power supply voltage ranges from 36 V to 48 V, powered by six battery modules from the Nissan Leaf electric car, totaling 48 V. The energy capacity of one battery module is 0.3898 kWh, resulting in a total energy capacity of 2.3388 kWh for the vehicle's battery. However, the realizable capacity does not exceed 1.871 kWh, providing a travel distance of approximately 75 km on one battery charge. These findings demonstrate the feasibility of reusing batteries from electric cars with diminished capacity to power light electric vehicles. The results are relevant for scientific and technical professionals involved in electric vehicle development.

Key words: personal light electric vehicle, electric drive, electric motor, control system, battery, energy intensity, electric bike

Oleh Smyrnov¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 068-60-99-458, smirnovloleg@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-9042>

Anna Borysenko¹, Ph.D., Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department, tel. +38 096-11-06-949, anutochka2111@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>

Danylo Marchenko¹, student of group АЕ-41-20, tel. +38 099-565-85-49, e-mail: ae120mdo@stud.khadi.kharkov.ua

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.