

DOI: 10.30977/VEIT.2024.25.0

ISSN: 2226-9266



АВТОМОБІЛЬ І ЕЛЕКТРОНІКА СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ



**ЕЛЕКТРОННЕ НАУКОВЕ
СПЕЦІАЛІЗОВАНЕ
ВИДАННЯ**

ВИПУСК



ХАРКІВ

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Кафедра автомобільної електроніки

Автомобіль і Електроніка. Сучасні Технології

**Електронне наукове фахове видання
(друкована версія)**

25/2024

**Vehicle and Electronics.
Innovative Technologies**
Electronic scientific professional edition
(printed version)

ISSN: 2226-9266

DOI: 10.30977/VEIT.2024.25.0

Харків 2024

Журнал засновано в 2011 р. кафедрою Автомобільної електроніки, Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

ISSN: 2226-9266

DOI: 10.30977/VEIT.2024.25.0

Випуск сформовано 10.05.2024.

В журналі публікуються матеріали теоретичних та практичних досліджень присвячених перспективним напрямкам розвитку автомобільної електроніки, впровадженню та удосконаленню гібридних автомобілів та електромобілів, моделюванню транспортних процесів і систем, інформаційним технологіям й інтелектуальним системам на транспорті, сучасним технологіям діагностики систем і агрегатів транспортних засобів, а також методичним дослідженням підготовки спеціалістів у сфері транспорту.

Журнал також включає матеріали доповідей учасників Всеукраїнської науково-методичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку вищої освіти в Україні».

Затверджено: Вченою радою університету від 25.03.2011, протокол № 8

Журнал включено до **Переліку електронних наукових фахових видань України, категорія «Б» за спеціальностями – 113, 121, 122, 133, 151, 274, 275**, наказом Міністерства освіти і науки України № 612 від 07.05.2019 та **141, 142**, наказом Міністерства освіти і науки України № 975 від 11.07.2019.

Спеціальності: 113 - Прикладна математика
 121 - Інженерія програмного забезпечення
 122 - Комп'ютерні науки
 133 - Галузеве машинобудування
 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
 274 - Автомобільний транспорт
 275 - Транспортні технології (за видами)
 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 142 - Енергетичне машинобудування

Редакційна колегія

Головний редактор: Дзюбенко Олександр Андрійович, к.т.н., доц.

Заступник головного редактора: Аргун Щасяна Валіковна, д.т.н., проф.

Відповідальний секретар: Трунова Ірина Сергіївна, к.т.н., доц.

Члени редколегії: Абрамчук Ф. І. (д-р техн. наук, проф.), Алексієв О. П. (д-р техн. наук, проф.), Бажин О. В. (д-р техн. наук, проф.), Батигін Ю. В. (д-р техн. наук, проф.), Богаєвський О. Б. (д-р техн. наук, проф.), Богомолів В. О. (д-р техн. наук, проф.), Вдовиченко В. О. (канд. техн. наук, доц.), Волков В. П. (д-р техн. наук, проф.), Воронков О. І. (д-р техн. наук, проф.), Врублевський О. М. (д-р техн. наук, проф.), Гнатів А. В. (д-р техн. наук, проф.), Гурко О. Г. (д-р техн. наук, проф.), Горбачов П. Ф. (д-р техн. наук, проф.), Двадненко В. Я. (д-р техн. наук, проф.), Далека В. Х. (д-р техн. наук, проф.), Клименко В. І. (д-р техн. наук, проф.), Клец Д. М. (д-р техн. наук, проф.), Колодяжний В. М. (д-р фіз.-мат. наук, проф.), Корогодський В. А. (д-р техн. наук, проф.), Мигаль В. Д. (д-р техн. наук, проф.), Михалевич М. Г. (канд. техн. наук, доц.), Наглюк І. С. (д-р техн. наук, проф.), Нагорний Є. В. (д-р техн. наук, проф.), Ніконов О. Я. (д-р техн. наук, проф.), Подригало М. А. (д-р техн. наук, проф.), Полянський О. С. (д-р техн. наук, проф.), Сараєв О. В. (д-р техн. наук, проф.), Смирнов О. П. (д-р техн. наук, проф.), Солодов В. Г. (д-р техн. наук, проф.), Тропіна А. А. (д-р техн. наук, проф.), Чаплигін Є. О. (канд. техн. наук, доц.), Шуклінов С. М. (д-р техн. наук, проф.), Янюгін Є. Г. (д-р техн. наук, проф.)

Адреса редакції: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Автомобільний факультет, Кафедра автомобільної електроніки, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002,

Тел.: (057) 707-36-96;

e-mail: ae.hnadu@gmail.com

Статті друкуються в авторській редакції. Редакція не несе відповідальності за орфографічні, стилістичні чи інші помилки, допущені автором публікації.

ЗМІСТ

ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ І ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

Володимир Двадненко, Олександр Дзюбенко <i>Підвищення ефективності автомобільного генератора за рахунок активного випрямлення.....</i>	6
Станіслав Войтків <i>Аналіз і розроблення критеріїв експлуатаційної ефективності міських електробусів.....</i>	13
Андрій Нечаус <i>Розрахунок параметрів електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком як виконавчого органу автомобільних систем.....</i>	23
Олег Смирнов, Анна Борисенко, Данило Марченко <i>Розробка електропривода для легкого персонального електричного транспортного засобу.....</i>	31

ТРАНСПОРТНА ІНФРАСТРУКТУРА, РОЗВИТОК МЕРЕЖІ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЕКОМОБІЛІВ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ТРАНСПОРТІ

Щасяна Аргун, Андрій Гнатов, Павло Сохін <i>Ефективність енергогенеруючих плиток з різними типами мультиплікаторів.....</i>	42
Руслан Багач <i>Підвищення електромагнітної сумісності і енергоефективності зарядної станції електромобілів.....</i>	53

МОДЕЛЮВАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ В АВТОМОБІЛЕБУДУВАННІ І ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ

Олександр Хрулев, Олексій Сараєв, Ірина Сараєва <i>Метод експертної оцінки технічного стану циліндро-поршневої групи автомобільного двигуна після гідродару.....</i>	63
--	----

CONTENT

WAYS TO IMPROVE THE ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL INDICATORS OF MOTOR VEHICLES. ENERGY SAVING TECHNOLOGIES

Volodymir Dvadnenko, Oleksandr Dziubenko

Increasing the efficiency of the automotive generator due to active rectification.....6

Stanislav Voytkiv

Analysis and development of criteria for the operational efficiency of urban electric buses.....13

Andrii Nechaus

Calculation of the parameters of an axial flux motor as an actuator of automotive systems.....23

Oleh Smyrnov, Anna Borysenko, Danylo Marchenko

Development of an electric drive for personal light electric vehicles.....31

TRANSPORT INFRASTRUCTURE, DEVELOPMENT OF THE NETWORK OF CHARGE STATIONS FOR ECOMOBILE. INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN TRANSPORT

Shchasiana Arhun, Andrii Hnatov, Pavlo Sokhin

Efficiency of energy-generating tiles with different types of multipliers.....42

Ruslan Bahach

*Enhancing electromagnetic compatibility and energy efficiency of electric
vehicle charging stations.....53*

MODELING APPLIED TASKS IN AUTOMOBILE INDUSTRY AND TRANSPORT SYSTEMS

Alexander Khrulev, Olexii Saraiev, Irina Saraieva

*Method for expert evaluation of the technical condition of the cylinder-piston
group of automotive engines after hydrolock.....63*

Підвищення ефективності автомобільного генератора за рахунок активного випрямлення

Двадненко В. Я.¹, Дзюбенко О. А.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. Проведено аналіз електроживлення автомобілів з системи старт-стоп. Розглянуто структуру, функції та режими роботи системи синхронного випрямлення. Проаналізовано вплив синхронного випрямлення на ефективність генератора м'якого гібридного транспортного засобу. Визначено яка з конфігурацій синхронного випрямлення та при яких умовах експлуатації є більш ефективною з точки зору економії енергії. Запропоновано систему мостового синхронного випрямлення для генератора на 48 В, автомобіля з м'якою гібридною силовою установкою. Запропоновано систему синхронного випрямлення для генератора на 12 В виконувати за схемою двонапівперіодного випрямляча із середньою точкою, що дозволяє підвищити енергоефективність та економічність гібридного автомобіля.

Ключові слова: м'який гібридний автомобіль, система старт-стоп, автомобільний генератор, система активного випрямлення, трифазний мостовий випрямляч, синхронний випрямляч.

Вступ

Зростання ринку автомобільної електроніки безпосередньо пов'язане з прискоренням процесу електрифікації автомобіля і в першу чергу з впровадженням енергоємних споживачів нового типу. Провідні автомобільні компанії розпочали серійне виробництво автомобілів з новим стандартом напруги живлення 12/48В (Mild hybrid).

В даний час завершується перша фаза переходу на нову архітектуру електроживлення автомобіля. Вона характеризувалася тим, що нові споживачі та джерела живлення впроваджувалися в електромережу для підвищення економічності, безпеки автомобіля та поліпшення його споживчих властивостей. Новий етап ставить собі за мету реалізацію системного координованого проектування двигуна із системою старт-стоп, рульового управління з електропідсилювачем та електромережі, як для поліпшення характеристик автомобіля, так і для оптимізації системної ціни рішення. Це дозволить окрім задоволення зростаючих вимог щодо мінімізації викидів та підвищення економічності різко знизити темпи зростання ціни автомобіля. У рамках

вирішення цієї проблеми центральне місце, як і раніше, відведено підвищенню ефективності за рахунок низьковольтних напівпровідникових приладів, в першу чергу потужних польових транзисторів MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors).

Характерною корисною особливістю MOSFET-транзисторів є активний характер і дуже мала величина опору каналу стік-витік поблизу нульової напруги, що дозволяє за допомогою напруги затвор-витік керувати опором каналу стік-витік, як для прямої, так і для зворотної полярності напруги прикладеної до цього каналу.

Для зворотної полярності це безумовно справедливо в межах напруг характерних для прямої гілки вольт-амперної характеристики силових діодів автомобільних генераторів. Тому на основі паралельного шунтування силових діодів випрямлячів MOSFET-транзисторами з відповідним керуванням затворами забезпечується підвищення ККД випрямляча. Це відбувається за рахунок зменшення падіння напруги на відкритих діодах трифазного випрямляча. Таке технічне рішення дає тим більший приріст ККД, що

нижче напруга, яка подається на випрямляч. Такі випрямлячі також мають назву синхронні випрямлячі.

Аналіз публікацій

М'які гібридні автомобілі мають стандартну низьку напругу тягового електродвигуна і тягового акумулятора [1]. Більше того, деякі м'які гібридні автомобілі компонуються системою старт-стоп на основі посиленого стартера фірми Бош і мають напругу 12 В. Тому автори вважають актуальним підвищення ефективності випрямлячів для гібридних м'яких автомобілів.

В даний час трифазні генератори стали гальмом розвитку автомобільної електромережі та гальмом впровадження у неї нових енергоємних споживачів. Зростання потужності споживачів стримується зростанням втрат у вузлах випрямлячів, реалізованих на діодах [2], які до того є основним джерелом несправності [3]. Внаслідок цього у ряді випадків провідні виробники генераторів змушені використовувати водяне охолодження, але і при цьому не вдається реалізувати потужність генератора більше 2,2 кВт. Підвищені втрати крім обмеження потужності в електромережі опосередковано впливають і на зростання споживання палива.

Враховуючи попит на автомобілі з покращеною екологією, ринок спонукає автомобільні бренди, особливо в Європейському Союзі, Китаї та США, а також їхніх постачальників розробляти ключові компоненти електричних систем для мікрогібридів із напругою 12 В (старт-стоп) та м'яких гібридних автомобілів з бортовою мережею на 48 В. в роботі [4] представлено різні варіанти реалізації таких систем.

Одним з методів оптимізації автомобільного генератора є використання більш сучасних електронних перетворювачів [5]. В роботах [6,7] розглянуто синхронний автомобільний випрямляч, що складається з потужних MOSFET-транзисторів і драйверів затворів, що був розроблений для заміни традиційних випрямляючих діодів з метою підвищення ефективності перетворення змінного струму в постійний. Потім модулі синхронного випрямляча були інтегровані в систему генератора змінного струму, після чого ефективність перетворення змінного струму в постійний склала 97 %, а ККД генератора змінного струму склала 78 %. Синхронний ви-

прямляч пройшов випробування на надійність автомобільного рівня, включаючи випробування на циклічну зміну температури (ТСТ), випробування на навантаження прискоренням (HAST), високотемпературне зворотне зміщення (HTRB) та випробування на циклічне живлення (PCT) відповідно до стандарту AEC-Q101 має бути адаптованим для автомобілів з системою старт-стоп 12 В та системою стартер-генератор з ременем-генератором (BSG) 48 В.

В роботі [8] представлений новий блок управління затвором для силових МОП-транзисторів, який особливо підходить для синхронних випрямлячів в автомобільних мережах 12 В для заміни неефективних кремнієвих діодів. На відміну від відомих блоків керування такими синхронними випрямлячами, заснованих на схемах компаратора або зовнішнього керування синхронізацією, запропонована схема недорога і малочутлива, оскільки складається тільки з одного операційного підсилювача та кількох пасивних компонентів на кожному МОП-транзистор. Вимірювання, проведені на прототипі синхронного випрямляча, підключеного до стандартного генератора легкового автомобіля, показали значне збільшення ефективності випрямлення, а також вищий вихідний струм генератора в порівнянні зі стандартним діодним випрямлячем. Цей синхронний випрямляч працює при струмах навантаження до 120 А та максимальній частоті обертання генератора до 15000 об/хв. Описано всю схему приводу затвора з наданням інформації про бажані властивості її компонентів. Докладно пояснено процеси перемикання представленої схеми, а також параметри, що визначають її працездатність.

Зняти ці обмеження дозволяє генератор з активним випрямленням напруги [7-9]. Вперше пристрій цього типу був застосований в автомобілі представницького класу Майбах компанії Daimler/Chrysler. На замовлення компанії Delphi компанія International Rectifier розробила перший у світі пристрій, який отримав назву AIRR (активний інтегрований регулятор напруги), що об'єднав у собі функції активного випрямляча і регулятора напруги. Силовий інвертор пристрою реалізований на низьковольтичних МОП-транзисторах нового покоління компанії IR.

Різке зниження втрат у вузлі випрямляча забезпечило підвищення струму генератора більш ніж 25 %. При порівняно компактних

розмірах він розвиває струм 350 А на частоті 6000 об/хв, а при середній частоті – 200 А при максимальній температурі навколишнього середовища, і піковий струм 500 А протягом 20 с. Пристрій було реалізовано у вигляді блоку, що розташовується на корпусі генератора.

Генератори з активним випрямленням напруги повинні перекривати діапазон струмів стандартних генераторів (80...150 А) і струмів генераторів для мережі 14/42 В. Їх використання дозволить підняти енергоефективність електромережі до 5 кВт і зніме обмеження на впровадження нових енергоємних споживачів.

З метою підвищення коефіцієнта корисної дії перетворювачів змінного струму в постійний струм, розроблені та знаходять практичне застосування активні випрямлячі [5-9].

Мета та постановка задачі

Метою роботи є покращення економічних та екологічних характеристик м'якого гібридного автомобіля за рахунок застосування синхронного випрямляча в генераторі а також за рахунок двонапівперіодного випрямляча із середньою точкою.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі: проаналізува-

ти структуру, функції та режими роботи системи синхронного випрямлення; проаналізувати вплив синхронного випрямлення на ефективність генератора м'якого гібридного ТЗ; визначити найбільш ефективну конфігурацію синхронного випрямлення, з точки зору економії енергії; за-пропонувати рішення системи мостового синхронного випрямлення для генератора на 12 В та 48 В м'якого гібридного автомобіля.

Трифазний мостовий активний випрямляч

Активні випрямлячі напруги дозволяють зменшити втрати електричної енергії на прямій гілці випрямляючих діодів шляхом шунтування їх MOSFET-транзисторами з відповідним керуванням. Активні випрямлячі, що працюють в такому режимі, називаються синхронними випрямлячами, тому що транзистори відкриваються одночасно з діодами. При цьому слід зазначити, що окремі діоди не потрібні, оскільки потужні MOSFET транзистори мають вбудований антипаралельний діод, розрахований на такий же струм, як і сам транзистор.

На рис. 1 наведено схему трифазного мостового активного випрямляча

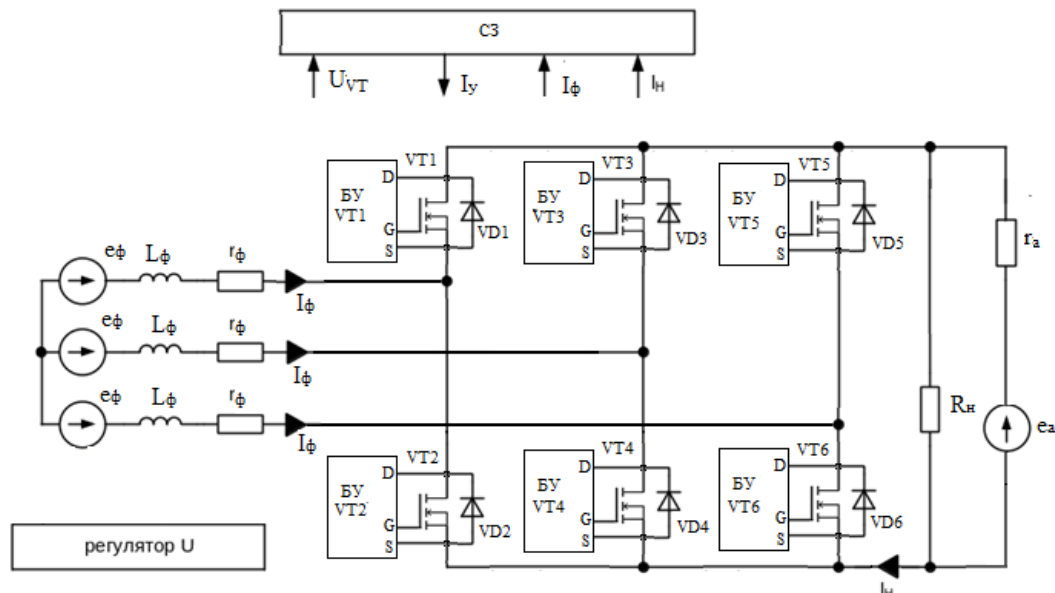


Рис. 1. Схема трифазного мостового активного випрямляча

На схемі використано позначення: БУ – блок управління; VT – MOSFET-транзистори; VD – антипаралельні діоди; СЗ – система захисту; e_ϕ , L_ϕ , r_ϕ , I_ϕ – ЕРС, індуктивність, опір і струм фази відповідно;

R_H – опір навантаження; e_a – ЕРС акумулятора, r_a – внутрішній опір акумулятора; I_H – струм навантаження; U_y – напруга стік-витік MOSFET-транзисторів; регулятор U – регулятор напруги генератора.

Для мостового синхронного випрямляча (рис. 1) як VT і VD можна застосувати MOSFET-транзистори IRFP4468PBF [10]. Блок управління синхронного випрямляча доцільно збирати на основі спеціалізованих мікросхем, таких як IR11672AS, APR343, APR348 [11,12]. Наприклад, для мостового синхронного випрямляча (рис.1) можна застосувати мікросхему IR11672AS, підключення якої для верхнього ключа мостової схеми показано на рис. 2.

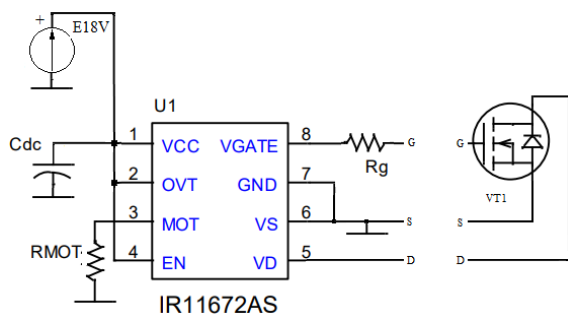


Рис. 2. Підключення IR11672AS для верхнього ключа мостової схеми

Для кожного верхнього ключа необхідний окремий, повністю гальванічно розв'язаний малопотужний джерело живлення з достатньою напругою для відкриття ключового транзистора, на рис. 2 він позначений як E18V. Конденсатор C_{dc} потрібен для блокування джерела живлення мікросхеми, номінував його кілька мікрофарад. Резистор R_g це резистор для обмеження струму затвора, значення його не критично, тому що транзистор відкривається при низькій напрузі стік-витік, зазвичай його беруть з номіналом одиниці Ом. Номінал резистора R_{MOT} впливає на мінімальний час відкритого стану транзистора що потрібно для підвищення завадозахищеності схеми. Його номінал підбирати треба під конкретний транзистор, конкретний генератор та конкретний автомобіль.

Для трьох нижніх ключів потрібне загальне малопотужне джерело живлення з мінусом на корпусі автомобіля. Напруга джерела має бути достатньою для відкриття ключового транзистора. на рис. 3 використано нульовий вивід моста генератора, що підходить для генератора на 48 В, для генератора на 12 В потрібно використовувати плюс бортової мережі 12 В. Призначення інших деталей таке ж, як і для верхніх ключів.

Розрахуємо, наскільки зменшаться втрати на ключах у разі застосування мостового синхронного випрямляча з транзисторами

IRFP4468PBF та мікросхемами IR11672AS.

Розглянемо наскільки підвищується ефективність випрямляча в генераторі на 12 В м'якого гібридного автомобіля з системою старт-стоп на основі посиленого стартера фірми Бош (конфігурація P0).

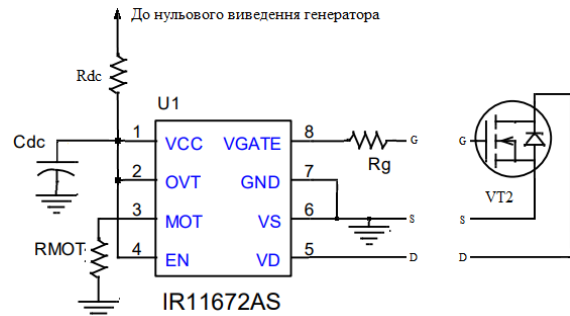


Рис. 3. Підключення IR11672AS для нижнього ключа мостової схеми

Як впливає із даних на діод у транзисторі IRFP4468PBF на ньому при струмі 180 А падає напруга 1,3 В [10]. Приблизно така напруга при такому струмі падає на діодах хороших сучасних генераторів (без синхронного випрямлення). Отже на постійному струмі 180 А діоді розсіюється потужність $180 \cdot 1,3 = 234$ Вт. Якщо мостовий випрямляч генератора видає струм 180 А (потужність генератора близько 2 кВт), то всіх діодах виділяється потужність на нагрівання $234 \cdot 2 / 3 = 156$ Вт. Це тому, що в мосту струм завжди йде через два діоди і чергуються за часом три такі пари. При синхронному випрямленні канал MOSFET підключається паралельно діоду на час, коли він пропускає струм, опір каналу стік-витік низький і практично весь струм йде через цей канал. Опір каналу стік-витік для IRFP4468PBF дорівнює 2 мОм, тому на ньому при постійному струмі падає $180 \cdot 0,002 = 0,36$ В і виділяється потужність $180 \cdot 0,36 = 64,8$ Вт. На всіх діодах випрямляча виділяється потужність нагрівання $64,8 \cdot 2/3 = 43,2$ Вт. Таким чином, більш ніж утричі зменшується нагрівання діодів.

Підвищення ККД генератора з двонапівперіодним випрямлячем із середньою точкою за рахунок активного випрямлення

Розглянемо можливість подальшого підвищення ефективності випрямляча у генераторі м'якого гібридного автомобіля. Порівняємо втрати в мостовому випрямлячі із втратами у двонапівперіодному випрямлячі із середньою точкою (рис. 4).

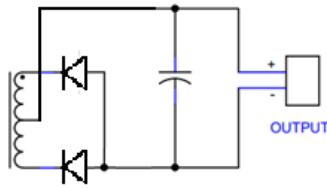


Рис. 4. Двонапівперіодний випрямляч із середньою точкою

Розглянемо це порівняння на прикладі однієї фази. Струм від генератора в двонапівперіодному випрямлячі із середньою точкою з випрямлячем буде:

$$I(t) = \frac{U(t) - U_d(t)}{R_H + r}, \quad (1)$$

де $U(t)$ – напруга генератора; $U_d(t)$ – напруга на відкритому діоді; R_H – опір навантаження генератора; r – опір обмотки генератора.

Струм від генератора в мостовому випрямлячі буде:

$$I(t) = \frac{U(t) - 2U_d(t)}{R_H + r}. \quad (2)$$

Врахуємо, що половину періоду в однофазному мосту струм є лише у двох діодах, а в другу половину періоду в мосту струм буде у двох інших діодах. Втрати на нагрівання чотирьох діодів мостового випрямляча за період тоді становитимуть:

$$\begin{aligned} P &= 2 \int_0^{\frac{T}{2}} \dot{I}_d(t) \dot{U}_d(t) dt + 2 \int_{\frac{T}{2}}^T \dot{I}_d(t) \dot{U}_d(t) dt = \\ &= 2 \int_0^T \dot{I}_d(t) \dot{U}_d(t) dt. \end{aligned}$$

Втрати на нагрівання двох діодів у двонапівперіодному випрямлячі із середньою точкою за період становитимуть:

$$\begin{aligned} P &= \int_0^{\frac{T}{2}} \dot{I}_d(t) \dot{U}_d(t) dt + \int_{\frac{T}{2}}^T \dot{I}_d(t) \dot{U}_d(t) dt = \\ &= \int_0^T \dot{I}_d(t) \dot{U}_d(t) dt. \end{aligned}$$

У цьому випадку враховано, що половину періоду в двонапівперіодному випрямлячі із

середньою точкою струм є тільки в одному діоді, а в другу половину періоду в мосту струм буде в іншому діоді. Отже, у двонапівперіодному випрямлячі із середньою точкою втрати на діодах у два рази менше.

У сучасних генераторах фазні обмотки мотають зазвичай джгутом, що складається з декількох ізольованих провідників. Якщо джгут складається з парного числа провідників, його можна розділити на два і тоді матимемо дві обмотки для цієї фази, або, якщо з'єднати початок однієї обмотки з кінцем іншої обмотки, отримаємо одну фазну обмотку з середньою точкою. Зробимо це для всіх трьох фаз. Тоді для кожної фази маємо обмотку, в якій опір між середньою точкою і будь-яким іншим висновком має опір $2r$ через менший у 2 рази переріз, так як у 2 рази менше число провідників.

Спочатку порахуємо енергію за період, що витрачається на нагрівання провідників з мостовим випрямлячем, підсумовуючи енергію нагріву від позитивної та негативної напівхвиль.

$$\begin{aligned} P &= r \int_0^{\frac{T}{2}} \dot{I}^2(t)(t) dt + r \int_{\frac{T}{2}}^T \dot{I}^2(t)(t) dt = \\ &= r \int_0^T \dot{I}^2(t)(t) dt. \end{aligned}$$

Порахуємо тепер енергію за період, що витрачається на нагрівання провідників фазної обмотки двонапівперіодного випрямляча із середньою точкою, підсумовуючи енергію нагріву від позитивної та негативної напівхвиль.

$$\begin{aligned} P &= \frac{2r}{2} \int_0^{\frac{T}{2}} \dot{I}^2(t)(t) dt + \frac{2r}{2} \int_{\frac{T}{2}}^T \dot{I}^2(t)(t) dt = \\ &= r \int_0^T \dot{I}^2(t)(t) dt. \end{aligned}$$

У чисельнику коефіцієнта перед інтегралом 2 тому, що в 2 рази менше провідників напівобмотці. У знаменнику 2 тому, що в першому та другому напівперіодах (позитивному та негативному напівперіодах) струм тече по різних напівобмотках, отже, за період сума енергії нагріву в кожній напівобмотці буде в 2 рази менше. Таким чином маємо од-

накове нагрівання фазних обмоток і в 2 рази менші втрати на діодах у двонапівперіодному випрямлячі із середньою точкою порівняно з мостовим випрямлячем. Однак конструкція генератора для двонапівперіодного випрямляча з середньою точкою трохи складніше, так як генератор має ту ж обмотку, але по три виводи на фазу. Кожна фаза має синхронний випрямляч, виходи яких з'єднані паралельно (з урахуванням полярності), тобто. для трифазного випрямляча потрібно три такі схеми.

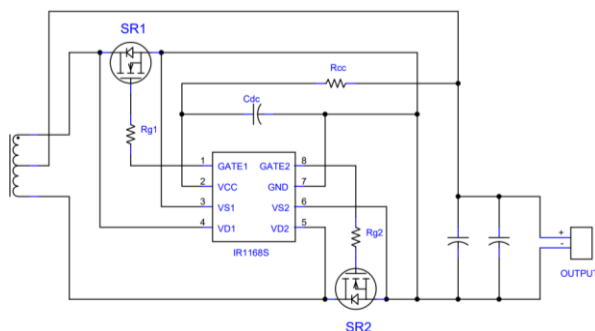


Рис. 5. Фазний випрямляч, зібраний за схемою двонапівперіодного випрямляча із середньою точкою

Кожна фаза має синхронний випрямляч, зібраний за схемою двонапівперіодного випрямляча із середньою точкою. Схему наведено на рис.5. У цьому синхронному випрямлячі вигідніше застосовувати мікросхему IR1168S, оскільки вона керує відразу двома транзисторами і їй не потрібні окремі ізолювані джерела живлення. Детальний опис, технічні характеристики та особливості розробки схем на інтегральній схемі IR1168S наведено у роботах [13,14].

Висновки

Проведено аналіз існуючої інформації про електропостачання автомобілів з системами старт-стоп. Розглянуто структуру, функції та режими роботи системи синхронного випрямлення.

Проаналізовано вплив синхронного випрямлення на ефективність генератора м'якого гібридного транспортного засобу. Визначено яка з конфігурацій синхронного випрямлення та при яких умовах експлуатації є більш ефективною з точки зору економії енергії.

Запропоновано варіант системи мостового синхронного випрямлення для генератора на 48 В м'якого гібридного автомобіля.

Запропоновано систему синхронного випрямлення для генератора на 12 В виконувати за схемою двонапівперіодного випрямляча із середньою точкою, що дозволяє підвищити енергоефективність та економічність автомобільного генератора.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Taoudi, A., Haque, M., Luo, C., Strzelec, A. et al. (2001). Design and Optimization of a Mild Hybrid Electric Vehicle with Energy-Efficient Longitudinal Control. *SAE Int. J. Elec. Veh.* 10 (1): 55-78, 2021. <https://doi.org/10.4271/14-10-01-0005>.
2. Sarafianos, Dimitrios & Logan, Thomas & McMahon, Richard & Flack, T.J. & Pickering, Stephen. (2014). Alternator loss breakdown and use of alternative rectifier diodes for improvement of vehicle electrical power system efficiency. 502-507. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980543>
3. Mürken, Michael & Kübel, D & Kurz, A & Thanheiser, Andreas & Gratzfeld, P. (2018). Fault analysis of automotive claw pole alternator rectifier diodes. <https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607641>.
4. Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV) – examples (2020). <https://x-engineer.org/mild-hybrid-electric-vehicles-mhev-examples/>
5. Mahmood, Omar & Wan Hasan, W. & Ismail, Luthffi & Shafie, Suhaidi & Azis, Norhafiz & Norsahperi, Nor Mohd Haziq. (2022). Optimization Approaches and Techniques for Automotive Alternators: Review Study. *Machines*. 10. 10.3390/machines10060478.
6. Chen, Jyh-Wei & Tran, Thanh Nhat Trung. (2019). Design of Low-Cost Voltage Sensing Method of Three-phase Synchronous Rectifier with High-Efficiency for Automotive Alternator. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2019.8903894>.
7. Hidaka, Yuki. (2021). Novel coupled analysis methods of automotive alternators considering synchronous rectification circuit. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-09-2020-0319>.
8. K. S. Kao et al. (2018). A high efficient synchronous rectifier for next generation automotive alternator applications. *International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC)*, Mie, Japan, 2018, pp. 391-395. <https://doi.org/10.23919/ICEP.2018.8374330>.

9. Rees, Stephan & Ammann, Ulrich. (2003). A smart synchronous rectifier for 12 V automobile alternators. 1516 - 1521 vol.4. <https://doi.org/10.1109/PESC.2003.1217684>.
10. International Rectifier. (2018). HEXFET Power MOSFET: IRFP4468PBF. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFP4468-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153562c73472019
11. Diodes Incorporated. (2021). Secondary side synchronous rectification controller. APR348, Document number: DS42016 Rev. 5 - 2. <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/APR348.pdf>
12. International Rectifier. (2013). Advanced smartrectifier™ control IC: IR11672AS. <https://www.infineon.com/dgdl/ir11672aspdf.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c455561653>
13. International Rectifier. (2011). Dual smart rectifier driver IC: IR1168S. <https://www.infineon.com/dgdl/ir1168.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c467fa1658>
14. Adnaan Lokhandwala. (2016). Design of Secondary-Side Rectification using IR1168 Dual SmartRectifier™ Control IC. Application Note AN-1139. International Rectifier. <https://www.infineon.com/dgdl/an-1139.pdf?fileId=5546d462533600a40153559a0fd1f10d9>

Двадненко Володимир Яковлевич¹, д.т.н., проф. кафедри автомобільної електроніки, dvadnenkovladimir@gmail.com, тел. +38 067-733-04-41, ORCID: 0000-0002-6634-3431

Дзюбенко Олександр Андрійович¹, к.т.н., доц. кафедра автомобільної електроніки, тел. +38 066-768-41-16, dzyubenko.alan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0387-4956

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

Increasing the efficiency of the automotive generator due to active rectification

Abstract. Problem. *Increasing fuel economy requirements for modern vehicles lead to an increase in their electrification. The rise in the number of electrical systems leads to a higher load on the electrical power supply system, with the vehicle's power load reaching 2-3 kW. Leading automobile companies have begun serial production of vehicles with the new 12/48 V power supply voltage standard. The traditional alternator used today is a synchronous alternator, and rectifier diodes are used*

*to convert the generated AC to DC to charge the battery, which is inefficient. A study of losses in an automobile alternator shows that the diode rectifier creates a significant portion of the machine's losses at low speeds, resulting in increased fuel consumption. The solution to this problem is to use a synchronous rectifier to replace traditional rectifier diodes, thus improving the efficiency of the AC/DC rectifier. **Goal:** To improve the economic and environmental characteristics of a mild hybrid vehicle through the use of a synchronous two-semi-periodic rectifier with a midpoint in the car generator. **Methodology:** Analytical methods are used to calculate energy losses on diodes and in the phase windings of the generator when employing a two-semiperiod rectifier with a midpoint, compared to a bridge rectifier. **Results:** The structure, functions, and operation modes of the synchronous rectification system are considered. The effect of synchronous rectification on the generator efficiency of a mild hybrid vehicle is analyzed. It was determined which configurations of synchronous rectification are more effective from the standpoint of energy saving and under which operating conditions. It was determined that in a two-semiperiod rectifier with a midpoint, compared to a bridge rectifier, there will be the same heating of the phase windings and 2 times fewer losses on the diodes. **Practical value:** A version of the bridge synchronous rectification system of the 48 V generator for a mild hybrid vehicle using MOSFET transistors and specialized control IC is proposed. A synchronous rectification system and its circuit implementation for a 12 V generator based on a two-semi-periodic rectifier scheme with a midpoint is proposed, which allows increasing the energy efficiency and economy of the automobile generator.*

Key words: *mild hybrid electric vehicle, start-stop system, automotive generator, active rectifier system, three-phase bridge rectifier, synchronous rectifier.*

Dvadnenko Volodymir¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 067-733-04-41, dvadnenkovladimir@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6634-3431

Dzyubenko Oleksandr¹, Ph.D., Assoc. Prof. Vehicle Electronics Department, tel. +38 066-768-41-16, dzyubenko.alan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0387-4956

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

Аналіз і розроблення критеріїв експлуатаційної ефективності міських електробусів

Войтків С.В.¹

¹Науково-технічний центр «Автополіпром», Україна

Анотація. У статті проаналізовані основні – номінальна пасажировмістимість – й додаткові – споряджена і повна конструктивна маса, величина автономного пробігу, енергоємність автономних джерел електричної енергії – показники та існуючі критерії експлуатаційної ефективності міських електробусів, зокрема, питома витрата електроенергії. В ході дослідження було розроблено п'ять варіантів компоновальних схем міських низькопідлогових електробусів та розраховані їх основні технічні параметри. Результати аналітичних досліджень показали, що економічність експлуатації міських електробусів залежить від їх конструктивних особливостей за типом автономних джерел електричної енергії та систем їх заряджання або заміни. А існуючі й широко застосовувані критерії їх експлуатаційної ефективності не коректно відображають переваги тих чи інших типів міських електробусів в адекватних умовах експлуатації, оскільки не враховують їх основний технічний параметр – номінальну пасажировмістимість. Тому, у роботі запропоновано кілька критеріїв експлуатаційної ефективності міських електробусів різних типів з урахуванням їх вмістимості.

Ключові слова: міський електробус, автономне джерело електроенергії, критерії експлуатаційної ефективності, номінальна пасажировмістимість, енергоємність, автономний пробіг.

Вступ

Міські низькопідлогові електробуси, як один з видів рухомого складу міського електричного транспорту, завдяки екологічній безпечності у порівнянні з автобусами, обладнаними дизельними або газовими двигунами, уже доволі широко застосовуються у багатьох країнах світу. Бурхливий розвиток їх конструкцій протягом двох останніх десятиків років призвів до появи різних типів електробусів за двома характерними ознаками:

– за типами автономних джерел електричної енергії (ДЕЕ), у якості яких застосовуються тягові акумуляторні батареї (АКБ), суперконденсатори (СК) або паливні елементи (ПЕ), які, у свою чергу, характеризуються різними підтипами;

– за системами їх заряджання або підзаряджання тягових АКБ або СК, заміни тягових АКБ або заправлення, зокрема, водневих паливних елементів (ПЕ).

На теперішній час створені наступні типи міських електробусів:

– ONC (Overnight Charging) – обладнані системою повільного заряджання тягових акумуляторних батарей (АКБ) у нічний час в умовах автобусних парків:

– ONC-C (C – classic) – обладнані тяговими АКБ відповідної ємності, необхідної для заданого денного автономного пробігу під час роботи на маршрутах;

– ONC-T (T – trailed) – обладнані тяговими АКБ, основна частина яких розміщена у причепі;

– ONC-V (V – variable) – обладнані системою заміни блоків тягових АКБ;

– OC (Opportunity Charging), обладнані системою ультрашвидкого підзаряджання ДЕЕ на зупинках:

– OC-B (Opportunity Charging – Battery), обладнані тяговими АКБ;

– OC-S (Opportunity Charging –

Supercapacitor), обладнані тяговими СК;

- ІМС (In-Motion-Charging), обладнані системою підзарядження автономних ДЕЕ під час руху по маршруту;

- FCEB (Fuel Cell Electric Buses) – обладнані ПЕ та системою управління;

- FCEB-H₂ (Fuel Cell Electric Buses) – обладнані водневими ПЕ та системою їх управління.

До цього переліку можна додати, принаймні, ще два типи свого роду гібридних міських електробусів, у тягових приводах яких використовуються два різних автономних ДЕЕ:

- ONC-(B+S) – обладнані тяговими АКБ і СК;

- ONC-B+H₂ – обладнані тяговими АКБ (основне ДЕЕ) і водневими ПЕ (додаткове ДЕЕ) в якості подовжувача автономного пробігу.

Тому, для вирішення, принаймні, одного із наступних двох завдань:

- вибору вітчизняними виробниками автобусного рухомого складу оптимального типу міського електробуса для проектування та організації дрібносерійного виробництва перспективних моделей;

- вибору комунальними підприємствами міського електротранспорту або підприємствами з міських перевезень пасажирів економічно доцільного типу електробуса для застосування на конкретних міських маршрутах за умови наявності відповідної інфраструктури, необхідні адекватні критерії їх експлуатаційної ефективності.

Аналіз публікацій

З недавніх років і, навіть, понині, компанії-виробники міських електробусів оперують таким показником їх переваг як величина автономного пробігу. Проте, великий автономний пробіг, сам по собі, аж ніяк не відображає ефективність експлуатації міських електробусів, оскільки чим більша його величина, тим менша номінальна пасажиромістимість при однаковій повній конструктивній масі.

Розгляду і аналізу експлуатаційної ефективності міських електробусів різних типів присвячено багато досліджень, у яких фахівці для її оцінки оперують різними критеріями. Їх, за відношенням до аналізованої системи, можна об'єднати у три основні гру-

пи, які пов'язані:

- з рухомим складом міського електротранспорту, у даному випадку з міськими низькопідлоговими електробусами;

- із локальною транспортною системою "міський електробус – необхідна інфраструктура";

- із загальною транспортною системою міського електротранспорту за наявності тролейбусної мережі.

Отже, ефективність експлуатації міських електробусів залежить від великої групи факторів, які характеризують, з одного боку, їх конструктивні особливості, а з іншого, особливості маршрутів, погодних умов, наявної інфраструктури тощо.

Одним із широко застосовуваних критеріїв оцінки економічності експлуатації міських електробусів являється питома витрата електроенергії.

Один з варіантів методики визначення реальної питомої витрати електроенергії при експлуатації міських електробусів та обґрунтування ємності тягової АКБ для забезпечення терміну її використання з заданою ймовірністю для роботи на маршруті відомої довжини запропонований у роботі [1]. У ній показано, що енергоємність тягових АКБ має бути достатньою для компенсації витрат електроенергії на рух за маршрутом та на живлення допоміжних систем (опалення, кондиціонування повітря тощо). Окрім того, вона повинна враховувати з ймовірністю 0,95 або 0,99 потрібну додаткову енергоємність тягових АКБ, яка забезпечить не перевищення в реальних експлуатаційних умовах гранично допустимого розряду, встановленого її виробником.

У дослідженні [2] наведено вичерпний огляд сучасного стану міського електробусного транспорту, пов'язаного із застосуванням для перевезень пасажирів електробусів, обладнаних тяговими АКБ, і представлено аналіз топології їх трансмісії й технології зарядження тягових АКБ з особливим акцентом на системах силової електроніки. На основі цього аналізу зроблено висновок, що фахівці міських комунальних підприємств громадського електротранспорту та інших фірм-перевізників повинні бути добре обізнані з інформацією щодо споживання електроенергії міськими електробусами різних типів у різних умовах експлуатації, зокрема, таких як особливості маршрутів, інтенсивність пасажиропотоків, погодні умови, цикли

водіння тощо. Ця інформація необхідна для визначення і вибору оптимальних типів міських електробусів для використання на конкретних маршрутах.

Оскільки питома витрата електроенергії міськими електробусами залежить від великої групи різних факторів, багато досліджень присвячені саме впливу тих чи інших чинників на середнє споживання енергії автономних ДЕЕ міськими електробусами різних типів.

Наприклад, у роботі [3] наведена модель прогнозування споживання енергії електробусами, оснащеними тяговими АКБ. В результаті проведених досліджень було встановлено, що підвищення ухилів міських вулиць на 1 % збільшує енергоспоживання (ЕС) на 0,380 кВт·год/км, кожне збільшення середньої швидкості на 10 км/год. збільшує показники ЕС на кВт·год/км. Аналогічно, кожне збільшення щільності зупинок на одну зупинку на 1 км маршруту збільшує ЕС на 0,128 кВт·год/км. Збільшення кількості пасажирів на 10 чол. збільшує споживану енергію на 0,05 кВт·год/км, а збільшення потужності системи опалення, вентиляції і кондиціонування (HVAC – Heating, Ventilation, & Air Conditioning) на 1 кВт призводить до збільшення ЕС на 0,036 кВт·год/км.

Автори досліджень [4-6] аналізували вплив параметрів міських маршрутів, величини енергоємності тягових АКБ і систем їх заряджання на споживання електроенергії. Ними встановлено, що середня величина ЕС міським електробусом з довжиною кузова біля 12,0 м та спорядженою масою 11636 кг, обладнаним тяговими АКБ енергоємністю 324 кВт·год і тривалістю заряджання не більше 2 год. від зарядного пристрою потужністю 90 кВт, становить 1,35 кВт·год/км. Така ємність тягових АКБ являється критично допустимою для електробусів типу ONC-C з умови забезпечення щоденного автономного пробігу у 242 км (150 миль). Зменшення енергоємності тягових АКБ, яке є особливо привабливим для зниження вартості електробусів, суттєво впливає на їх продуктивність. Зі зменшенням енергоємності тягових АКБ з 324 кВт·год до 150 кВт·год значно зростає тривалість їх активного заряджання під час перебування на маршрутах. Тому, втрачений час на перевезення пасажирів електробусами типу ОС-В становить майже 30 % від загальної тривалості роботи електробусів електробусами типу ONC-C. Отже, для компенсації втрати часу на

перевезення пасажирів необхідна додаткова кількість міських електробусів.

Дослідження енергетичних характеристик 22 міських електробусів протягом періоду моніторингу (липень 2018 – червень 2019) у процесі експлуатації на реальних маршрутах показало, що споживання електроенергії, окрім параметрів маршрутів, інтенсивності пасажиропотоків тощо залежить і від кліматичних параметрів – температури, вологості, атмосферного тиску і густини повітря [7]. Встановлено, що середньорічне ЕС міськими електробусами під час експлуатації у погодних умовах, характерних для переважної більшості міст континентальної Європи (середньорічні параметри – температура 11,7 °С, вологість повітря 75,3 %, атмосферний тиск 726,6 мм рт. ст.), становить 1,3716 кВт·год/км; середньорічна рекуперація енергії 0,4016 кВт·год/км. Енергоспоживання електробусів збільшується зі зниженням температури та атмосферного тиску, але така ж тенденція існує навіть при збільшенні вологості та густини повітря.

У роботі [8] досліджувався вплив маси автомобілів з електричним тяговим приводом та енергоємності їх тягових АКБ на ЕС. На основі проведених досліджень встановлено, що кожне збільшення маси транспортного засобу на 100 кг збільшує реальне споживання енергії тягових АКБ у залежності від його початкової маси на 0,4-1,3 кВт·год/100 км.

Деякі фахівці у різних країнах досліджували продуктивність та потребу в електроенергії міськими електробусами у процесі перевезень пасажирів і виявили, що середнє споживання електроенергії становить 1–2 кВт·год/км для моделей з довжиною кузовів біля 12,0 м [9] та 2–3,5 кВт·год/км для зчленованих електробусів з довжиною кузовів 18,0-18,7 м [10].

Експериментальні випробування міського електробуса з довжиною кузова 12,0 м та конструктивною масою 11300 кг за стандартизованим циклом SORT (Standardized On-Road Test) [11] показали, що середнє споживання електроенергії електробусом, необхідне тільки для забезпечення його руху становить 103 кВт·год/100 км, споживання електроенергії кондиціонером – біля 25 % (25 кВт·год/100 км), а використання енергії системою опалення сягає 150 %, тобто, 170 кВт·год/100 км при температурі навколишнього повітря від –10 до –15 °С.

Техніко-економічне порівняння різних концепцій міських електробусів на основі фактичного застосування у багатьох європейських містах наведено у роботі [12], а з умови вибору оптимальної системи та стратегії заряджання автономних ДЕЕ у дослідженнях [13-14].

Мета та постановка задачі

Мета дослідження полягає у формуванні критеріїв експлуатаційної ефективності міських низькопідлогових електробусів різних типів за автономними ДЕЕ та системами їх заряджання або заміни для проведення адекватної порівняльної оцінки і вибору найбільш оптимальних варіантів для застосування у системах міських перевезень пасажирів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконання наступних задач:

- формування найбільш характерних показників експлуатаційної ефективності міських електробусів;
- аналіз існуючих та формування нових критеріїв експлуатаційної ефективності міських електробусів;
- розроблення ескізних проектів міських низькопідлогових електробусів різних типів за автономними ДЕЕ та системами їх заряджання або заміни;
- визначення параметрів мас досліджуваних варіантів міських електробусів та номінальної пасажиромістимості;
- проведення порівняльного аналізу експлуатаційної ефективності досліджуваних типів міських електробусів із застосуванням запропонованих критеріїв.

Характерні показники експлуатаційної ефективності міських електробусів

Відповідно до головного і, фактично, єдиного функціонального призначення міських електробусів – перевезення пасажирів, їх основним технічним параметром являється номінальна пасажиромістимість з урахуванням регламентованої мінімальної кількості пасажирських сидінь, встановлених у пасажирських салонах. Номінальна пасажиромістимість міських електробусів загалом залежить від двох параметрів:

- площі пасажирського салону, призначеної для розміщення пасажирських сидінь, пасажирів у інвалідних візках (не менше одного) на спеціальних місцях та пасажирів у

стоячому положенні;

- допустимої повної конструктивної маси, регламентованої нормативною документацією (ДСТУ, Правилами ЄЕК ООН тощо) або допустимими навантагами на керований, тяговий та тримальний мости.

Допустима повна конструктивна маса для двовісних електробусів та автобусів з гібридним тяговим приводом становить 19500 кг, яка на 1500 кг більша ніж для автобусів.

Іншим важливим експлуатаційним показником міських електробусів, особливо типу ОНС-В, являється величина автономного пробігу, яка, у свою чергу, залежить від таких параметрів, як енергоємність автономних ДЕЕ та маси електробусів у спорядженому стані.

Окрім того, до групи додаткових показників, від яких залежить номінальна пасажиромістимість міських електробусів, входять маса у спорядженому стані, яка, у свою чергу, суттєво залежить від типу та енергоємності автономних ДЕЕ.

Критерії експлуатаційної ефективності міських електробусів

На основі аналізу публікацій, які стосуються дослідження технічних параметрів міських електробусів, можна виділити наступні критерії їх експлуатаційної ефективності:

- питому витрату електроенергії автономних ДЕЕ виключно на рух;
- питоме споживання електроенергії автономних ДЕЕ системами опалення або кондиціонування повітря у пасажирському салоні;
- питому рекуперацію електроенергії.

Переважає більшість дослідників застосовує критерій питомої витрати або питомого споживання електроенергії по відношенню до пробігу електробуса, тобто, в одиницях кВт·год/100 км або у кВт·год/км:

$$\Delta w_l = \frac{W_{dee}}{L_{np}}, \quad (1)$$

де Δw_l – питома витрата електроенергії на одиницю пробігу, кВт·год/км; W_{dee} – витрата електроенергії електробусом під час руху, кВт·год; L_{np} – пробіг електробуса на витраченій електроенергії, км.

Проте, як показано у проведених дослідженнях [8] та [15] маса міських електробусів доволі суттєво впливає на питоме споживання електроенергії (рис. 1).

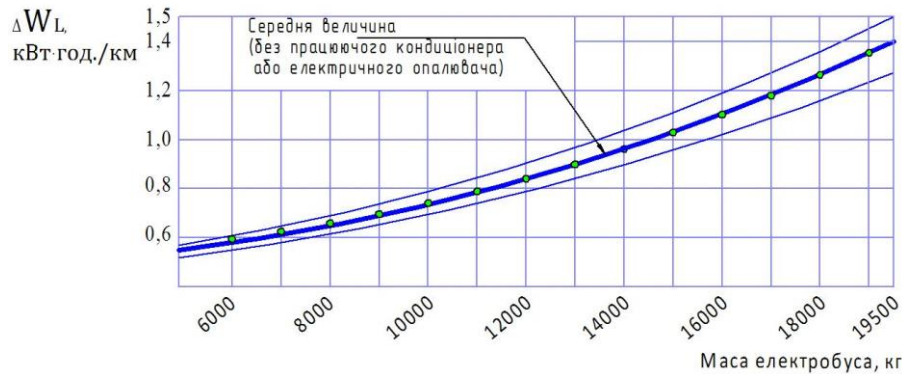


Рис. 1. Питома витрата електроенергії автономних ДДЕ міськими електробусами у залежності від їх конструктивної маси при непрацюючій системі HVAC (тільки на рух)

Отже, оцінка електробусів за питомою витратою електроенергії їх автономних ДДЕ на одиницю пробігу можлива лише за умови однакової повної конструктивної маси. Тому, деякі дослідники застосовують більш коректний критерій експлуатаційної ефективності міських електробусів, який враховує їх реальну конструктивну масу:

$$\Delta w_{lm} = \frac{W_{dee}}{L_{np} \cdot M_n}, \quad (2)$$

де Δw_{lm} – питома витрата енергії на одиницю пробігу і одиницю маси, кВт·год./км·кг; M_n – повна конструктивна маса електробуса, кг.

Проте, і цей критерій не можна вважати адекватним, адже він не враховує дуже важливий з огляду на економічність експлуатації міських електробусів основний і визначальний технічний параметр – номінальну пасажиромісткість.

Вираз витрати електроенергії автономних ДДЕ міськими електробусами можна записати у двох варіантах. Перший враховує споживання електроенергії, необхідне для руху електробуса з повною або поточною конструктивною масою та для забезпечення роботи системи HVAC з урахуванням рекуперації електроенергії:

$$W_{dee} = W_{dee}^l + W_{dee}^s - W_{dee}^r, \quad (3)$$

де W_{dee} – витрата електроенергії міським електробусом при русі на маршруті, кВт·год; W_{dee}^l – витрата електроенергії, необхідна для забезпечення руху електробуса, кВт·год; W_{dee}^s – споживання електроенергії додатко-

вими системами (опалення, кондиціонування повітря тощо) під час перебування електробуса на маршруті, кВт·год; W_{dee}^r – поповнення енергії автономним ДДЕ за рахунок рекуперації, кВт·год.

З цього виразу зрозуміло, що адекватне порівняння міських електробусів повинно враховувати не тільки пробіг та конструктивну масу з пасажиромісткістю, але й типи і потужність енергоспоживачів систем опалення і кондиціонування.

Інший вираз характеризує витрати електроенергії, необхідні для руху електробуса без пасажирів, тобто, з порожньою масою, та для перевезень пасажирів:

$$W_{dee} = W_{dee}^{M_{nop}} + W_{dee}^N, \quad (4)$$

де $W_{dee}^{M_{nop}}$ – витрата електроенергії електробусом під час руху з порожньою масою, кВт·год.; W_{dee}^N – додаткова витрата електроенергії електробусом, необхідна для перенесення пасажирів, кВт·год.

Як відомо, порожня маса електробуса становить:

$$M_{nop} = M_{cn} + m_{вод}, \quad (5)$$

де M_{cn} – маса електробуса у спорядженому стані, кг; $m_{вод}$ – маса водія, кг (для автобусів та електробусів, відповідно до вимог Правил ЄНК ООН № 107, $m_{вод} = 75$ кг).

Отже, при однаковій повній конструктивній масі електробуси різних типів, обладнані автономними ДДЕ різної ємності, матимуть різну споряджену масу і, відповідно, різну

номінальну пасажировмістимість. Тому, для більш адекватної оцінки експлуатаційної ефективності міських електробусів різних типів близьких за конструкціями, необхідно застосовувати критерій, який враховує, окрім пробігу та конструктивної маси ще й і їх вмістимість:

$$\Delta w_{lmN} = \frac{W_{dee}}{L_{np} \cdot M_n \cdot N_{nac}}, \quad (6)$$

де Δw_{lmN} – питома витрата електроенергії на одиницю пробігу і одиницю маси при перевезенні 1-го пасажера, кВт·год/км·кг·чол.; N_{nac} – номінальна (розрахункова) пасажировмістимість електробуса, чол.

Для оцінки економічності експлуатації міських електробусів можна використовувати і питому витрату електроенергії автономних ДЕЕ для перевезення одного пасажера на одиницю пробігу:

$$\Delta w_N = \frac{W_{dee}}{N_{nac}}, \quad (7)$$

де Δw_N – питома витрата електроенергії при перевезенні пасажирів, кВт·год/км·чол.

Відповідно до виразу (4) електроенергія автономних ДЕЕ міських електробусів необхідна для руху без пасажирів, тобто, з врахуванням тільки порожньої маси, та для виконання основного функціонального призначення – перевезення пасажирів.

Питому витрату електроенергії для руху електробуса без пасажирів на одному і тому ж маршруті можна вважати сталою величиною:

$$\Delta w_{M_{nop}} = \frac{W_{dee}^{M_{nop}}}{L_{np}} = const, \quad (8)$$

де $\Delta w_{M_{nop}}$ – питома витрата електроенергії при русі електробуса з порожньою масою, кВт·год/км.

Питома витрата електроенергії, необхідна для перевезення пасажирів, теж являється сталою величиною, яку, за результатами проведених досліджень [3], можна приймати рівною $\Delta w_{N_{nac}} = 0,005$ кВт·год/км·пас., а,

відповідно, до рис. 1, ця величина сягає значення $\Delta w_{N_{nac}} = 0,006$ кВт·год/км·пас.

Отже, для порівняння міських електробусів різних типів з різною номінальною вмістимістю питому витрату електроенергії при відсутності інформації виробників, доцільно визначати за виразом:

$$\Delta w_{lmN} = \frac{\Delta w_{M_{nop}}}{N_{nac}} + \Delta w_{N_{nac}}, \quad (9)$$

який враховує автономний пробіг, повну або проміжну конструктивну масу та кількість перевозимих пасажирів.

Розроблення ескізних проектів досліджуваних міських електробусів

Для проведення аналітичних досліджень з оцінки експлуатаційної ефективності міських електробусів за пропонованими критеріями розроблені дві групи їх ескізних проектів на основі наступних вихідних умов:

- колісна формула електробусів усіх проектів – 4х2.2;
- довжина і ширина кузовів електробусів однакова, відповідно, 12,0 м і 2,55 м;
- добовий автономний пробіг електробусів типу ОНС-С не менше 200 км;
- керований міст з незалежною підвіскою коліс моделі ZF RL 82 EC та тяговий міст інтегрально-портального типу із залежною підвіскою здвоєних коліс моделі ZF AVE 130 однаковий для всіх проектів електробусів;
- питома енергоємність тягових АКБ становить 10 кг/кВт·год;
- питома енергоємність тягових СК прийнята рівною 40 кг/кВт·год;
- інші комплектувальні вироби однакові для електробусів усіх проектів

Характерною особливістю електробусів першої групи типу ОНС-С являється різна споряджена маса за рахунок виготовлення їх кузовів з різних матеріалів – нержавіючої сталі, алюмінієвих сплавів або композиційних матеріалів при однаковій агрегатній базі та однакових інших комплектувальних виробках, а також при однаковій енергоємності тягових АКБ. Параметри мас і вмістимості електробусів розроблених ескізних проектів, розрахованих за методикою [16], наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні технічні параметри проектів міських електробусів типу ОНС-С

Позначка проекту електробуса	АПП-N1	АПП-N2	АПП-N3
Повна маса, кг	18000		
Енергоємність АКБ, кВт·год.	320		
Маса тягових АКБ, кг	3200		
Основні матеріали кузовів*	НС	АС	КМ
Споряджена маса без АКБ, кг	10960	9110	7260
Споряджена маса, кг	14160	12310	10460
Номінальна вмістимість, чол.	55	83	110
Примітки: *Позначення матеріалів: НС – нержавіюча сталь; АС – алюмінієві сплави; КМ – композиційні матеріали			

Проекти міських електробусів другої групи розроблені для порівняння економічності їх експлуатації в залежності від типу автономних ДЕЕ та систем їх заряджання за умови застосування однакових матеріалів для виготовлення кузовів. Їх розрахункові основні технічні параметри наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Основні технічні параметри проектів міських електробусів різних типів

Позначка проекту електробуса	АПП-N1	АПП-С1	АПП-S1
Тип	ОНС-С	ОС-В	ОС-S
Повна маса, кг	18000		
Тип автономних ДЕЕ	АКБ		СК
Енергоємність АКБ, кВт·год	320	80	34

Таблиця 3 – Аналіз проектів міських електробусів різних типів за критеріями експлуатаційної ефективності

Позначка проекту електробуса	АПП-N1	АПП-N2	АПП-N3	АПП-С1	АПП-S1
Тип	ОНС			ОС-В	ОС-S
Довжина кузова, м	12,0				
Повна конструктивна маса, кг	18000				
Номінальна вмістимість, чол.	55	83	110	91	82
Критерії експлуатаційної ефективності:					
Δw_l , кВт·год/км	1,264				
Δw_{lm} , кВт·год/км·кг	$0,702 \cdot 10^{-4}$				
Δw_{lmN} , кВт·год/км·кг·чол. (6)	$1,277 \cdot 10^{-6}$	$0,846 \cdot 10^{-6}$	$0,638 \cdot 10^{-6}$	$0,772 \cdot 10^{-6}$	$0,856 \cdot 10^{-6}$
Δw_N , кВт·год/км·чол. (7)	0,0230	0,0152	0,0115	0,0139	0,0154
Δw_{lmN} , кВт·год/км·чол. (9): при $\Delta w_{N_{nac}} = 0,005$ кВт·год/км·чол.	0,0228	0,0154	0,0119	0,0141	0,0155

Продовження табл. 2

Позначка проекту електробуса	АПП-N1	АПП-С1	АПП-S1
Маса ДЕЕ, кг	3200	800	1360
Основні матеріали кузовів*	НС		
Споряджена маса без ДЕЕ, кг	10960		
Споряджена маса, кг	14160	11760	12320
Номінальна вмістимість, чол.	55	91	82
Примітки: *Позначення матеріалів: НС – нержавіюча сталь			

Аналіз експлуатаційної ефективності досліджуваних міських електробусів за різними критеріями

Для порівнюваних проектів міських електробусів на основі рис. 1 визначена середня питома витрата електроенергії при повній конструктивній масі 18000 кг, яка становить $\Delta w_l = 1,264$ кВт·год/км. Отже, для всіх порівнюваних проектів електробусів однакова і величина $\Delta w_{lm} = 0,711 \cdot 10^{-4}$ кВт·год/км·кг. Тобто, усі розглянуті варіанти проектів міських електробусів з однаковою довжиною кузовів, рівною 12,0 м, і з однаковою конструктивною масою у 18000 кг за витратою електроенергії на одиницю пробігу та на одиницю пробігу і одиницю конструктивної маси рівноцінні.

Проте, їх номінальна пасажиромістимість за рахунок різної маси у спорядженому стані суттєво різняться, тому витрата електроенергії на перевезення одного пасажирів теж не однакова (табл. 3).

Аналіз отриманих результатів показує, що загальноприйнятий критерій оцінки міських електробусів навіть одного типу з однаковими розмірними параметрами по кузовах за питомою витратою електроенергії на одиницю пробігу являється не прийнятним. Наприклад, для порівнюваних проектів електробусів його величина однакова, але за рахунок різної спорядженої маси їх номінальна пасажиромісткість різниться від 20,9 % до 100 %.

На основі розрахунків за формулою (9) побудований графік залежності питомих витрат електроенергії, показаний на рис. 2.

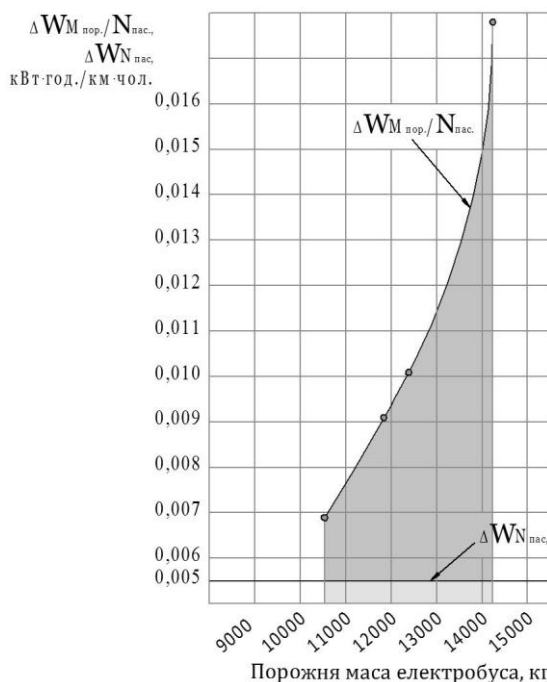


Рис. 2. Питомі витрати електроенергії автономних ДЕЕ міськими електробусами, розраховані за виразом (9)

Аналіз наведеного графіку показує, що питомі витрати електроенергії, необхідні для забезпечення руху електробусів, приведені до їх номінальної місткості, у 3,8-25,6 разів більші ніж на перевезення одного пасажирів. Отже, експлуатація електробусів з довжиною кузовів 12,0 м типу ONC-B за умови забезпечення величини автономного пробігу не менше 200 км, являється не ефективною через велику споряджену масу і малу пасажиромісткість. Тому, проектування перспективних моделей такого типу повинно проводити на основі оптимізації їх основних визначальних параметрів – довжини кузовів і номінальної місткості [17].

Порівняння експлуатаційної ефективності міських електробусів сучасних моделей, ідентичних за конструкцією але різних типів, наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Аналіз сучасних моделей міських електробусів різних типів за критеріями експлуатаційної ефективності

Модель електробуса	Danzer [18, 19]		Nesobus
	FC75	LR530	
Тип	OC-B	ONC-C	FCEB-H ₂
Довжина кузова, м	12,1		12,0
Повна конструктивна маса, кг	14795	-	19500
Номінальна місткість, чол.	90		93
Критерії ефективності:			
Δw_l , кВт·год/км	0,72	0,911	-
Δw_N , кВт·год/км·чол.	0,008	0,010	-

Автономний пробіг сучасного польського електробуса моделі "Nesobus" [20] з довжиною кузова 12,0 м, обладнаного водневими паливними елементами сягає 450 км. При номінальній місткості 93 чол., всього на 3 чол. більший ніж у електробусів "Danzer", його повна конструктивна маса становить 19500 кг. Зрозуміло, що за майже однакової місткості економічність перевезень пасажирів вища у моделей електробусів з меншою повною конструктивною масою.

Висновки

На підставі проведених розрахунково-аналітичних досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Для адекватної оцінки експлуатаційної ефективності не достатньо враховувати тільки їх тип, величину автономного пробігу та такий критерій, як питома витрата електроенергії автономного ДЕЕ на одиницю пробігу, тим паче, якщо невідомі випробувальні цикли, за методиками яких отримані величини цього критерію. Адже, питома витрата електроенергії електробусами, наприклад, "Danzer" однакової довжини (12,0 м) з однаковою місткістю 90 чол., але різних типів – OC-B (модель FC75) і ONC-C (модель LR530) становить, відповідно, 0,72 і 0,911 кВт·год/км, тобто, різниться на 26,5 %.

2. Для адекватного порівняння міських електробусів навіть одного і того ж типу запропоновані критерії експлуатаційної ефективності, які враховують їх основні технічні параметри – номінальну пасажиромісткість та споряджену або порожню масу:

– питома витрата електроенергії на одиницю пробігу і одиницю маси при перевезенні 1-го пасажера, кВт·год/км·кг·чол;

– питома витрата електроенергії на одиницю пробігу при перевезенні 1-го пасажера, кВт·год/км·чол.

3. При порівнянні міських електробусів однакової довжини (12,0 м) з однаковою повною конструктивною масою (18000 кг) різних типів з різною номінальною пасажиромісткістю (табл. 3) величини питомих витрат електроенергії на одиницю пробігу або на одиницю пробігу і одиницю маси однакові (відповідно, $1,264$ кВт·год/км та $0,702 \cdot 10^{-4}$ кВт·год/км·кг), але їх номінальна вмістимість різниться до 2-х разів. Тому, величини питомих витрат електроенергії на одиницю пробігу або на одиницю пробігу і одиницю маси при перевезенні 1-го пасажера цих електробусів відрізняються на 20,9-100 %.

4. Застосування розроблених критеріїв забезпечує адекватність порівняння експлуатаційної ефективності міських електробусів.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Андрусенко, С. І., Будниченко В. Б., Подпіснєв В. С. (2022). Методика оцінки споживання енергії електробусом та параметрів тягової акумуляторної батареї в умовах експлуатації. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: Електронне наукове спеціалізоване видання*, 22, 64–71. Andrusenko, S., Budnychenko, V., & Podpisnov, V. (2022). Metodika otsinky spozhyvannia enerhii elektrobosom ta parametriv tiahovoi akumuliatornoj batarei v umovakh ekspluatatsii. [Methodology for estimating energy consumption for an electric bus and traction battery parameters in operating conditions.] *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, (22), 64–71. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.8>
2. Verbrugge, B., Hasan M. M., Rasool, H., Geury, T., El Baghdadi, M. & Hegazy, O. (2021). Smart Integration of Electric Buses in Cities: A Technological Review. *Sustainability*, 13, 12189. 1–23. <https://doi.org/10.3390/su132112189>
3. Abdelaty H. & Mohamed M. (2021). A Prediction Model for Battery Electric Bus Energy Consumption in Transit. *Energies*, 14, 2824. 1–26. <https://doi.org/10.3390/en14102824>
4. Gao, Z., Lin, Z., LaClair, T. J., Liu, C., Li, J.-M., Birky, A. K. & Ward, J. (2017). Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy*, 122, 588–600. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.101>
5. Basma, H., Mansour, C., Haddad, M., Nemer M. & Stabat, P. (2022). Energy consumption and battery sizing for different types of electric bus service. *Energy, Elsevier*, 239(PE). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122454>
6. Sadrani, M., Najafi, A., Mirqasemi, R. & Antoniou, C. (2023). Charging strategy selection for electric bus systems: A multi-criteria decision-making approach. *Applied Energy*, 347(1). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121415>
7. Iclodean, C., Cordos, N. & Todorut, A. (2019). Analysis of the Electric Bus Autonomy Depending on the Atmospheric Conditions. *Energies* 2019, 12, 4535. 1–23. <http://doi.org/10.3390/en12234535>.
8. Weiss, M., Cloos K. C. & Helmers, E. (2020). Energy efficiency trade-offs in small to large electric vehicles. *Weiss et al. Environ Sci Eur* 32:46. 1–17. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00307-8>
9. Gallet, M., Massier, T. & Hamacher, T. Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks. *Energy*, 230, 344–356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.086>
10. Rogge, M., Wollny, S. & Sauer, D. U. (2015). Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport – A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements. *Energies*, 8(5), 4587–4606. <https://doi.org/10.3390/en8054587>
11. Gis, W., Kruczynski, S., Taubert, S. & Wierzejski, A. (2017). Studies of energy use by electric buses in SORT tests. *Engines.*, 170(3), 135–138. <https://doi.org/10.19206/CE-2017-323>
12. Meishner, F. & Sauer, D. U. (2020). Technical and economic comparison of different electric bus concepts based on actual demonstrations in European cities. *IET Electrical Systems in Transportation*, 10(1), 144–163. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2019.0014>
13. Basma, H., Haddad, M., Mansour, C., Nemer M. & Stabat, P. (2022).. Evaluation of the techno-economic performance of battery electric buses: Case study of a bus line in paris. *Research in Transportation Economics, Elsevier*, 95(C). <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2022.101207>
14. Diaz Vasquez R. A., Flores, M. L. & Espinel E. L. (2024). A Multi-Criteria Decision Making TOPSIS Fusion Approach for Selection Best Strategy Charging for Electric Bus Systems. *Journal of Intelligent Systems and Internet of Things*, 11(01), 65–74. <https://doi.org/10.54216/JISIoT.110107>

15. Hodge, C., Jeffers, M., Desai, J., Miller, E. & Shah V. (2019). Surat Municipal Corporation Bus Electrification Assessment Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-5400-73600.
<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73600.pdf>
16. Войтків С. В. (2022). Аналіз технічної досконалості міських електробусів різних типів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: Електронне наукове спеціалізоване видання*, 21. 64–78. Voytkiv S. V. (2022). Analiz tekhnichnoi doskonalosti miskykh elektrobisiv riznykh typiv. *Avtomobil i elektronika. [Analyzing technical perfection of city electric buses of various types.] Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, 21. 64–78. [in Ukrainian].
<https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.21.0.03>.
17. Войтків С. В. (2021). Методика оптимізації основних технічних параметрів перспективних міських електробусів типу ОНС. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: Електронне наукове спеціалізоване видання*. Харків : ХНАДУ, 20. 6–16. Voytkiv S. V. (2021). Metodyka optymizatsii osnovnykh tekhnichnykh parametrov perspektivnykh miskykh elektrobisiv typu ONS [The method of optimizing the main technical parameters of the promising city electric buses of ONS Type.] *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, Kharkiv: KhNADU, 20, 6–16. [in Ukrainian].
<https://doi.org/10.30977/VEIT.2021.20.0.01>
18. Dancer. Dancer FC75 technical specification.
<https://dancerbus.com/FC75-EN.pdf>
19. Dancer. Dancer LR530 technical specification.
<https://dancerbus.com/FC75-EN.pdf>
20. Polish Hydrogen Bus. The future of municipal and metropolitan public transport – clean air for all of us. <https://www.nesobus.pl/en/>

Войтків Станіслав Володимирович¹, к.т.н., генеральний конструктор, Заслужений машинобудівник України,
тел. +38 067-447-04-90, voytkivsv@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-7789-2081

¹Науково-технічний центр "Автополіпром", 79066, Україна, м. Львів, вул. Зубрівська, 32/24.

Analysis and development of criteria for the operational efficiency of urban electric buses

Abstract. Problem. Currently, manufacturers and research specialists primarily utilize the amount of autonomous mileage and/or the specific electricity consumption of autonomous DEEs per unit of mileage to describe the general characteristics of

urban electric buses. However, the structural mass and the key operational parameter, the nominal passenger capacity, are often disregarded. Therefore, comparing electric buses of the same type with identical dimensional parameters based solely on these criteria is illogical and incorrect. **Goal.** This study aims to establish criteria for the operational efficiency of urban low-floor electric buses of various types, considering autonomous DEE and their charging or replacement systems. These criteria should account for structural mass and nominal passenger capacity, facilitating a proper comparative assessment and the selection of the most optimal options for use in urban passenger transportation systems. **Methodology.** Criteria for the operational efficiency of city electric buses of various types are proposed based on an analysis of electricity consumption required for both movement and the operation of heating, ventilation, and air conditioning systems. The criteria consider the mass in the equipped state and the main parameter - nominal passenger capacity. **Results.** Several operational efficiency criteria for urban electric buses, incorporating mass parameters and passenger capacity, are suggested. The feasibility of their application is demonstrated through a comparison of five sketch projects of electric buses of various types with modern models. **Originality.** The proposed criteria for the operational efficiency of urban electric buses offer a method for adequately comparing any selected models, regardless of their types and technical specifications. **Practical value.** The proposed criteria for the operational efficiency of urban electric buses of various types can be beneficial for transport company specialists in selecting suitable rolling stock for specific routes. Additionally, design bureau and scientific and technical center specialists can utilize these criteria during the design process of new urban electric transport models.

Key words: city electric bus, autonomous source of electricity, operational efficiency criteria, nominal passenger capacity, energy consumption, autonomous mileage.

Stanislav Voytkiv¹, Cand. of Science, General Designer, voytkivsv@ukr.net, тел. +38 067-447-04-90, ORCID: 0000-0002-7789-2081

¹Scientific and technical Center "Autopoliprom", 32/24, Zubrivska, str., Lviv, 79066, Ukraine.

Розрахунок параметрів електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком як виконавчого органу автомобільних систем

Нечаус А.О.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. У статті викладено результати розробки електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком з постійними магнітами та друкованими обмотками, призначеного для використання як виконавчого механізму автомобільних систем. Наведено пропонувану конструкцію такого двигуна, результати розрахунків параметрів друкованої статорної обмотки, збірки постійних магнітів, а також його основних параметрів. На підставі порівняння отриманих результатів з параметрами прототипу електричного двигуна традиційної конструкції, визначено доцільність впровадження електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком у електромеханічні виконавчі системи автомобільного транспорту.

Ключові слова: електричний двигун з аксіальним магнітним потоком, електричний двигун з постійними магнітами, електричний двигун з друкованими обмотками, збірка Хальбаха, автомобільне обладнання

Вступ

Електричні двигуни з аксіальним магнітним потоком (у іноземній літературі – Axial Flux Motors – AFM), також відомі як електричні двигуни дискового типу, мають деякі переваги порівняно з електричними двигунами традиційного виконання, зокрема малу осьову довжину та більшу густину магнітного потоку зосередженого у основному робочому зазорі.

Подальшого розвитку та вдосконалення такого типу двигуни отримали з розвитком технології потужних постійних магнітів (Permanent Magnet – PM) з рідкоземельних металів, що дозволило конструювати двигуни у, так званому, безщітковому виконанні (BrushLess – BL), коли зникає потреба передачі електричної потужності для створення магнітного потоку ротора. В такому разі підвищується надійність двигуна, оскільки зникає потреба обслуговування ковзаючих контактів.

Ще однією технологією, яка використовується у двигунах цього типу, є виконання обмоток методом друкованого монтажу

(Printed Circuit Board – PCB), коли струмовідні елементи обмотки наносяться на немагнітну основу у вигляді доріжок провідникового матеріалу, при цьому, на теперішній час, використовуються технології як одношарового, так і багатшарового монтажу, що дозволяє створювати безліч варіантів типів обмоток, які традиційно використовуються у електричних машинах, а також розробляти нові типи обмоток.

Наступним кроком розвитку електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком стала розробка двигунів без магнітопроводів (осердь) статора та ротора (Coreless – CL). Коли за рахунок використання збірок постійних магнітів та особливих конструкцій обмоток вдається зосередити більшість магнітного потоку безпосередньо у робочому повітряному зазорі. Відмова від магнітопроводів з електротехнічної сталі зумовлює значне зниження маси електричного двигуна.

На теперішній час, наукова періодика має достатньо публікацій щодо розробки та використання електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком та друкованими об-

мотками у різних галузях, як приводів жорстких дисків у комп'ютерній техніці, приводів вентиляторів та насосів різної продуктивності, рушіїв вело- та мототехніки, зокрема у складі мотор-колеса [1], приводів маніпуляторів верстатів та промислових роботів, включаючи космічні технології. Дослідження підтверджують високі енергетичні та масо-габаритні показники електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком, у яких застосовані сучасні технології.

Однак, відомостей про застосування таких двигунів у складі електромеханічного обладнання автомобільної техніки досі немає [2 – 4]. Особливістю електрообладнання автомобілів є живлення переважно від бортової мережі 12 В, високі вимоги щодо масо-габаритних показників, надійності роботи в умовах підвищених вібрацій, широкому температурному діапазоні. В такому разі, актуальною слід вважати задачу розробки електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком для автомобільних застосунків, зокрема як виконавчого механізму допоміжних систем, таких як механізми склопідйомників, склоочисників, вентиляторів системи кондиціонування повітря та охолодження тощо.

Аналіз публікацій

Основні питання, що стосуються розробки та проектування електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком наведені у роботі [3]. У цій роботі також узагальнено результати виробництва та практичного використання основних типів цього типу двигунів. Наступною роботою, яка узагальнює основні етапи розвитку електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком, є робота [4], у якій також узагальнено питання електромагнітного моделювання, оптимізації та керування електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком. Робота спирається на 126 посилань.

Найбільш повний огляд поточного стану наукових та практичних досліджень стосовно електричних двигунів з друкованими обмотками наведено у роботі [5]. У цій публікації наведено 91 посилання на періодичні та інші види видань стосовно теми. Значна увага приділяється дослідженням впливу виду друкованої обмотки на характеристики електричної машини. У роботі [6] наведено результати дослідження різних типів одношарової хвильової обмотки, яка прийнята за

основу проектного двигуна. Інші типи друкованих обмоток також досліджені рядом авторів, наприклад [7 – 9].

Питання щодо будови збірок постійних магнітів роторів електричних машин з аксіальним магнітним потоком також розглядаються досить докладно у роботах [10 – 12]. У роботі [13], а також деяких інших, розглядається вплив форми поверхні постійних магнітів на характеристики електричних машин з аксіальним магнітним потоком. Особлива увага приділяється використанню у складі ротора збірок Хальбаха [14 – 15].

Серед вітчизняних публікацій за темою дослідження можна виділити лише роботу [16], що свідчить про недостатню участь вітчизняного наукового товариства у науковій та практичній діяльності щодо впровадження сучасних надбань світової електротехнічної галузі у вітчизняне виробництво.

Аналіз публікацій дозволяє визначити основні шляхи проектування, розробки, моделювання, дослідження та аналізу електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком, з постійними магнітами, друкованими обмотками у беззалізному (CL) виконанні.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є визначення можливості використання електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком як приводного двигуна автомобільних допоміжних систем на основі порівняння його розрахункових параметрів з параметрами двигунів традиційного виконання, у яких використовуються сучасні технології та матеріали.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обрати конструкцію електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком, яка дозволяє максимально реалізувати його питомі потужнісні та масо-габаритні характеристики стосовно автомобільного обладнання;
- розрахувати, згідно фізичних основ роботи та методик урахування особливостей конструкції, робочі параметри електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком заданої потужності з заданими електричними та масо-габаритними обмеженнями;
- порівняти отримані дані з існуючими пропозиціями від провідних виробників електротехнічного обладнання, в тому числі автомобільного призначення;
- зробити висновки про доцільність по-

дальших досліджень та розробок електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком для використання у складі автомобільного електромеханічного обладнання.

Розробка конструкції електричного двигуна

На рис. 1, а наведено креслення розрізу електричного двигуна з аксіальним збудженням від постійних магнітів, яке дозволяє пояснити його будову. Статор двигуна (1 на

рис. 1, а, а також рис. 1, в) являє собою немагнітну основу на якій методом друкованого монтажу нанесено мідні струмоведучі доріжки, по яким протікає струм двигуна. Ротор двигуна (3 на рис. 1, а) являє собою два диски, які розміщені з обох боків статора, на яких змонтовано збірки з постійних магнітів (2 на рис. 1, а, а також рис. 1, б). Ротор передає обертовий момент на вихідний вал двигуна 4, і з'єднаний з корпусом двигуна 6 через підшипники 5.

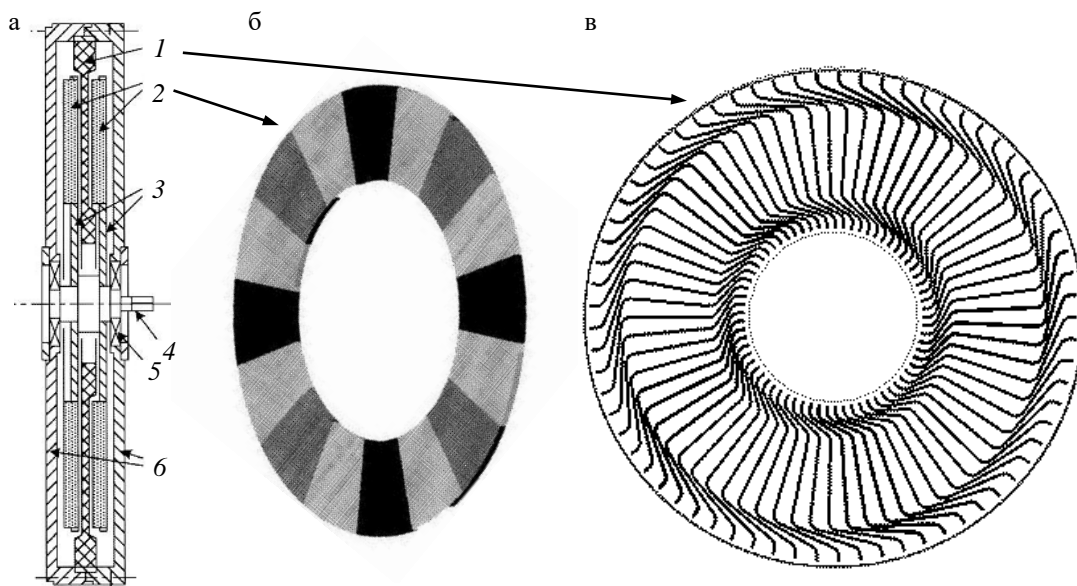


Рис. 1. Конструкція електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком

А ні статор, а ні ротор пропонуваної конструкції двигуна не містять феромагнітних елементів, призначених для створення шляху магнітного потоку, тому подібна будова є особливістю, яка визначає класифікаційну ознаку таких двигунів, через що їх розглядають як окремий підвид. Подібна конструкція визначає значне зменшення маси двигуна.

На рис. 2 наведено ілюстрацію, яка пояснює принцип побудови статора. Як було вказано раніше, на дискову поверхню статора методом друкованого монтажу нанесено струмовідні доріжки, які з'єднано таким чином, що вони утворюють хвилюву обмотку статора розподілену по окружності диску.

Причому друкований монтаж виконано з обох боків диску, що також визначає окрему класифікаційну ознаку, яка відносить таку друковану обмотку до двостороннього типу. Синім кольором на рис. 2 позначено провідники одного боку, а червоним – протилежного. Провідники різних боків статора з'єднані між собою у технологічних наскрізних отво-

рах, утворюючи зовнішню та внутрішню лобові частини обмотки.

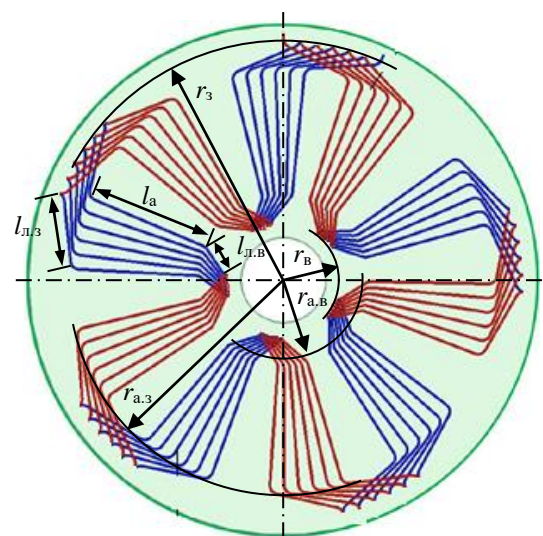


Рис. 2. Конструкція статора двигуна

На рис. 2 показано фазну обмотку, яка утворює $2p = 5$ пар полюсів, на кожний по-

люс доводиться $w_{\text{п}} = 6$ витків. Пропонований двигун отримуватиме живлення від трифазного джерела напруги, тому кількість фаз обмотки статора $m = 3$, тобто поверхня диску буде повністю заповнена провідниками (дивись рис. 1, в). Основні параметри обмотки статора: r_3 – зовнішній радіус обмотки, у ньому вміщаються зовнішні лобові частини обмотки довжиною $l_{\text{л.з}}$, активний провідник одного витка довжиною $l_{\text{а}}$, зовнішні лобові частини обмотки довжиною $l_{\text{л.в}}$; $r_{\text{а.з}}$ та $r_{\text{а.в}}$ – зовнішній та внутрішній радіуси активної зони статора, які визначають положення збірок постійних магнітів ротора; $r_{\text{в}}$ – внутрішній радіус обмотки.

Характеристики двигуна визначає будова обмотки статора, зокрема, активна довжина провідників, яка напряму впливає на радіус статора і, як наслідок, на зовнішній розмір самого двигуна. У даній роботі було прийнято обмеження по зовнішньому діаметру двигуна 100 мм.

Як прототип проєктованого двигуна взято двигун постійного струму потужністю 250 Вт та напругою живлення 12 В. Виходячи з цих даних можна приблизно визначити споживаний струм. Враховуючи, що у двигунах з друкованими обмотками величина допустимої густини струму у активних провідниках на рівні 30 – 40 А/мм², можна визначити площу поперечного перерізу провідника. У даному випадку це значення прийняте $s_{\text{пр}} = 0,7 \text{ мм}^2$. Для відомого значення перерізу можливо визначити ширину $h_{\text{пр}}$ та висоту $b_{\text{пр}}$ струмовідної доріжки обмотки. Внутрішній радіус обмотки $r_{\text{в}}$ при цьому має визначальний вплив. На рис. 3 показано ділянку обмотки на цьому радіусі, тут провідники максимально зближуються, і з врахуванням ізоляційних відстаней $a_{\text{із}}$, параметри обмотки повинні задовольняти рівності:

$$r_{\text{в}} = w_{\text{с}}(h_{\text{пр}} + a_{\text{із}}), \quad (1)$$

де $w_{\text{с}}$ – кількість струмовідних доріжок на одному боці статора.

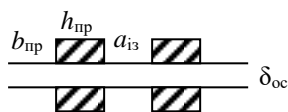


Рис. 3. Лобова частина обмотки статора на внутрішньому радіусі

Ізоляційні відстані $a_{\text{із}}$, прийняті у розрахунках 0,4 мм, потрібні не тільки для забезпечення електричної ізоляції, а і для забезпечення умов охолодження обмотки. Із врахуванням проведених розрахунків, прийнято $h_{\text{пр}} = 0,7 \text{ мм}$, $b_{\text{пр}} = 1 \text{ мм}$. При цьому, кількість полюсів статорної обмотки $2p = 5$, активних провідників на полюс $w_{\text{п}} = 4$.

З врахуванням обмеження по зовнішньому радіусу статора, довжина активного провідника $l_{\text{а}}$ склала 22 мм.

Також, на рис. 3 показано товщину основи статора $\delta_{\text{ос}}$, яка разом з $b_{\text{пр}}$ визначає його загальну товщину.

Оскільки двигун не має магнітопровідних елементів, постійні магніти, які розміщено на роторі сформовані у збірку Хальбаха, що дозволяє сконцентрувати більшість магнітного потоку у робочому повітряному зазорі. На рис. 4 показано варіанти збірок Хальбаха, які знайшли застосування у електричних двигунах, подібних до розроблюваного.

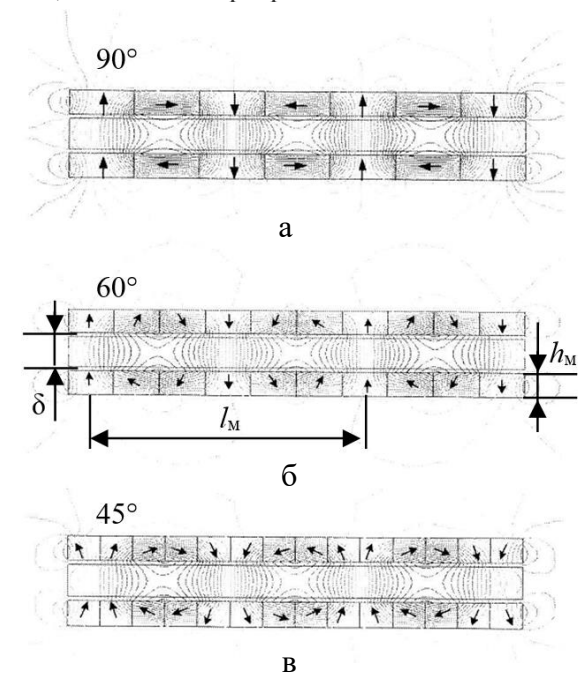


Рис. 4. Збірки Хальбаха для постійних магнітів ротора

Показано варіанти збірок 90°, 60° та 45° (рис. 4, а, б та в відповідно). Чорними стрілками показано вектори намагніченості окремих сегментів постійних магнітів. Як відомо з літератури, перехід від збірки 90° до 60° дозволяє збільшити величину магнітної індукції у зазорі на 8 – 15 %, перехід від збірки 60° до 45° дає набагато менший ефект, однак знижує технологічність, оскільки вимагає

застосування більшої кількості сегментів збірки та потребує більшої точності щодо напрямів їх намагнічення. У даній розробці обрано збірку 60°, яка містить 6 сегментів на довжину магнітної хвилі l_m , загальна кількість магнітних полюсів ротора $2p_p = 4$.

Довжину магнітної хвилі визначає активна поверхня статора, яка обмежена $r_{a.3}$ та $r_{a.в}$:

$$l_m = \pi(r_{a.3} + r_{a.в})/2p_p. \quad (2)$$

З довжини магнітної хвилі визначається стала збірки Хальбаха:

$$\beta = 2\pi/l_m. \quad (3)$$

В нашому випадку: $l_m = 0,045$ м, $\beta = 0,138$ 1/м.

Визначення параметрів електричного двигуна

Амплітуда магнітної індукції у робочому повітряному зазорі δ :

$$B_{m\delta} \approx B_r [1 - \exp(-\beta h_m)] \frac{\sin(\pi/n_m)}{\pi/n_m}, \quad (4)$$

де $B_r = 1,2$ – залишкова магнітна індукція постійного магніту (NdFeB); $h_m = 8$ мм – товщина збірки; $n_m = 6$ – кількість сегментів збірки Хальбаха.

Отримане значення $B_{m\delta} = 0,798$ Тл.

Магнітний потік у робочому повітряному зазорі:

$$\Phi_\delta = \alpha_i B_{m\delta} \frac{\pi}{2p_p} (r_{a.3}^2 - r_{a.в}^2) = 51 \text{ мкВб}, \quad (5)$$

де α_i – відношення діючого до максимального значення магнітної індукції у робочому повітряному зазорі.

Коефіцієнт розподілу обмотки статора:

$$k_{p1} = \frac{\sin(\pi/2m)}{q_1 \sin[\pi/(2mq_1)]} = 1,277, \quad (6)$$

де $q_1 = 2$ – кількість фазних сторін обмотки на полюс.

Коефіцієнт скосу обмотки статора:

$$k_{c1} = \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right) = 0,999. \quad (7)$$

Коефіцієнт обмотки статора:

$$k_{w1} = k_{p1} k_{c1} = 1,277. \quad (8)$$

Стала ЕРС статорної обмотки:

$$k_E = \pi\sqrt{2} p w_1 k_{w1} \Phi_\delta = 0,087, \quad (9)$$

де w_1 – кількість активних провідників обмотки на фазу:

Стала крутного моменту:

$$k_M = \frac{m}{\sqrt{2}} p w_1 k_{w1} \Phi_\delta = 0,041. \quad (10)$$

ЕРС обмотки при частоті обертання n :

$$E = k_E n = 1,44 \text{ В}. \quad (11)$$

Електромагнітний момент двигуна при максимальному діючому струмі I :

$$M_e = k_M I = 0,086 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (12)$$

Електромагнітна енергія двигуна:

$$P_e = 2\pi n M_e = 252,5 \text{ Вт}. \quad (13)$$

Втрати двигуна

Втрати у обмотці, рахуючи, що при живленні від трифазного інвертора кожний момент часу струм протікає по двом фазним обмоткам статора, і беручи до уваги, що обмотка, крім активної ділянки, включає лобові частини ($l_1 = l_a + l_{л.з} + l_{л.в}$):

$$\Delta P_e = 2I^2 R_1 = 21,57 \text{ Вт}, \quad (14)$$

де $R_1 = \rho l_1 / s_{пр} = 0,025$ Ом – опір фазної обмотки статора; ρ – питомий опір міді.

Втрати на вихрові струми у прямокутних провідниках статора, визначені за формулою:

$$\Delta P_v = \frac{\pi^2}{3} \frac{1}{\rho d} f^2 b_{пр}^2 m_{пр} [B_{mx1}^2 + B_{mz1}^2] \eta_v^2, \quad (15)$$

склали 0,73 Вт. Їх величина залежать від квадрату робочої частоти струму f , квадратів нормальної та тангенціальної складових магнітного потоку B_{mx} та B_{mz} , коефіцієнту викривлення η_v , який враховує вищі гармонійні

складові магнітного потоку, а також питомої маси провідникового матеріалу d та загальної маси проводу $m_{пр}$.

Втрати на тертя у підшипниках визначені за формулою:

$$\Delta P_{\pi} = 0,06k_{т.п} (m_p + m_o) n, \quad (16)$$

де $k_{т.п}$ – коефіцієнт втрат у підшипниках, m_p – загальна маса ротора, m_o – маса осі (вихідного вала двигуна). Склали 0,61 Вт.

Вентиляційні втрати обертання ротора:

$$\Delta P_{вент} = \frac{1}{2} c_f d_{пов} (2\pi n)^3 (r_3^5 + r_o^5), \quad (17)$$

де $c_f = \frac{3,87}{\sqrt{Re}}$ – коефіцієнт опору турбулент-

ному потоку; $Re = \frac{2\pi n d_{пов} r_3^2}{\mu}$ – число Рейно-

льдса для обертового диску; $d_{пов}$ та $\mu_{пов}$ – питома густина та в'язкість оточуючого середовища (повітря); r_o – радіус осі (вихідного вала двигуна). Склали 0,04 Вт.

Використовуючи визначені раніше параметри можна визначити вихідну потужність двигуна:

$$P_{вих} = P_e - \Delta P_{\pi} - \Delta P_{вент} = 251,88 \text{ Вт.} \quad (18)$$

Вихідний крутний момент на валу двигуна, який забезпечується на робочій частоті обертання:

$$M_{вих} = \frac{P_{вих}}{2\pi n/60} = 0,86 \text{ Н·м.} \quad (19)$$

Вхідна споживана потужність, яка враховує електричну складову втрат:

$$P_{вх} = P_e + \Delta P_e + \Delta P_v = 274,8 \text{ Вт.} \quad (20)$$

Коефіцієнт корисної дії двигуна:

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = 0,91. \quad (21)$$

Аналіз отриманих результатів

У табл. 1 наведено отримані значення основних параметрів пропонованої конструкції електричного двигуна з параметрами прототипу традиційного виконання, наприклад

[17]. З аналізу табл. 1 видно, що при тій самій потужності та при практично однаковому крутному моменті, розрахований двигун має вищі масо-габаритні показники.

Таблиця 1. Порівняння характеристик

Двигун	P , Вт	$M_{вих}$, Н·м	$D_{зов}$, мм	$L_{ос}$, мм	M , кг
Розрахований	250	0,86	100	36	0,9
Прототип	250	0,80	65	130	1,95

Маса розрахованого двигуна складає 46 % маси прототипу. При зовнішньому діаметрі на 54 % більшому від прототипу, осьова довжина розрахованого двигуна менша на 73 %. Об'єм розрахованого двигуна у 2,34 рази менший об'єму прототипу.

Висновки

За результатами дослідження можна дійти до висновку, що використання електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком в якості виконавчих механізмів автомобільних електромеханічних систем, зокрема систем приводу склопідійомників, склоочисників, вентиляції, кондиціонування повітря та охолодження, є доцільним та обґрунтованим. Маючи кращі масо-габаритні показники, такі двигуни, при використанні сучасних досягнень науки та технологій, забезпечують такі самі енергетичні характеристики як і електричні двигуни традиційної конструкції.

У роботі наведено опис конструкції пропонованого електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком, визначено особливості його будови на основі досягнень сучасних технологій та наукових досліджень щодо подібного типу двигунів.

З використанням методів та алгоритмів розрахунку електричних машин, які враховують особливості характеристик та фізичних процесів у аксіальних машинах, друкованих обмотках, збірках постійних магнітів, проведено розрахунки основних характеристик електричного двигуна пропонованої конструкції.

Проведено порівняння отриманих характеристик проектного двигуна з характеристиками сучасного прототипу традиційної будови. На підставі порівняння визначено, що проектований двигун має кращі масо-габаритні показники при збереженні енергетичних характеристик. На підставі чого зроблено висновок про доцільність використання електричних двигунів з аксіальним ма-

гнітним потоком як виконавчих органів автотранспортних засобів.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Versèle, C., Grève, Z.D., Vallée, F., Hanuise, R., Deblecker, O., Delhay, M., & Lobry, J. (2009). Analytical design of an axial flux permanent magnet in-wheel synchronous motor for electric vehicle. 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 1-9.
2. Гнатів, А. В. Будова гібридних автомобілів і електромобілів: конспект лекцій [Електронний ресурс] / А. В. Гнатів ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т., Харків, 2021. 72 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/4797>. Hnatov, A. V. Budova hibrydnykh avtomobiliv i elektromobiliv: konspekt lekttsii. [Structure of hybrid cars and electric cars: lecture notes] [Elektronnyi resurs] / A. V. Hnatov ; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Kharkiv. nats. avtomob.-dor. un-t., Kharkiv, 2021. 72 s.
3. Gieras, J.F., Wang, R.J., Kamper, M.J.: 'Axial flux permanent magnet brushless machines' (Springer Netherlands, Netherlands, 2004, 2nd edn. 2008), doi:10.1007/978-1-4020-8227-6.
4. Hao Z, Ma Y, Wang P, Luo G, Chen Y. A Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Motors: Topological Structures, Design, Optimization and Control Techniques. *Machines*. 2022; 10(12):1178. <https://doi.org/10.3390/machines10121178>.
5. Omolbanin T., Seyed M.M. 'Design aspects, winding arrangements and applications of printed circuit board motors: a comprehensive review', *IET Electr. Power Appl.*, 2020, Vol. 14 Iss. 9, pp. 1505-1518, doi: 10.1049/iet-epa.2020.0141/
6. Paul, S., Farshadnia, M., Pouramin, A., Fletcher, J.E., & Chang, J. (2019). Comparative analysis of wave winding topologies and performance characteristics in ultra thin printed circuit board axial flux permanent magnet machine. *IET Electric Power Applications*, doi: 10.1049/iet-epa.2018.5417.
7. M. D. Noh, J. Kim and Y. -W. Park, "Comparisons of Concentrated Printed-Circuit Stator Windings for Axial Flux Permanent Magnet Machines," 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Hong Kong, China, 2019, pp. 229-234, doi: 10.1109/AIM.2019.8868912.
8. Wang, X., Lou, F., Li, C.: 'Optimization design of PCB winding for axial flux permanent magnet synchronous motor', *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proc. Chin. Soc. Electr. Eng.*, 2017, 37, pp. 6092–6100, doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.161105.
9. Xia, B., Shen, J., Luk, P.C., et al.: 'Comparative study of air-cored axial-flux permanent-magnet machines with different stator winding configurations', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2015, 62, (2), pp. 846–856, doi: 10.1109/TIE.2014.2353012.
10. Aydin, M., Huang, S., Lipo, T.A.: 'Axial flux permanent magnet disc machines: a review'. *Proc. of the SPEEDAM, Italy*, 2004, pp. 61–71.
11. Verbeek, N., Dehez, B.: 'Comparison of inner and outer rotor configurations in slotless PM machines with PCB windings'. 2019 IEEE Int. Electric Machines & Drives Conf. (IEMDC), San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1–7, doi 10.1109/IEMDC.2019.8785408.
12. Radwan-Pragłowska, N.: 'Impact of permanent magnets shape and arrangement for selected parameters in coreless axial flux generator'. 2018. *Int. Symp. on Electrical Machines (SME)*, Andrychów, Poland, 2018, pp. 1–6, doi:10.1109/ISEM.2018.8442975.
13. S. Ali, G. Rubino, L. Ciprini, R. Ali and F. Marignetti, "Comparative Study Among Different Rotor Topologies of Axial Flux Permanent Magnet Machines," 2022 Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART), Cassino, Italy, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SMART55236.2022.9990232.
14. Wang, X., Li, X., Li, C., et al.: 'Design of a PCB stator coreless axial flux permanent magnet synchronous motor based on a novel topology Halbach array', *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.*, 2019, 20, (3), pp. 414–424, doi: 10.1631/FITEE.1700345.
15. Huang R, Liu C, Song Z, Zhao H. Design and Analysis of a Novel Axial-Radial Flux Permanent Magnet Machine with Halbach-Array Permanent Magnets. *Energies*. 2021; 14(12):3639. <https://doi.org/10.3390/en14123639>.
16. Grebenikov, V., Gamaleya, R.V., & Sokolovsky, A.N. Electric machine with axial magnetic flux, permanent magnets and multilayered printing windings. *Tekhnichna Elektrodynamika*. Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine. No 2, 2020, pp. 28 – 35, <https://doi.org/10.15407/teched2020.02.028>.
17. Neodymium Rare Earth Magnet Motor ND Catalog. https://www.transtecno.com/wordpress/wp-content/uploads/2023/04/B_ND-Neodymium-DC-electric-motors_230214_0223.pdf.

Нечаус Андрій Олександрович¹, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільної електроніки, e-mail: a.nechaus@gmail.com, тел. +38 067-777-02-24, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8833-0802>

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

Calculation of the parameters of an axial flux motor as an actuator of automotive systems

Abstract. Problem. Axial flux electric motors offer several significant advantages compared to electric motors of traditional design. Currently, scientific periodicals contain numerous publications regarding the development and use of axial flux electric motors with printed windings across various fields. These include applications such as HDD-drives in computer technology, fans and pumps of various capacities, propulsion systems for bicycles and motorcycles, including in-wheel motors, manipulator drives for machine tools and industrial robots, and even within space technologies. Research confirms the high efficiency and size-to-weight ratios of axial flux motors when modern technologies are employed. However, there is little information available regarding the application of such motors in automotive electromechanical equipment. A distinctive feature of automotive electrical systems is their predominantly 12 V onboard power supply, along with high demands on size-to-weight ratios and reliability in conditions of elevated vibrations and wide temperature ranges. In this context, the development of an axial flux motor for automotive applications becomes relevant, particularly as an actuating mechanism for auxiliary systems such as window lifters, windshield wipers, air conditioning, and cooling fans, etc. **Goal.** The goal of the article is to determine the feasibility of using an axial flux electric motor as an actuator for automotive auxiliary systems by comparing its calculated parameters with the parameters of motors of traditional design using modern technologies and materials. **Methodology.** The methods and algorithms used for the calculation of electric machines take into account the characteristics and

physical processes specific to axial flux machines with printed windings and permanent magnet arrays. **Results.** A comparison of the obtained characteristics of the designed motor with the characteristics of a modern prototype of traditional design was conducted. Based on the comparison, it was determined that the designed motor has better size-to-weight ratios while maintaining energy performance. Consequently, a conclusion was drawn about the feasibility of using electric motors with axial flux as actuators for automotive auxiliary systems. **Originality.** The prototype of the designed motor is considered to be a 250 W DC motor with a supply voltage of 12 V. The imposed constraint on the external diameter of the designed motor is set to 100 mm. **Practical value.** At the same output power and nearly identical torque, the calculated motor exhibits higher size-to-weight ratios. The weight of the calculated motor is 46% of the weight of the prototype. With an external diameter 54% larger than the prototype, the axial length of the calculated motor is 73% smaller. The mass of the calculated motor is 2.34 times smaller than the mass of the prototype.

Key words: axial flux motor, permanent magnet motor, printed circuit board motor, Halbach-array, automotive equipment

Andrii Nechaus¹, Ph.D., Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department,
tel. +38 067-777-0224, a.nechaus@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8833-0802>

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

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.

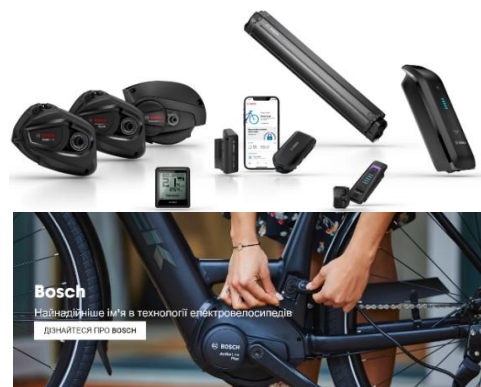


Рис. 2. Система приводу Bosch Smart System та її комплектуючі

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 електроприводу для легкого персонального електричного транспортного засобу

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

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

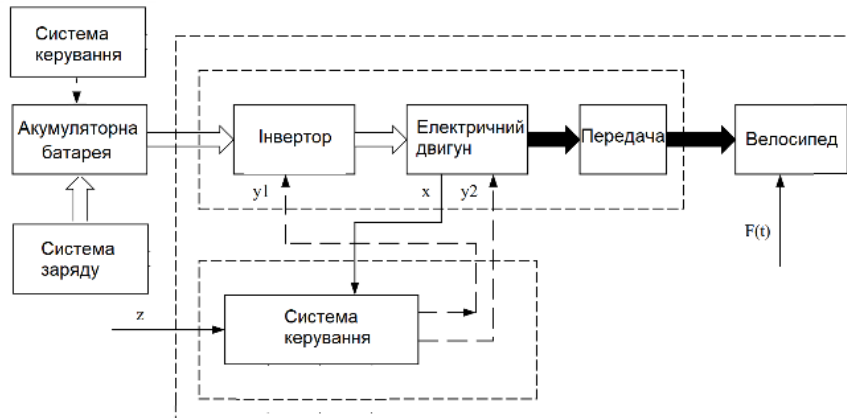


Рис. 3. Схема функціональна електропривода легкого персонального ЕТЗ

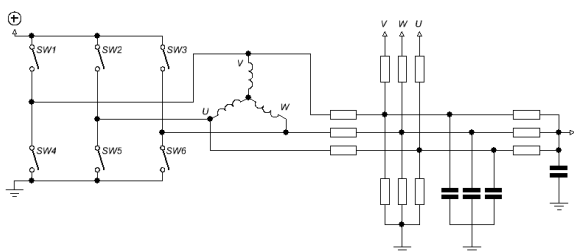


Рис. 4. Електрична принципова схема підключення тягового двигуна

Обертаючись, двигун наводить зворотну ЕРС у вільній обмотці. При обертанні напруга на вільній фазі змінюється. Вимірюючи напругу на вільній фазі, можна визначити момент перемикання 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 – дільники 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 дільники 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.

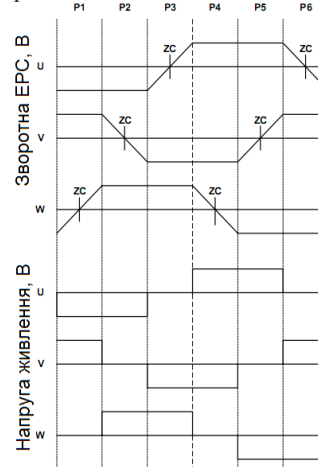


Рис. 5. Часова діаграма комутацій

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 знизатись, 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 засобів 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 використовується 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].

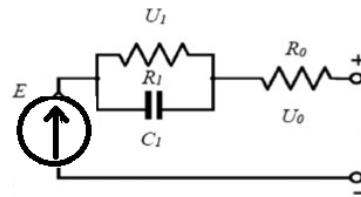


Рис. 9. Модель електрична еквівалентної схеми акумулятора

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.

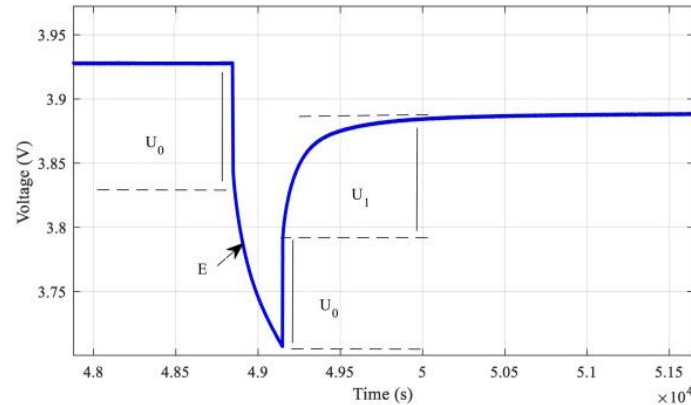


Рис. 10. Типовий графік часткового розряду модуля акумуляторів Nissan Leaf

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: smirnov1oleg@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, smirnov1oleg@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.

Ефективність енергогенеруючих плиток з різними типами мультиплікаторів

Аргун Щ. В.¹, Гнатів А. В.¹, Сохін П. А.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. У статті аналізується ефективність енергогенеруючих плиток, обладнаних мультиплікаторами з косозубими та прямозубими шестернями, в умовах їх використання у пішохідних зонах для генерації електроенергії з механічної енергії кроків. В ході дослідження було розроблено та проведено експериментальні випробування двох типів енергогенеруючих плиток з метою визначення оптимальної конфігурації мультиплікатора для максимізації вироблення електроенергії. Результати експериментів показали, що плитки з прямозубими мультиплікаторами забезпечують вищу ефективність генерації енергії порівняно з плитками з косозубими мультиплікаторами. Окрім того, було виявлено, що величина генерованої енергії залежить не лише від типу мультиплікатора, а й від динаміки кроку та способу взаємодії людини з плиткою. Дослідження вносить вклад у розвиток енергоефективних технологій та відкриває перспективи для подальших розробок у сфері використання альтернативних джерел енергії в урбанізованому середовищі.

Ключові слова: енергогенеруючі плитки, мультиплікатори, косозубі шестерні, прямозубі шестерні, генерація електроенергії, альтернативні джерела енергії.

Вступ

У контексті сучасних викликів зміни клімату та необхідності зменшення вуглецевого сліду глобальна спільнота постійно шукає інноваційні рішення для забезпечення сталого розвитку. Одним із напрямів, що викликає значний інтерес, є розробка та впровадження технологій, здатних перетворювати механічну енергію людини на електричну. Використання енергогенеруючих плиток у пішохідних зонах може стати одним з рішень цієї проблеми, пропонуючи альтернативний спосіб виробництва відновлюваної енергії з мінімальними витратами та впливом на довкілля. Такі технології мають потенціал не лише забезпечити додаткове джерело електроенергії для міських потреб, а й сприяти розвитку енергоефективних рішень для громадських просторів. Впровадження енергогенеруючих плиток стимулює подальші дослідження та розробки в області екологічних технологій, відкриваючи нові можливості для підвищення стійкості міських екосистем і покращення якості життя мешканців. Отже, розробка оп-

тимальних конструкцій та механізмів для ефективного перетворення механічної енергії на електричну є актуальним завданням сучасної наукової спільноти.

Аналіз публікацій

Виклики, пов'язані з потребою в стійких джерелах енергії та зниженням залежності від викопних ресурсів, акцентують увагу на необхідності впровадження електротранспорту [1,2] та розробки інноваційних пристроїв для генерації електричного струму. Ці пристрої мають здатність перетворювати енергію, отриману з природних джерел, таких як сонячне світло, вітер та кінетика людського руху, на електричну енергію, що є ключем до підвищення енергоефективності [3].

Наголос на значенні інновацій, які трансформують міську інфраструктуру, сприяючи екологічно чистому розвитку, зробили автори роботи [4]. Вони досліджують, як новітні технічні рішення можуть оптимізувати повсякденне життя в містах.

Загалом, огляд сучасних наукових робіт

вказує на постійне зростання інтересу до використання інноваційних технологій для розвитку транспортної інфраструктури на принципах сталості. Зокрема, застосування енергогенеруючих плиток, які перетворюють кінетичну енергію пересування людей у міському середовищі на електрику, відкриває передові перспективи для забезпечення міст додатковими джерелами відновлюваної енергії. Дослідження [5] демонструє можливості для підвищення продуктивності таких плиток шляхом удосконалення їх конструкції.

Інноваційні підходи, як-от розробка плиток [6], що активно збирають кінетичну енергію за допомогою електромагнітних технологій для перетворення рухів людей на електричний струм, та експерименти з п'єзоелектричними технологіями [7–10], підкреслюють величезний потенціал інтеграції таких систем у повсякденне життя. Також, дослідження [11,12] вивчають використання п'єзоелектричних плиток у громадських приміщеннях та їх вплив на енергозбереження в будівлях у Малайзії.

Розробка [13], що дозволяє перетворювати механічний тиск на електричну енергію, демонструє потенціал п'єзоелементів у публічних просторах для збільшення обсягів вироблення чистої енергії.

Публічно доступні дослідження [14,15], що показують успішні приклади впровадження таких технологій, стимулюють нові наукові розробки та інновації у цій сфері. Огляд доступних технологій та комерційних пристроїв для збору енергії відкриває широкі можливості для подальших інновацій в області сталого енергопостачання.

Розробка інтегрованих систем для міського транспорту, що включають енергогенеруючі плитки [16], та аналіз економічно ефективних рішень для електричних плиток, чутливих до незначних вібрацій, підтверджують можливість широкого застосування цих технологій в різних середовищах і під різним навантаженням.

Використання зеленої енергії для освітлення велодоріжок [17] та інноваційні підходи до збору енергії в місцях з високою концентрацією пішохідного трафіку, як описано у розробці [18], підтверджують високу ефективність таких систем у міському середовищі. Ці технології не лише сприяють збільшенню виробництва відновлюваної енергії, але й відіграють важливу роль у формуванні

сталого міського простору.

Застосування п'єзоелектричних плиток як елемента сталого дизайну, що сприяє зменшенню споживання енергії [19], вказує на ключову роль сучасних технологій у процесах екологічного будівництва та архітектури. Це дозволяє не тільки оптимізувати використання енергії, але й значно знизити вуглецевий вплив міської інфраструктури.

Огляд наукових робіт свідчить про непересічний інтерес до використання енергогенеруючих плиток у якості інструменту для вирішення екологічних викликів, покращення стійкості міської інфраструктури та забезпечення ефективної альтернативи традиційним джерелам енергії. Продовження розвитку та інтеграція таких технологій є важливим кроком до досягнення цілей сталого розвитку, підвищення енергонезалежності міст та поліпшення якості життя їх мешканців.

Таким чином, енергогенеруючі плитки являють собою інноваційне рішення, яке дозволяє перетворювати енергію руху в електричний струм, відкриваючи шлях для їх використання в місцях з високою концентрацією людей. Різноманітність типів таких плиток, включаючи п'єзоелектричні та електромагнітні, забезпечує гнучкість у виборі найбільш підходящого варіанту для конкретних умов експлуатації. Важливим аспектом є врахування всіх переваг та обмежень кожного типу плиток для досягнення максимальної ефективності та економічної вигоди від їх впровадження.

Мета та постановка задачі

Мета дослідження полягає у порівняльній оцінці ефективності енергогенеруючих плиток з мультиплікаторами різних конструктивних типів для визначення оптимальної конструкції, яка дозволить отримувати максимум електроенергії в умовах їх експлуатації у пішохідних зонах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробка та створення експериментальних зразків енергогенеруючих плиток з двома типами мультиплікаторів: косозубим та прямозубим;

- проведення серії експериментальних випробувань для оцінки ефективності генерації електроенергії обома типами плиток за однакових умов використання;

– аналіз впливу конструктивних особливостей мультиплікаторів на кількість генерованої електроенергії, включаючи оцінку залежності від динаміки кроку та способу взаємодії людини з плиткою;

– вивчення потенціалу застосування розроблених енергогенеруючих плиток в урбанізованому середовищі для підвищення стійкості міських екосистем та ефективного використання міського простору;

– розробка рекомендацій щодо впровадження ефективних енергогенеруючих плиток у міські інфраструктурні проекти на основі отриманих результатів дослідження.

Енергогенеруюча плитка із мультиплікатором на основі косозубих шестерень

Принцип роботи енергогенеруючої плитки (ЕП) полягає у наступному. Людина наступає на ЕП, викликаючи механічний рух в шестернях мультиплікатора. Механічний рух перетворюється на обертальний рух, який передається кроковим двигунам, підключеним до

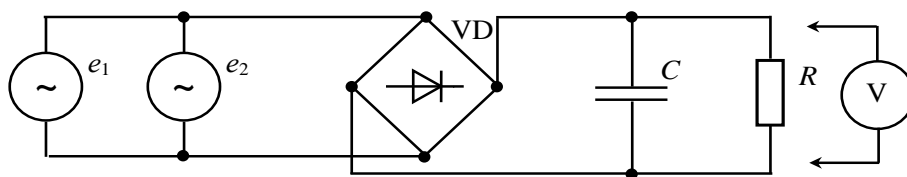


Рис. 1. Схема електрична енергогенеруючої плитки

Енергогенеруюча плитка включає в себе електромашинний вузол із двома кроковими двигунами (КД), які підключені паралельно відносно електричного навантаження, а отже, функціонують за схемою паралельного з'єднання на однакове навантаження.

У ході досліджень на енергогенеруючій плитці особлива увага зосереджується на аналізі електричних параметрів, генерованих кроковими двигунами (КД), рис. 2. Вимірювання напруги, яка з'являється на активному опорі R із статорної обмотки КД, дає змогу детально розглянути процеси всередині системи. Вивчення змін напруги у часі, $u=f(t)$, за заданого опору навантаження, дозволяє використовувати закон Ома для визначення як змінюється згенерована потужність з часом, $P=f(t)$, що є вирішальним для оцінки ефективності генерації енергії [20]:

$$u(t) = R \cdot i(t), \quad (1)$$

плитки. При цьому крокові двигуни працюють як генератори, перетворюючи механічну енергію на електричну.

Ця ЕП представляє собою інноваційне рішення для інтеграції різних електромеханічних модулів з метою вироблення електричного струму. Ці модулі можуть бути укомплектовані набором крокових моторів або об'єднаними у єдиний блок з декількома електромоторами. Ключовим аспектом дослідження є аналіз впливу кількості електромоторів в такому блоку на обсяги виробленої енергії.

Електрична схема енергогенеруючої плитки, яка ілюструє її конструкцію та принцип роботи, представлена на рис. 1. На основі цієї схеми було розроблено експериментальний прототип, показаний на рис. 2, що забезпечило можливість проведення практичних випробувань і експериментів. Це дозволило визначити найбільш ефективну конфігурацію електромеханічних елементів для оптимізації вироблення електроенергії.

де $u(t)$ – змінна напруга, В; R – активний опір навантаження, Ом; $i(t)$ – змінний струм, А.

Миттєва потужність P , що виділяється на опорі навантаження, може бути виражена через величини напруги та струму:

$$P = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}; \quad (2)$$

$$u = u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u);$$

$$i = i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

де P – миттєва потужність, Вт.

Відомо, що для резистора $\psi_u = \psi_i$, тоді для потужності p отримаємо:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_u). \quad (3)$$

З рівняння (3) видно, що миттєва потужність завжди більше нуля і змінюється у часі.

Оскільки миттєва потужність варіюється, для аналізу ефективності системи часто використовується середня за період T потужність, яка визначається шляхом інтегрування функції $P=f(t)$ за часом:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{U_m I_m}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t + \psi_u) dt. \quad (4)$$

Інтегруючи отримані графіки $p = f(t)$, можна визначити обсяг виробленої потужності. На рис. 2 представлено експериментальний прототип ЕП. Цей зразок забезпечує можливість детального аналізу функціонування крокових двигунів, як окремо, так і у груповому режимі на спільне навантаження. Дизайнерські рішення та можливість проведення всебічних тестів кожного двигуна індивідуально або в поєднанні з іншими, розкривають великий потенціал для дослідження та вдосконалення енергогенеруючих систем. Це допомагає покращити їх загальну продуктивність і виробничі показники.



а



б

Рис. 2. Енергогенеруюча плата з косозубим типом зубчатих коліс у мультиплікаторі: а – зовнішній вигляд; б – електромашинний вузол

Експериментальні дослідження електромашинного вузла ЕП

Експериментальні дослідження електромашинного вузла енергогенеруючої плати були виконані з метою оцінки ефективності використання одного або двох крокових двигунів (КД) у її конструкції. Основна мета цих

експериментів полягає у визначенні доцільності застосування двох КД у електромашинному вузлі та оцінці обсягів електроенергії, згенерованої ЕП при одноразовому натисканні на неї.

Експериментальні умови включали в себе наступні пункти:

– дослідження роботи електромашинного вузла ЕП при підключенні одного крокового двигуна;

– дослідження роботи електромашинного вузла ЕП при одночасному підключенні двох крокових двигунів.

У відповідності до електричної схеми, рис. 1, в обох випадках було визначено опір навантаження $R=18$ Ом. Це дозволило здійснювати точні вимірювання напруги на опорі навантаження за допомогою цифрового вольтметра V та розрахунок струму навантаження відповідно до закону Ома. На основі отриманих даних про напругу та струм проводився розрахунок потужності, що виділяється на опорі навантаження.

Для підвищення точності результатів, експерименти були розділені на 100 серій, кожна з яких включала 30 кроків на ЕП. У дослідженні брали участь 10 осіб з масою тіла від 50 до 90 кг. Темп та швидкість кроків були встановлені таким чином, щоб відповідати звичайному темпу ходьби зі швидкістю 5 км/год.

В ході експерименту кожен крок генерував два імпульси напруги: перший імпульс фіксувався під час переміщення верхньої кришки системи генерації електроенергії вниз під впливом зовнішньої ваги, а другий – коли верхня кришка поверталася вгору під дією пружин, до яких вона була прикріплена. На рис. 3 показано хід експериментальних досліджень.

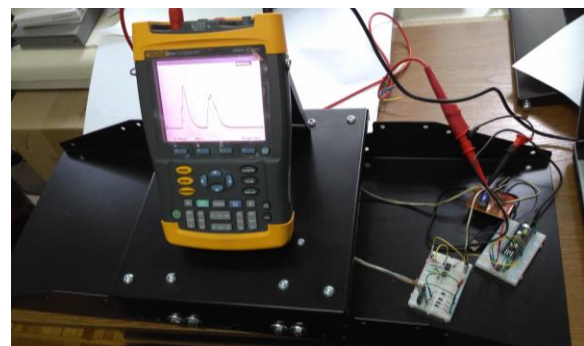


Рис. 3. Хід експериментальних досліджень енергогенеруючої плати

Розрахунок згенерованої потужності проводився шляхом інтегрування вимірних осцилограм напруги як функції від часу, $u=f(t)$, що дозволило отримати графік згенерованої потужності в залежності від часу, відповідно до виразів (2) та (4).

Інтегрування осцилограм проведено у відповідності до методу трапецій [5]:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{2} \times \left(f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n) \right), \quad (5)$$

де $[a; b]$ – відрізок (межі) інтегрування; $h = \frac{a-b}{n}$ – крок розбиття; $i = 0, 1, \dots, n$; $f(x)$ – значення підінтегральної функції.

Вираз (5), може бути записаний у вигляді:

$$P = \int_0^T p(t)dt \approx \frac{h}{2} \times \left(p(t_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} p(t_i) + p(t_n) \right). \quad (6)$$

У відповідності до виразу (6) проведемо інтегрування вимірних осцилограм $u = f(t)$.

На рис. 4 представлено отриману графічну залежність $p = f(t)$ при одному кроці на ЕП. Графіки, рис. 4(а, в) відповідають руху пішоходів у прямому напрямку, графіки рис. 4(б, г) – у зворотному напрямку.

На рис. 5 представлено отриману графічну залежність $p = f(t)$ при 30 кроках на ЕП з косокубим типом зубчастих коліс.

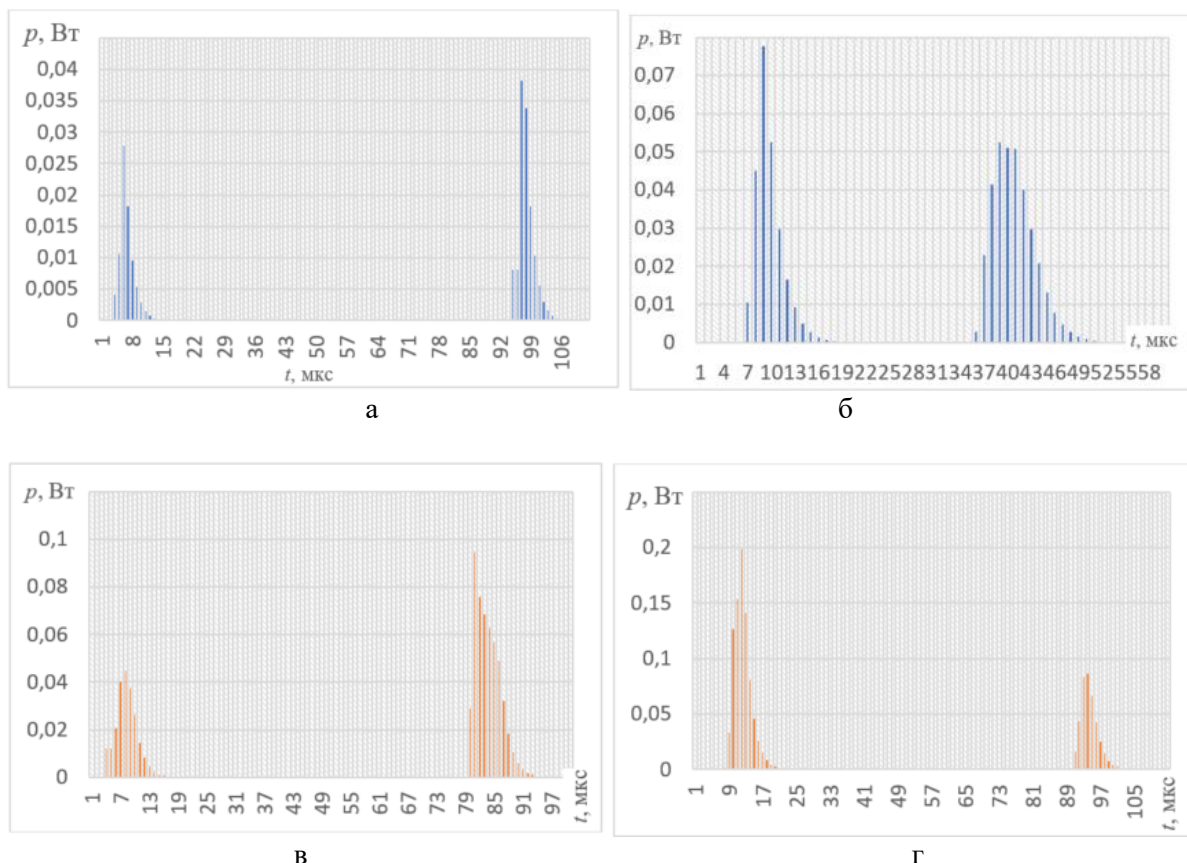
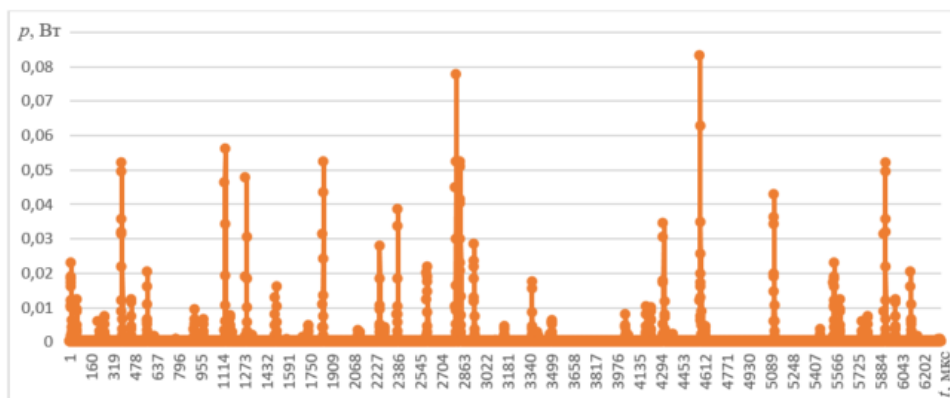
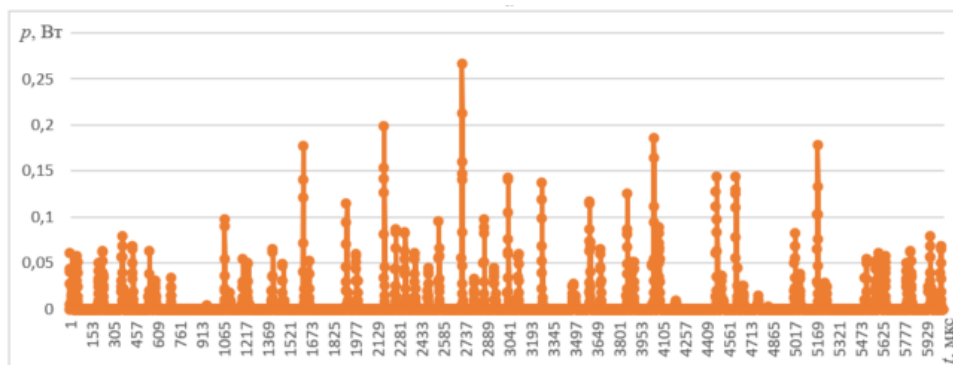


Рис. 4. Залежність генерованої потужності від часу при одному кроці на ЕП: а, б – при підключенні одного КД; в, г – при підключенні двох КД



а



б

Рис. 5. Залежність згенерованої потужності від часу при тридцяти кроках на ЕП з косозубим типом зубчастих коліс: а – при підключенні одного КД; б – при підключенні двох КД

Таблиця 1 – Значення згенерованої потужності ЕП та мультиплікатором з косозубим типом зубчастих коліс

	Серії по 30 кроків									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Прямий напрямок										
1 КД, Вт	10,59	9,96	10,88	9,13	9,32	10,66	11,30	11,91	10,13	10,61
2 КД, Вт	22,26	23,59	22,90	22,88	20,16	23,12	20,38	21,87	22,54	23,29
Коефіцієнт посилення, k	2,10	2,37	2,10	2,50	2,16	2,17	1,80	1,84	2,23	2,19
Зворотній напрямок										
1 КД, Вт	7,24	6,93	7,08	7,16	6,30	6,73	8,48	6,62	7,40	7,06
2 КД, Вт	12,88	11,86	12,21	14,28	12,14	12,07	16,26	13,03	13,92	12,58
Коефіцієнт посилення, k	1,78	1,71	1,72	2,00	1,93	1,79	1,92	1,97	1,88	1,78

Значення генерованої потужності, які були розраховані на основі обробки даних експериментальних досліджень згідно з формулою (6) для перших десяти серій по 30 кроків на ЕП, представлено в таблиці 1. В таблиці використовується коефіцієнт посилення k , який ілюструє, у скільки разів потужність, генерована ЕП з двома підключеними кроковими двигунами, перевищує потужність з

одним двигуном.

Щоб експеримент максимально відтворював реальні умови, вплив на енергогенеруючій плитці здійснюють як у прямому, так і в оберненому напрямках. Це обумовлено рухом пішоходів по тротуару, які можуть ступати на плитку з різних боків, що для зручності умовно називаємо прямим і оберненим напрямками.

Аналіз ефективності енергогенеруючої плиткі із застосуванням мультиплікатора з прямозубими шестернями

Аналіз роботи енергогенеруючої плиткі з мультиплікатором, що використовує косозубі зубчаті колеса, показав відносно низьку продуктивність у виробництві електроенергії. Попереднє дослідження натякає на те, що причиною зниження продуктивності може бути саме застосування косозубого з'єднання в механізмі мультиплікатора. Тому була розроблена нова версія мультиплікатора з прямозубими зубчатими колесами для покращення працездатності ЕП і збільшення її ефективності у виробництві електричного струму. За новою конструкцією ЕП та враховуючи проєктований мультиплікатор з прямозубими зубчатими колесами, було сконструйовано експериментальний зразок ЕП. Зовнішній вигляд цієї енергогенеруючої плиткі та конструкція її електромашинного вузла зображені на рис. 6.



а



б

Рис. 6. Енергогенеруюча плиткі: а – зовнішній вид; б – мультиплікатор з прямозубими шестернями

Конструкція розробленої енергогенеруючої плиткі дозволяє дослідити роботу кожного крокового мотора як окремо, так і їх колективну роботу в паралельній схемі для виробництва електроенергії. Мета цього експерименту полягає в оцінці ефективності використання двох крокових двигунів як генераторів

електроенергії у складі електромашинного вузла та визначенні кількості енергії, генерованої енергогенеруючою плиткою з прямозубим мультиплікатором при одному обороті.

Основні цілі та параметри експерименту охоплюють:

- оцінку можливості виробництва електроенергії енергогенеруючою плиткою з прямозубим мультиплікатором при включенні одного крокового двигуна в електромашинний вузол;

- вивчення потенціалу генерації електроенергії плиткою при паралельній роботі двох крокових двигунів;

- визначення кількості електроенергії, виробленої плиткою з прямозубим мультиплікатором при обороті в обох напрямках.

Опір навантаження R (рис. 1), становить 18 Ом. Використання вольтметра V для вимірювання напруги на шунті R дозволяє розрахувати струм навантаження i , відповідно, потужність, що виділяється на цьому опорі.

Умови проведення експерименту з прямозубим мультиплікатором відповідають умовам, що були застосовані при дослідженні плиткі з косозубим зубчатим з'єднанням, що забезпечує однорідні умови для порівняльного аналізу результатів.

На рис. 7 представлені графіки тиску p від часу t для одного кроку на плитці, активованій одним і двома кроковими двигунами. Графіки, позначені як рис. 7,а та 7,в, відображають рух у прямому напрямку, а рис. 7,б та 7,г – у зворотному.

Рис. 8 демонструє графічну залежність $p = f(t)$ за 30 кроків на плитці з прямозубим мультиплікатором. Кількість електроенергії, генерованої на шунті плиткі, розраховується згідно з формулою (6) для десяти експериментальних серій по 30 кроків кожна. Результати розрахунків зведено в таблиці 2.

Обробка даних, отриманих під час експериментального аналізу, показала, що енергогенеруюча плиткі генерує різні кількості електроенергії, коли одні й ті ж люди пересуваються по ній вперед і назад. Зміна мультиплікатора з косозубих зубчатих коліс на прямозубі привела до очікуваного підвищення виробленої потужності. Цей результат вказує на важливість конструктивних характеристик мультиплікатора в процесі оптимізації виробництва електроенергії енергогенеруючою плиткою.

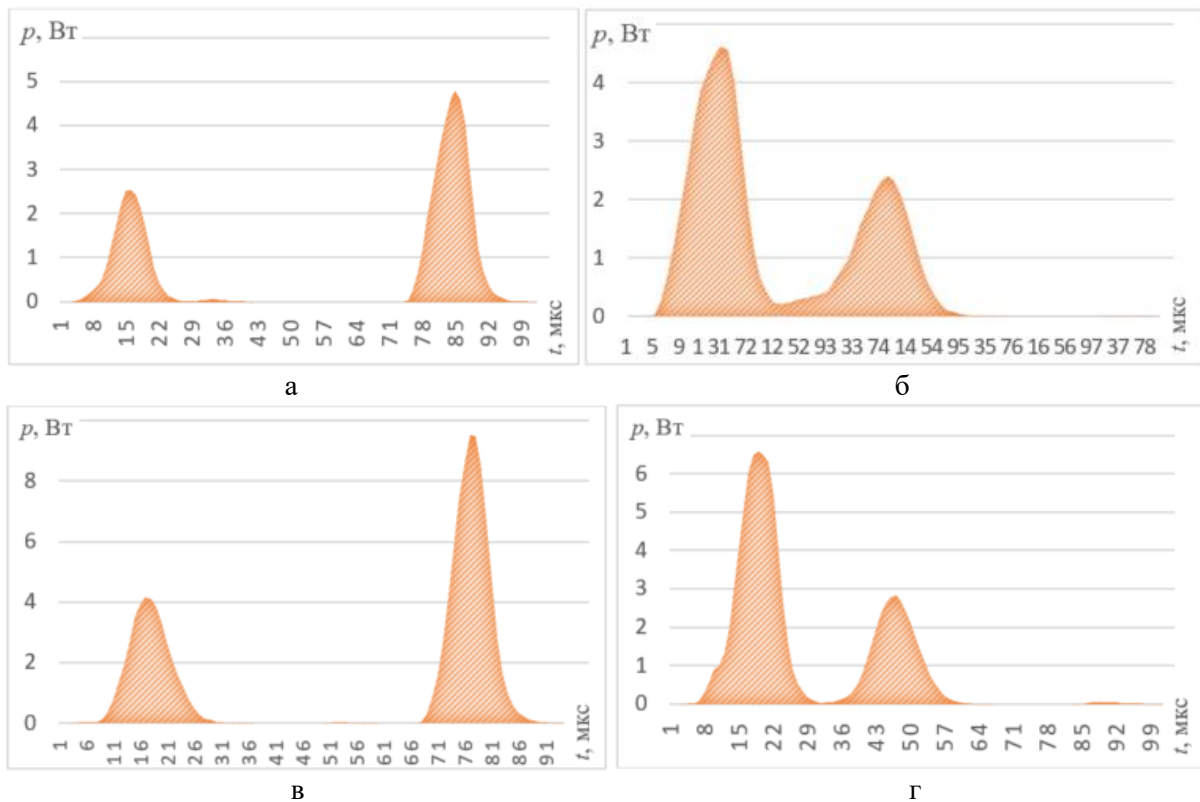


Рис. 7. Графік залежності електричної потужності, згенерованої енергогенеруючою плиткою, від часу при реалізації одного кроку: а, б – при підключенні одного КД; в, г – при підключенні двох КД

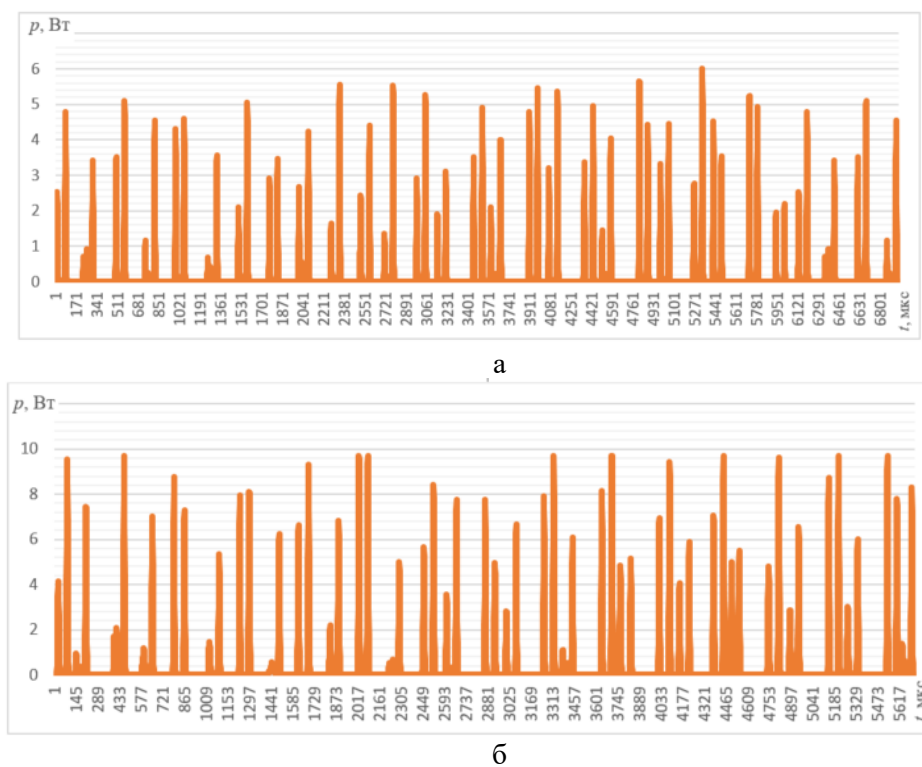


Рис. 8. Графічна залежність електричної потужності, згенерованої ЕП з мультиплікатором прямозубого типу зубчастих коліс, від часу за 30 кроків: а – при роботі з одним кроковим двигуном (КД); б – при паралельному підключенні двох КД

Таблиця 2 – Значення генерованої потужності ЕП та мультиплікатором з прямозубим типом зубчастих коліс

	Серії по 30 кроків									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Прямий напрямок										
1 КД, Вт	18,92	19,15	21,76	19,03	19,82	20,12	20,54	19,85	18,76	20,02
2 КД, Вт	31,80	33,23	32,57	32,26	32,00	32,56	30,88	31,24	30,88	33,27
Коефіцієнт посилення, k	1,68	1,74	1,50	1,70	1,61	1,62	1,50	1,57	1,65	1,66
Зворотній напрямок										
1 КД, Вт	12,48	15,06	12,88	13,50	14,00	14,02	14,87	14,40	15,11	13,32
2 КД, Вт	20,06	16,96	19,69	19,05	18,68	18,86	21,68	20,05	19,89	19,97
Коефіцієнт посилення, k	1,61	1,13	1,53	1,41	1,33	1,34	1,46	1,39	1,32	1,50

Аналіз результатів, отриманих під час експериментів з енергогенеруючою плиткою при використанні мультиплікаторів різних типів, дозволяє сформулювати декілька висновків. Спостереження показали, що кількість виробленої енергії змінюється залежно від того, активовано два крокових двигуни чи лише один. Конкретно, при прямому русі зміни становлять: 47% з косозубим мультиплікатором та 62% з прямозубим мультиплікатором.

При зворотному русі ці відсотки становлять 55% і 72% відповідно.

Використання двох крокових двигунів значно збільшує потенціал енергогенерації енергогенеруючої плитки. Різниця в ефективності генерації енергії при русі вперед і назад зумовлена конструктивними особливостями плитки. Оскільки передавальний механізм знаходиться не по центру відносно поверхні на яку відбувається натиск, сила впливу на кроковий двигун варіюється залежно від місця тиску на платформу, тобто залежить від того, в яке місце людина наступить. При цьому, рух вперед сприяє більшій генерації електроенергії, а при русі назад – спостерігається зменшення вироблення енергії, що можна пояснити особливостями конструкції плитки та динамікою руху людини.

Експерименти також показали, що кількість генерованої енергії з одного кроку залежить не стільки від ваги особи, скільки від швидкості і енергії кроку. Швидкість кроку та його сила (інтенсивність натискання на ЕП) сприяє виробленню більшої кількості

енергії. Цей фактор важливо враховувати при виборі місця встановлення плитки, адже правильне розташування в місцях з інтенсивним потоком пішоходів може суттєво збільшити ефективність енергогенерації.

Отже, знаючи потенціал енергогенеруючої плитки та її характеристики, можливо прорахувати очікувану кількість генерованої електроенергії в залежності від інтенсивності руху. Таке розуміння дозволяє оцінити ефективність використання плитки в конкретних локаціях, наприклад, на зупинках громадського транспорту або як сходинки, визначити кількість необхідних плиток для повного забезпечення енергією окремих елементів міської інфраструктури, як-от освітлення зупинки.

Висновки

Дослідження ефективності енергогенеруючих плиток з різними типами мультиплікаторів – косозубими та прямозубими шестернями – дозволило отримати наступні висновки:

- плитки з прямозубими мультиплікаторами продемонстрували вищу ефективність генерації електроенергії порівняно з плитками, обладнаними косозубими мультиплікаторами. Це підтверджує припущення про переваги прямозубих шестерень з точки зору мінімізації втрат енергії під час передачі крутного моменту;

- ефективність перетворення механічної енергії на електричну залежить не лише від типу мультиплікатора, але й від характеристик руху людини – швидкості та сили кроку.

Оптимізація конструкції плиток під типові параметри руху може забезпечити додаткове збільшення кількості генерованої енергії;

– встановлено, що плитки з мультиплікаторами обох типів є перспективними для використання в умовах великих міських агломерацій, де щоденно фіксується великий потік пішоходів. Вони можуть стати значущим джерелом відновлюваної енергії для потреб міської інфраструктури;

– реалізація енергогенеруючих плиток у міському середовищі вимагає детального аналізу потенційних місць їх розміщення, врахування специфіки пішохідних потоків та інтеграції з іншими елементами міської інфраструктури з метою максимізації ефективності використання генерованої енергії;

– результати дослідження вказують на необхідність подальших розробок в області конструктивного вдосконалення енергогенеруючих плиток та мультиплікаторів, зокрема, щодо підвищення їх довговічності, зниження вартості виготовлення та експлуатації, а також розробки стандартів для широкого впровадження цієї технології.

Дослідження підкреслило значний потенціал використання енергогенеруючих плиток з оптимізованими мультиплікаторами як ефективного джерела відновлюваної енергії для міських умов, сприяючи сталому розвитку міських територій та покращенню екологічного стану довкілля.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Arhun, S., Borodenko, Y., Hnatov, A., Popova, A., Hnatova, H., Kunicina, N., Ziravecka, A., Zabasta, A., & Ribickis, L. (2020). Choice of Parameters for the Electrodrive Diagnostic System of Hybrid Vehicle Traction. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 57(4), 3–11. <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0017>
2. Van Mierlo, J., Maggetto, G., & Lataire, P. (2006). Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles. *Energy Conversion and Management*, 47(17), 2748–2760.
3. Arhun, S., Hnatov, A., Hnatova, H., Patlins, A., & Kunicina, N. (2020). *Problems that have arisen in universities in connection with COVID-19 on the example of the Double Degree Master's Program "Electric Vehicles and Energy-Saving Technologies"* 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316601>
4. Galkin, A., Obolentseva, L., Balandina, I., Kush, E., Karpenko, V., & Bajdor, P. (2019). Last-mile delivery for consumer driven logistics. *Transportation Research Procedia*, 39, 74–83.
5. Patlins, A., Hnatov, A., Arhun, S. C., Bogdan, D., & Dzyubenko, O. (2019). Development of an energy generating platform for converting kinetic energy into electrical energy using the kinematic synthesis of a three-stage multiplier. *Transport Means 2019: Proceedings of the 23rd International Scientific Conference, 2019-October*, 403–408.
6. Jintanawan, T., Phanomchoeng, G., Suwankawin, S., Kreepoke, P., Chetchatree, P., & U-viengchai, C. (2020). Design of kinetic-energy harvesting floors. *Energies*, 13(20), 5419.
7. Moussa, R. R. (2020). *Installing piezoelectric tiles in children outdoor playing areas to create clean & healthy environment; case study of el-shams sporting club, Cairo_Egypt*.
8. Ismail, N. I. N., Abd Rahman, N. A., Yaccob, A. A., Muhamad, N. S., & Jamaludin, S. U. (2020). Feasibility study on potential of pedestrians' footstep based energy harvesting (case study: UiTM Pulau Pinang). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 849(1), 012056.
9. Solban, M. M., & Moussa, R. R. (2019). Piezoelectric Tiles Is a Sustainable Approach for Designing Interior Spaces and Creating Self-Sustain Projects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 397(1), 012020.
10. Akib, T. B. A., Mehedi, H., & Nazmuschayadat, M. (2019). Electrical energy harvesting from the foot stress on foot overbridge using piezoelectric tile. *2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT)*, 1–5.
11. Moussa, R., & Solban, M. (2021). Investigating the potential of using human movements in energy harvesting by installing piezoelectric tiles in Egyptian public facilities. *Journal of Engineering Research*, 9(4A).
12. Puteri Aisyah, M. S. (2022). *Piezoelectric energy floor tiles performance and effectiveness as building energy conservation measures for different types of buildings in Malaysia*. UTAR.
13. Ruman, M. R., Das, M., & Mahmud, S. I. (2019). Human footsteps for energy generation by using piezoelectric tiles. *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 1, 1–6.
14. *These high-tech tiles generate energy from our footsteps—And they could change how we power our cities*. (2023, October 6). Yahoo News. <https://news.yahoo.com/high-tech-tiles-generate-energy-161737905.html>

15. Hawkins, J. (2022, July 13). This company created floor tiles that convert footsteps into energy. *BGR*. <https://bgr.com/science/this-company-created-floor-tiles-that-convert-footsteps-into-energy/>
16. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., & Romanovs, A. (2020). Development of an unified energy-efficient system for urban transport. *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, 248–253. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236606>
17. Patlins, A., Hnatov, A., & Arhun, S. (2018). *Using of green energy from sustainable pavement plates for lighting bikeways*. 2018-October-3–5, 574–579. <https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/27845>
18. Patil, S., Parsewar, S., Pranav, B., Aade, S., & Hanmante, S. (2019). Energy generation and implementation of power floor (pavegen). *Energy*, 6(04).
19. Mustafa, S. F. (2021). Applying Piezoelectric Tiles as a Sustainable Design Solution to Reduce Energy Consumption in Egypt. *International Journal of Environmental Sustainability*, 17(2).
20. Patlins, A., Hnatov, A., Arhun, S., & Dzyubenko, O. (2019). Design and research of constructive features of paving slabs for power generation by pedestrians. *Transportation Research Procedia*, 40, 434–441. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.063>

Аргун Шасяна Валіковна¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Гнатов Андрій Вікторович¹, д.т.н., проф., завідувач каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Сохін Павло Андрійович¹, аспірант кафедри автомобільної електроніки, тел. +38 0633473433, info@elektrocar.com.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2823-2239>

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

Efficiency of energy-generating tiles with different types of multipliers

Abstract. Problem. *With the urgent need for sustainable and renewable energy solutions, the integration of energy-harvesting technologies in urban infrastructure has become a focal point of innovation. Energy-generating tiles, transforming*

pedestrian movement into electricity, offer a viable path forward. Yet, their efficiency hinges on the internal design, particularly the type of multipliers used. Goal. This study aims to assess and compare the efficiency of energy-generating tiles equipped with helical and straight-cut gear multipliers, to identify the optimal design for maximizing energy conversion in urban environments. **Methodology.** An experimental setup was created to test prototypes of the energy-generating tiles under controlled foot traffic conditions. The study measured and analyzed the electrical output and efficiency of tiles with both types of gear multipliers, simulating real pedestrian traffic scenarios. **Results.** Energy-generating tiles featuring straight-cut gears outperformed those with helical gears in energy output and conversion efficiency. The research also illuminated the influence of pedestrian dynamics, like step force and frequency, on tile performance. **Originality.** This research advances renewable energy technology by offering a comprehensive analysis of energy-generating tile efficiency with different gear multipliers. It introduces an innovative method for evaluating tile performance, underscoring the significance of gear design in energy conversion. **Practical value.** The findings have considerable implications for sustainable urban development, suggesting that implementing energy-generating tiles in areas with high foot traffic could significantly enhance urban renewable energy sources. This study not only guides the design of more efficient energy-harvesting tiles but also encourages their broader adoption, supporting urban sustainability goals and the reduction of carbon emissions.

Key words: *energy-generating tiles, multipliers, helical gears, spur gears, electricity generation, alternative energy sources.*

Shchasyana Arhun¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0993780451, shasyana@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Andrii Hnatov¹, professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department, tel. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Pavlo Sokhin¹, postgraduate, Vehicle Electronics Department, e-mail: info@elektrocar.com.ua, tel. +38 0633473433,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2823-2239>

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

Підвищення електромагнітної сумісності і енергоефективності зарядної станції електромобілів

Багач Р. В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. У статті запропоновано одноланкову структуру зарядної станції електромобілів з використанням активного чотириквADRантного випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності. Побудована Matlab-модель розглянутої зарядної станції, яка враховує параметри мережі живлення, параметри ключів активного випрямляча та його систему автоматичного керування, а також еквівалентну модель акумуляторного відсіку. На підставі поліноміальної апроксимації енергетичних залежностей IGBT-модулів створено математичну модель розрахунку статичних та динамічних втрат. Проведений аналіз параметрів якості електроенергії, складових енергії втрат та ККД зарядної станції на інтервалі повного заряду батареї при різних струмах заряду та частоті ШИМ.

Ключові слова: зарядні станції, електромобіль, активний випрямляч, ефективність, якість електроенергії, широтно-імпульсна модуляція.

Вступ

З кожним роком електромобілі стають привабливішими порівняно з автомобілями з двигунами внутрішнього згорання. Розвитку електромобілів (EV) приділяється значна увага уряду, виробників та дослідників [1-3]. При цьому важливим питанням є створення енергоефективних зарядних станцій із найвищими параметрами коефіцієнта корисної дії потужності. Досить важливим параметром є час заряду тягових батарей електромобілів. У зв'язку з цим досить перспективними є топологія громадських зарядних станцій з режимом швидкої зарядки (DC, Mode 4) [1-3]. До громадських зарядних станцій електромобілів висуваються вимоги забезпечення електромагнітної сумісності з живлячою мережею, обмеження емісії вищих гармонік фазних струмів, а також підвищення коефіцієнту корисної дії та зниження власних втрат потужності [5].

Традиційні зарядні станції швидкої зарядки зазвичай містять дві ланки перетворення, а саме вхідного випрямляча AC/DC і вихідного DC/DC перетворювача [6,7]. У даній

топології DC/DC перетворювач забезпечує регулювання вихідної напруги та струму зарядної станції у широкому діапазоні. DC/DC перетворювач використовується також для забезпечення гальванічної розв'язки електромобіля з мережею. Схема швидкої зарядної станції на основі AC/DC – DC/DC представлена на рис. 1.

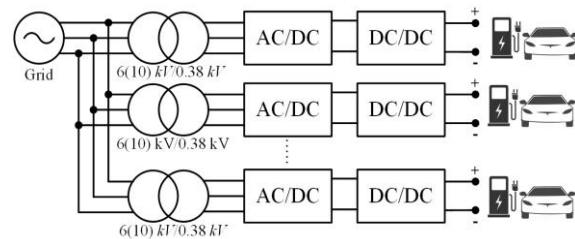


Рис. 1. Схема швидкої зарядної станції на основі AC/DC – DC/DC

У той же час дволанкове перетворення електроенергії веде до додаткових втрат і зниження коефіцієнта корисної дії потужності зарядної станції.

Аналіз публікацій

Створення енергоефективних зарядних станцій стає ключовим аспектом зі зростанням числа електромобілів. До зарядних станцій електромобілів висуваються вимоги за наступними показниками: можливість режиму швидкої зарядки, забезпечення збільшення ККД, забезпечення коефіцієнту потужності близького до одиниці, можливість двонаправленої передачі електроенергії, рівень емісії вищих гармонік, що забезпечує вимоги міжнародних та українських стандартів та інші показники [7-9].

Задачею дослідників є створення зарядних станцій, які б дозволили забезпечити низький рівень втрат потужності в перетворювачі зарядної станції, забезпечили вимоги електромагнітної сумісності та змогли б при цьому забезпечити режим швидкого заряду. Таким чином питанням, покращення параметрів енергоефективності перетворювачів зарядних станцій електромобілів, а саме підвищення ККД, зниження рівня вищих гармонік струмів та реалізація режиму швидкого заряду тягових акумуляторних батарей електромобілів є актуальним.

Вивчення та аналіз усіх питань, пов'язаних з якістю електричної енергії та енергоефективності зарядних станцій для електромобілів, присвячені роботи українських та закордонних науковців.

В роботі [8] запропоновано триланкову структуру зарядної станції електромобілів потужністю 80 кВт на базі резонансного перетворювача, що містить інвертор, високочастотний трансформатор та керований випрямляч. Запропоноване технічне рішення дозволяє забезпечити гальванічний розв'язок та регулювання режиму заряду, проте зумовлює досить високі втрати потужності в двох перетворювачах та проміжному трансформаторі.

В роботі [9] запропонована структура зарядної станції на базі дволанкової структури, що містить два послідовні DC/DC перетворювача. Дві ланки перетворення забезпечують режим зарядку «постійний струм – постійна напруга», проте зумовлюють підвищені втрати потужності.

В роботі [10] запропонована зарядна станція електромобілів, що містить дві ланки перетворення на базі керованого випрямляча та повномостового DC/DC перетворювача з проміжним конденсатором, що працює в режимі шви-

дкого заряду. В роботі не досліджено показники електромагнітної сумісності з електричною мережею та не представлено результати досліджень втрат потужності та ККД.

Таким чином в оглянутих дослідженнях представлені рішення визначають необхідність використання декількох послідовних перетворювачів, що зумовлює додаткові втрати потужності. Крім цього не визначені параметри електромагнітної сумісності з живлячою мережею, а також показники ККД запропонованих рішень зарядних станцій.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є покращення енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності зарядної станції електромобілів, шляхом реалізації зарядної станції на базі активного чотириквadrантного випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:

- опис запропонованої схеми електричної схеми зарядної станції для електромобілів з одноланковим перетворенням енергії на базі активного чотириквadrантного випрямляча;
- визначення параметрів навантаження зарядної станції, а саме параметрів схеми заміщення акумуляторної батареї у електромобілі Tesla Model S;
- розробка Matlab-моделі запропонованої зарядної станції електромобілів;
- дослідження на моделі втрат потужності втрат в складових запропонованої зарядної станції та визначення ККД;
- визначення на моделі параметрів якості електричної енергії зарядної станції, а саме коефіцієнта потужності та коефіцієнта гармонійних спотворень фазного струму.

Запропонована топологія зарядної станції

У даній роботі висунуто авторами вперше топологію концепції громадської зарядної станції, що ґрунтується на активному трифазному випрямлячі (AB) із корекцією коефіцієнта потужності рис. 2. При цьому активний випрямляч виконує функцію регулювання вихідної напруги та струму заряду, а гальванічну розв'язку забезпечує вхідний трансформатор.

Перевагами від існуючих рішень запропонованої зарядної станції з АВ є високий коефіцієнт потужності, що наближається до

одиниці, низький рівень гармонічних спотворень споживаного струму, що визначається коефіцієнтом гармонійних спотворень (англ. THD total harmonic distortion). Коефіцієнт гармонійних спотворень фазного струму зарядної станції визначається згідно виразу:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}, \quad (1)$$

де I_1 – діюче значення першої гармоніки струму; n – порядок (номер) вищої гармоніки; I_n – діюче значення n -ої вищої гармоніки

в фазному струмі.

Запропонована схема рядної станції забезпечує $THD < 5\%$, покращений ККД порівняно з дволанковими зарядними станціями типу AC/DC – DC/DC, а також можливість забезпечення двонаправленої передачі енергії від акумуляторної батареї до електричної мережі в разі необхідності створення мікромережі, або режиму V2G (англ. Vehicle to grid) [8].

Схема запропонованої зарядної станції для електромобілів на базі активного чотириквADRANTного випрямляча представлена на рис. 2.

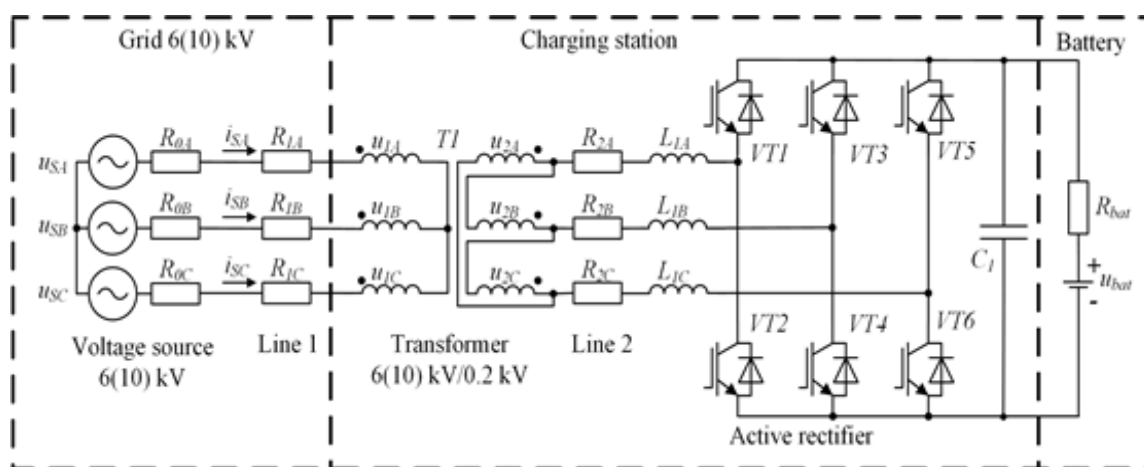


Рис. 2. Схема зарядної станції для електромобілів на базі активного чотириквADRANTного випрямляча

В запропонованому рішенні зарядна станція живиться від електричної мережі 6(10) кВ. Параметри трифазного трансформатора живильної підстанції типу ТМН4000/35/6 визначають характеристики мережі живлення [9], для якого опір фази $R_{0A} = 1,4$ Ом [10]. Параметри лінії 1 визначаються відстанню між тяговою підстанцією та перетворювальним трансформатором, яке прийемо рівним 1 км. Використаний у лінії 1 алюмінієвий трижильний кабель має величину опору фази R_{1A} , що дорівнює 0,8 Ом/км. Перетворювальний трансформатор серії ТСЗП-1000/10/0,23УЗ має номінальну потужність 0,878 МВт та втрати короткого замикання 8 кВт. Сумарний еквівалентний опір його обмотки його фази R_{TV} дорівнює 1,73 мОм. Параметри лінії 2 визначаються відстанню між перетворювальним трансформатором Т1 та активним випрямлячем, яке прийнято рівним 50 м. При цьому переріз мідного кабелю

дорівнюватиме 350 мм^2 , величина опір фази $R_{2A} = 2,5$ мОм. Значення індуктивності входних дроселів активного випрямляча дорівнюють 0,2 мГн. В якості силових транзисторів були обрані ключі типу CM600DX-13T від виробника Mitsubishi Electric з параметрами струму колектора $I_c 600$ А та напруги колектор-емітер $U_{CE} 650$ В, ємність вихідного конденсатора дорівнює 20 мФ. Система автоматичного регулювання струму та напруги заряду батареї реалізована на підставі інтегрального регулятора з подальшим ШІМ формуванням форми входного струму [11].

В роботі досліджувався заряд еквівалентної моделі батарейного відсіку електромобіля Tesla S, який містить 7104 батареї Panasonic NCR – 18650 сумарною ємністю 85 кВт·год [12]. Схема з'єднання тягових батарей електромобіля Tesla Model S наведено на рис. 3 [12].

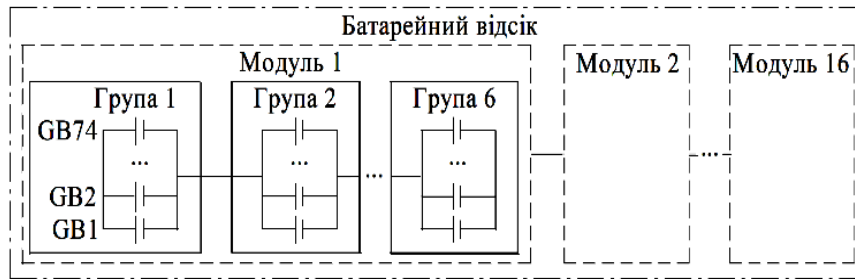


Рис. 3. Схема з'єднання батарей у електромобілі Tesla Model S

У батерейному відсіку окремі батареї типу NCR-18650b паралельно з'єднуються до груп по 74 шт. При паралельному з'єднанні напруга групи дорівнює напрузі кожного з елементів 4,2 В, а ємність групи дорівнює сумі ємностей елементів 250 А·г. Далі шість груп послідовно з'єднуються в модуль. При цьому напруга модуля підсумовується з напруги груп і дорівнює 25,2 В. Далі модулі з'єднуються послідовно в батарею. Усього батарея містить 16 модулів (всього 96 груп). Напруга всіх повністю заряджених модулів підсумовується і становить 400 В. Також розрахований і еквівалентний опір блоку батарей. Виходячи з того, що середній опір одного акумулятора типу R_{NCR} складає 37 мОм, еквівалентний опір батареї електромобіля R_{bat} за схемою з'єднання дорівнює 27 мОм.

При реалізації швидкого заряду батареї значну роль відіграє метод (алгоритм), який використовуватиметься для заряду батареї. Розглянутий відомий метод заряду акумулятора, який користується найбільшою популярністю, – це метод «постійний струм – постійна напруга» (англ. CC–CV, constant current – constant voltage). Режим заряду по методу CC – CV представлено на рис. 4.

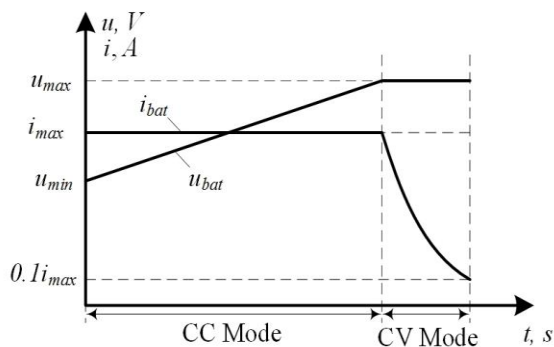


Рис. 4. Режим заряду по методу CC – CV

Основна концепція методу CC – CV полягає в тому, що акумулятор заряджається сталою максимальною силою струму i_{max} , яка визнача-

ється виробником батареї до досягнення певної напруги відсікання u_{max} . Після досягнення цієї напруги акумулятор продовжує заряджатися при цій напрузі до того моменту, коли споживання струму зменшиться приблизно до 0,1С або менше, що гарантує повний заряд [13]. Слід зазначити, що при перемиканні з режиму CC на режим CV (це відбувається приблизно на 80% заряду акумулятора) швидкість заряду значно зменшується.

Розрахунок ККД

У роботі проведено оцінку коефіцієнта корисної дії запропонованої зарядної станції, представленої на рис. 2 коефіцієнта корисної дії оцінювався на підставі сумарної енергії втрат та корисної енергії отриманої батареєю протягом повного інтервалу заряду [14,15]. Була використана формула для розрахунку коефіцієнта корисної дії:

$$\eta = \frac{E_{Load}}{E_{Load} + \Delta E_{\Sigma}}, \quad (2)$$

де E_{Load} – корисна енергія, передана на батарею під час заряду; ΔE_{Σ} – сумарна енергія втрат у розглянутій системі.

$$\Delta E_{\Sigma} = E_S + E_{L1} + E_{TV} + E_{L2} + E_L + E_{AR} + E_{bat}, \quad (3)$$

де E_S – енергія втрат у джерелі 6(10) кВ; E_{L1} – енергія втрат у лінії 1; E_{TV} – енергія втрат у трансформаторі; E_{L2} – енергія втрат у лінії 2; E_{AR} – енергія втрат у ключах активного випрямляча; E_{bat} – енергія втрат у батареї.

Корисна енергія, передана в навантаження:

$$E_{Load} = \int_0^{T_3} (u_{Load} \cdot i_{Load}) \cdot dt, \quad (4)$$

де T_3 – час повного заряду батареї EV; u_{load} –

миттєве значення вихідної напруги, що подається на акумуляторний відсік літій-іонних батарей (при заряді діапазон від 340 В до 420 В); i_{load} – миттєве значення струму навантаження (заряд батареї), яке в процесі заряду варіюється від 15 до 400 А.

Оцінку ККД виконано для режиму CC–CV шляхом комп’ютерного моделювання.

Втрати в джерелі 6(10) кВ, лінії 1, в трансформаторі Т1, лінії 2 і в батареї розраховуються за формулою:

$$E = \int_0^{T_2} (i^2 \cdot R) \cdot dt, \quad (5)$$

де i і R – миттєве значення струму і опір в ділянці ланцюга, що розраховується.

Для визначення втрат потужності в силових транзисторах активного випрямляча було обрано IGBT – модуль типу CM600DX – 13Т. Сумарні втрати в IGBT – модулі складаються з динамічних і статичних втрат в IGBT – транзисторі та зворотному діоді [15], розраховуються:

$$E_{loss.IGBT} = E_{loss.VT} + E_{loss.VD}; \quad (6)$$

$$E_{lossVT} = E_{VT.DC} + E_{VT.SW}; \quad (7)$$

$$E_{lossVD} = E_{VD.DC} + E_{VD.SW}, \quad (8)$$

де $E_{VT.DC}$ – енергія статичних втрат у IGBT – транзисторах; $E_{VT.SW}$ – енергія динамічних втрат у IGBT – транзисторах; $E_{VD.DC}$ – енергія статичних втрат у паралельних діодах; $E_{VD.SW}$ – енергія динамічних втрат у паралельних діодах:

$$E_{VT.DC} = \int_0^{T_2} (i_c \cdot u_{ce}) dt, \quad (8)$$

де i_c – струм колектора; $u_{ce}(i_c)$ – напруга між колектором та емітером, що залежить від величини струму колектора.

Динамічні втрати в IGBT – транзисторах визначаються відповідно до виразу:

$$E_{VT.SW} = \int_0^{T_2} [E_{on}(I_c) + E_{off}(I_c)] \cdot dt, \quad (9)$$

де $E_{on}(I_c)$ та $E_{off}(I_c)$ – енергія, що розсіюється в транзисторі при вмиканні та вимиканні, яка залежить від величини струму колектора.

Статичні втрати у зворотних діодах:

$$E_{VD.DC} = \int_0^{T_2} (u_{fwd} \cdot i_{vd}) \cdot dt, \quad (10)$$

де u_{fwd} – падіння напруга на зворотному діоді; i_{vd} – струму зворотного діода.

Динамічні втрати у зворотних діодах:

$$E_{VD.SW} = \int_0^{T_2} E_{rec}(i_{vd}) \cdot dt, \quad (11)$$

де E_{rec} – енергія відновлення зворотного діода.

Залежності $E_{on}(i_c)$, $E_{off}(i_c)$, $E_{rec}(i_c)$, $u_{ce}(i_c)$, $u_{fwd}(i_{vd})$ взяті з технічної документації на модуль CM600DX-13Т. [16].

Моделювання зарядної станції

Для досліджень параметрів електромагнітної сумісності запропонованої автором зарядної станції та визначення втрат потужності та ККД запропонованої структури було розроблено Matlab – модель зарядної станції на базі активного чотириквadrантного випрямляча, яка наведена на рис. 5.

Система автоматичного керування (САК) з активним випрямлячем побудована на основі інтегрального регулятора, забезпечує сталість струму заряду на етапі заряду «постійний струм» та сталість напруги на етапі заряду «постійна напруга», що вимагає режим заряду CC–CV.

Метод широтно-імпульсної модуляції відзначається перевагою перед гістерезисним методом у можливості зменшення частоти комутації ключів АВ та обумовлює зменшення динамічних втрат у ключах та підвищення ККД. Запропонована автором структурна схема системи управління АВ з широтно-імпульсною модуляцією представлена на рис. 6 [17].

На рис. 6 позначено: I_{fb} , U_{fb} і I_{ref} , U_{ref} – струми та напруги заряду батарей, отримані у зворотному зв'язку та блоці сигналу задання відповідно.

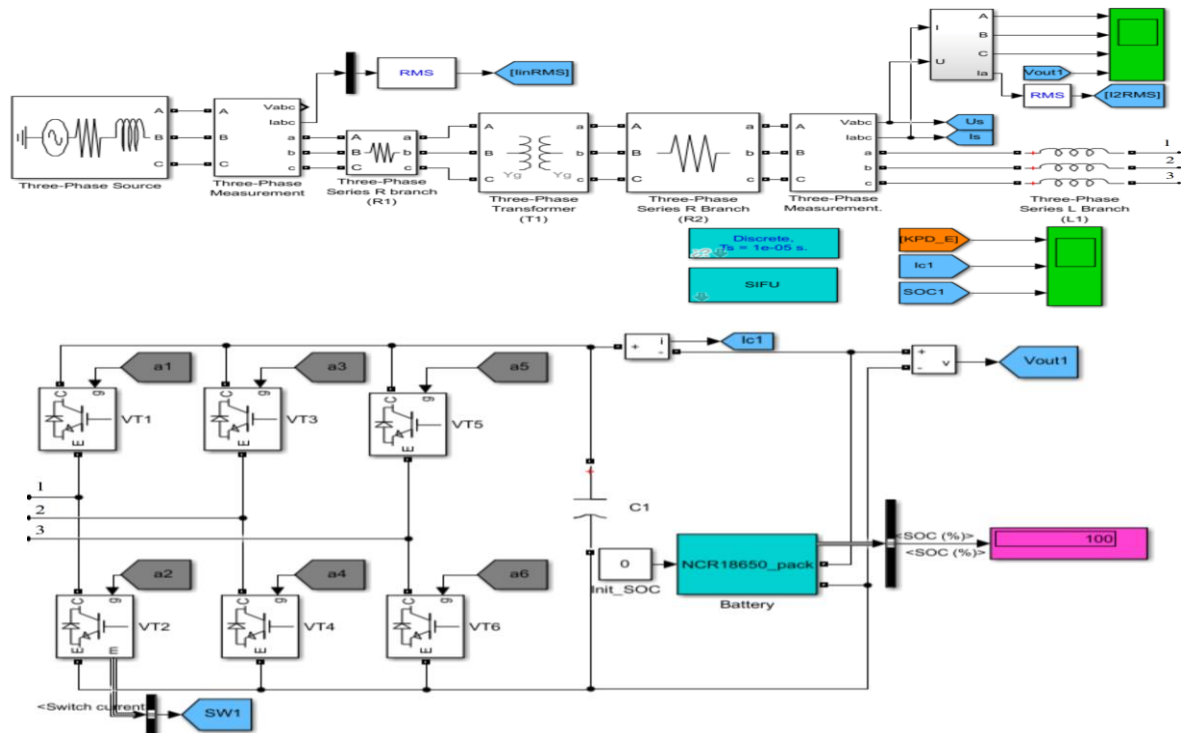


Рис. 5. Matlab-модель системи зарядної станції для електромобілів

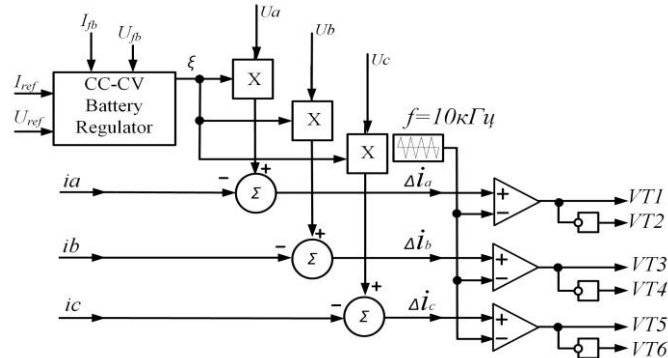


Рис. 6. Структура САК напруги та струму заряду батареї трифазного АВ із ШІМ

У субмоделі блоку регулятора напруги та струму заряду батареї (CC-CV battery regulator), зображеному на рис. 6, реалізований інтегральний регулятор. Характерною особливістю запропонованого регулятора є використання різних інтегральних коефіцієн-

тів для режимів установки струму та напруги заряду. Це покращує динаміку регулювання в порівнянні з ситуацією, коли в обох режимах (CC та CV) використовується однаковий коефіцієнт рис. 7.

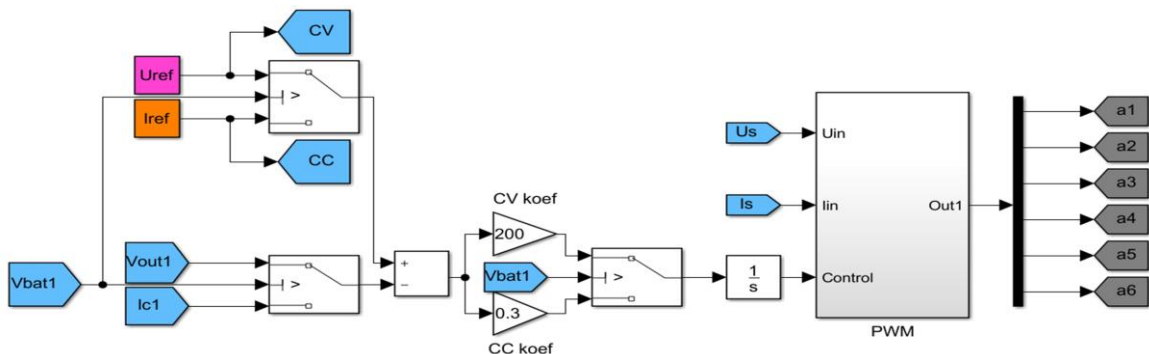


Рис. 7. Модель САК напруги та струму заряду батареї трифазного АВ із ШІМ

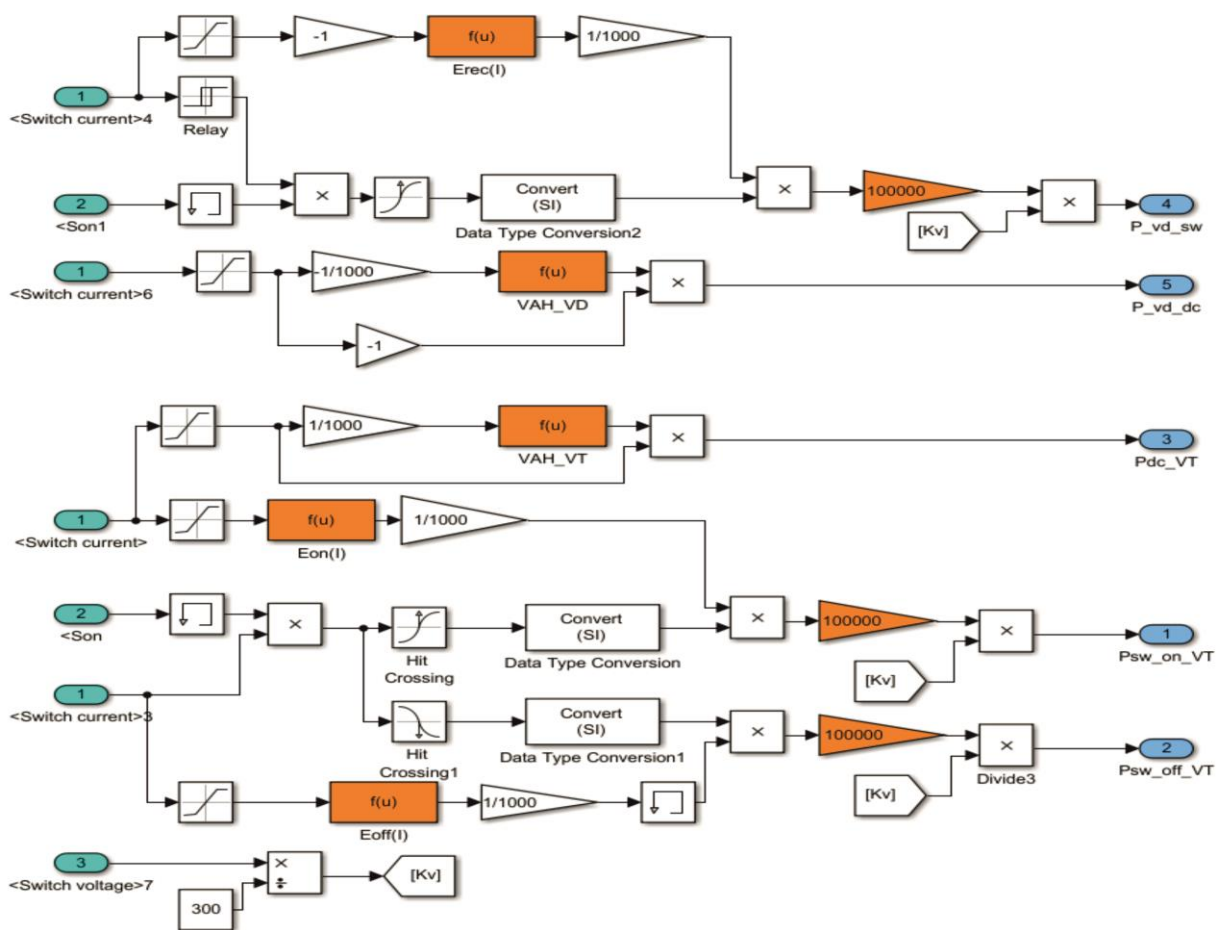


Рис. 8. Matlab – модель розрахунку втрат у IGBT – модулях

Субмодель розрахунку втрат у IGBT – транзисторах

Базові MatLab – моделі IGBT – транзисторів та силових діодів не враховують динамічних втрат. Крім цього ВАХ даних компонентів Matlab представлено прямою лінією, що обумовлює досить велику похибку при моделюванні втрат. Для отримання більш високої точності була побудована модель розрахунку, що враховує всі втрати в транзисторах IGBT і зворотних діодах модуля CM600DX – 13T.

Моделювання втрат в IGBT – модулях виконано шляхом поліноміальної апроксимації залежностей $E_{on}(i_c)$, $E_{off}(i_c)$ і $E_{rec}(i_c)$, $u_{ce}(i_c)$, $u_{fwd}(i_{vd})$, наведених у технічних характеристиках (модуль CM600DX–13T.) Результати апроксимації наведені в наступних формулах:

$$E_{rec}(i_{vd}) = 39,7 \cdot 10^{-9} \cdot i_{vd}^3 - 94,6 \cdot 10^{-6} \cdot i_{vd}^2 + 81,8 \cdot 10^{-9} \cdot i_{vd} + 1,2; \quad (12)$$

$$u_{fwd}(i_{vd}) = 1,243 \cdot i_{vd}^3 - 3,033 \cdot i_{vd}^2 + 2,975 \cdot i_{vd} + 0,562; \quad (13)$$

$$u_{ce}(i_c) = 0,863 \cdot i_c^3 - 2,1104 \cdot i_c^2 + 2,363 \cdot i_c + 0,5114; \quad (14)$$

$$E_{on}(i_c) = 6,2304 \cdot 10^{-6} \cdot i_c^2 + 7,9925 \cdot 10^{-3} \cdot i_c + 1,49582; \quad (15)$$

$$E_{off}(i_c) = 39,8 \cdot 10^{-9} \cdot i_c^3 - 55,3 \cdot 10^{-6} \cdot i_c^2 + 71,53 \cdot 10^{-3} \cdot i_c + 2. \quad (16)$$

Автором була проведена верифікація результатів розрахунків втрат у IGBT – модулях, отриманих при моделюванні MatLab з програмою MelcoSim 5.1 від виробника Mitsubishi Electric рис. 8. Похибка у розрахунках становить 2-3 %.

Результати моделювання ефективності системи зарядної станції

Осцилограми вхідного струму та вхідної напруги АВ випрямляча наведені на рис. 9.

Процес заряду, а саме динаміка зміни вихідної напруги, струму заряду батареї, а також величина батареї SOC на всьому інтервалі заряду наведена на рис. 10.

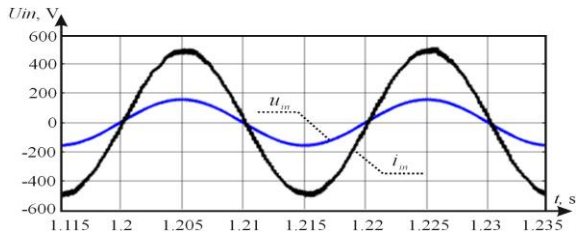


Рис. 9. Осцилограми вхідного струму та напруги активного випрямляча

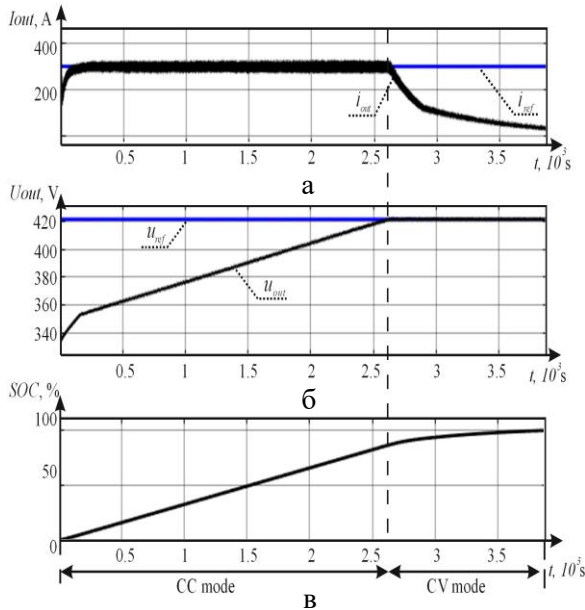


Рис. 10. Осцилограми роботи ЗС: а – вихідний струм та струм завдання (СС); б – вихідна напруга та напруга завдання (CV); в – ступінь заряду батареї

В результаті моделювання отримано значення складових енергії втрат потужності у ділянках системи зарядної станції при частотах ШІМ модуляції 5кГц та 10кГц, які наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Значення втрат потужності в елементах системи запропонованої зарядної станції

Складові енергії втрат	Енергія втрат, Дж	
	$f_{PWM}=5$ кГц	$f_{PWM}=10$ кГц
В джерелі, E_S	1716	1713
В ланцюгу 1, E_{L1}	983	982
В трансформаторі, E_{TV}	3217	3210
В ланцюгу 2, E_{L2}	2590	2582
В ключах АВ, E_{AR}	5160	6358
В батареї, E_{bat}	6718	6705
Сумарні втрати, ΔE_{Σ}	20384	21550

У табл. 2 наведено результати моделювання, а саме значення ККД, коефіцієнта потужності та коефіцієнта гармонійних спотво-

рень аналізованої системи ЗС при різних струмах заряду та частоти ШІМ.

З отриманих результатів моделювання визначено, що ККД запропонованої структури зарядної станції досить високий та складає 93,8 %-96,48 %.

Таблиця 2 – Параметри енергоефективності

Частота ШІМ, кГц	Струм заряду в режимі СС, А	ККД, %	Час заряду, с·10 ³	PF	THD, %
5	150 (0,6С)	96,48	6,55	0,988	9,4
	200 (0,8С)	95,85	5,18	0,991	7
	250 (1С)	95,19	4,38	0,992	6
	300 (1,2С)	94,51	3,84	0,994	4,6
	350 (1,4С)	93,8	3,47	0,994	4
	400 (1,6С)	93,09	3,2	0,994	3,5
10	150 (0,6С)	96,1	6,55	0,991	5,3
	200 (0,8С)	95,48	5,19	0,992	3,9
	250 (1С)	94,84	4,38	0,994	3,1
	300 (1,2С)	94,22	3,85	0,994	2,6
	350 (1,4С)	93,6	3,48	0,995	2,3
	400 (1,6С)	93	3,2	0,995	2

Висновки

Наведено результати дослідження параметрів енергоефективності зовнішньої зарядної станції EV постійного струму з використанням активного випрямляча.

Запропонована структура зарядної станції включає опис параметрів схеми підключення акумуляторного відсіку електромобіля Tesla Model S, які об'єднуються в одну еквівалентну батарею. Описано метод швидкого заряду батареї за технологією СС – CV, що забезпечує більшу кількість циклів заряду-розряду. Наведено формули для розрахунку складових втрат та ККД на інтервалі повного заряду батареї.

Представлено Matlab – модель системи ЗС та результати моделювання: осцилограми струмів та напруг, динаміка роботи регулятора струму заряду.

На підставі поліноміальної апроксимації

енергетичних залежностей IGBT – модулів створено математичну модель розрахунку статичних та динамічних втрат. Проведено аналіз параметрів якості електроенергії, складових енергії втрат та ККД зарядної станції на інтервалі повного заряду батареї при різних струмах заряду та частоті ШІМ. Проведені дослідження показали, що максимальний ККД системи досягається у режимі мінімального струму заряду. У той же час зниження струму заряду веде до збільшення часу процесу заряду, а також до невеликого погіршення параметрів якості електроенергії.

Література

1. Zhou, X., Wang, G., Lukic, S., Bhattacharya, S., & Huang, A. (2009). Multi-function bi-directional battery charger for plug-in hybrid electric vehicle application. In *2009 IEEE energy conversion Congress and exposition*. 3930-3936.
2. Dusmez, S., & Khaligh, A. (2012). A compact and integrated multifunctional power electronic interface for plug-in electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12), 5690-5701.
3. Dusmez, S., & Khaligh, A. (2012). A novel low cost integrated on-board charger topology for electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles. In *2012 Twenty-seventh annual IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC)*. 2611-2616.
4. Gemerov, G., Ilyina, N., Tugay, D., Mashura, A. (2018) "Energy efficiency of regenerative braking in regulated power systems," *International Scientific and Technical Conference "Problems of Modern Electrical Engineering – 2018"*, Kiev, 73-76.
5. Deilami, S., Masoum, A. S., Moses, P. S., & Masoum, M. A. (2011). Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile. *IEEE Transactions on smart grid*, 2(3), 456-467.
6. Erb, D. C., Onar, O. C., & Khaligh, A. (2010). Bi-directional charging topologies for plug-in hybrid electric vehicles. In *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* 2066-2072.
7. Tugay, D., Kotelevets, S., Korneliuk, S., & Zhemerov, G. (2018). Energy efficiency of microgrid implementation with solar photovoltaic power plants. In *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. 275-279.
8. Alhurayyis, I., Elkhateb, A., & Morrow, D. J. (2020). Bidirectional DC-DC Resonant Converter Design for Electric Vehicle Charging Stations Integration to MVDC Grids. 2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application(ICRERA). doi:10.1109/icrera49962.2020.9242656
10. Rivera, S., Pesantez, D., Kouro, S., & Lehn, P. W. (2018). Pseudo-Partial-Power Converter without High Frequency Transformer for Electric Vehicle Fast Charging Stations. 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). doi:10.1109/ecce.2018.8558238
11. Sokol, Y., Zamaruiev, V., Ivakhno, V., & Styslo, B. (2018). Improving the quality of electrical energy in the railway power supply system. In *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 563-566.
12. Багач, Р. (2023). Дослідження акумуляторних блоків електромобілів та зарядних станцій на основі активного трифазного випрямляча струму. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (24), 62–71. Bahach, R. (2023). Doslidzhennia akumulyatornykh bloktiv elektromobiliv ta zariadnykh stantsii na osnovi aktyvnoho tryfaznoho vypryamliacha strumu. [Research of battery units of electric vehicles and charging stations based on an active three-phase rectifier] *Car and electronics. Modern technologies*, (24), 62–71. [in Ukrainian].
13. Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Машура, А. В., & Гордієнко, Д. А. (2019). Аналіз технічних характеристик акумуляторних батарей і систем зарядання електромобілів. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 24(6), 11-19. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Mashura, A. V., & Hordiienko, D. A. (2019). Analiz tekhnichnykh kharakterystyk akumulyatornykh batarei i system zariadzhannia elektromobiliv. [Analysis of technical characteristics of accumulator batteries and electric car charging systems] *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 24(6), 11-19. [in Ukrainian].
14. Zhemerov, G., Plakhtii, O., & Mashura, A. (2020). Efficiency analysis of charging station for electric vehicles using the active rectifier in microgrid system. In *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* 37-42.
15. Tugay, D., Zhemerov, G., Korneliuk, S., & Kotelevets, S. (2019). Three theorems of the instantaneous power theory. In *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)* 289-294.
16. Documentation for the CM600DX-13T transistor. Access mode: https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/powerdevices/datasheets/igbt/t_series/cm600dx-13t_e.pdf

17. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Mashura, A., Hordiienko, D., & Khoruzhevskiy, H. (2020). Improving energy indicators of the charging station for electric vehicles based on a three-level active rectifier. *East European Journal of Advanced Technologies*, 3(8-105), 46-55.

Багач Руслан Володимирович¹, аспірант кафедри автомобільної електроніки, тел. +38 0507255660, +38 0935761042, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>

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

Enhancing electromagnetic compatibility and energy efficiency of electric vehicle charging stations

Abstract. Problem. The article proposes a single-link structure for an electric vehicle charging station utilizing an active four-square rectifier with power factor correction. A Matlab model of the proposed charging station is developed, taking into account parameters such as the power network, the switches of the active rectifier, its automatic control system, and an equivalent model of the battery compartment. Additionally, a mathematical model for calculating static and dynamic losses is created based on polynomial approximation of the energy dependencies of IGBT modules. The analysis investigates power quality parameters, components of energy losses, and efficiency of the charging station across various charge currents and PWM frequencies during a full battery charge interval. **Goal.** The aim of this study is to propose a single-link structure for an electric vehicle charging station using an active four-square rectifier with power factor correction. It includes an analysis of power quality parameters, components of energy losses, and efficiency of the charging station at different charge currents and PWM frequencies during a full battery charge interval. **Methodology.** To achieve the goal, several key steps are considered. These include

theoretical substantiation of the scheme of the electric microgrid charging station for electric vehicles with one-stage energy conversion, analysis of the battery connection scheme in the Tesla Model S electric car, research and calculation of efficiency, modeling of the charging station, development of a Matlab model of a microgrid system for the charging station, SAC analysis of battery charge voltage and current of a three-phase AV with PWM, modeling of losses in IGBT modules by polynomial approximation of dependencies, distribution of losses in the charging station system, and analysis of energy efficiency parameters. **Results.** The study presents the energy efficiency parameters of an external DC EV charging station using an active rectifier. It reveals that maximum efficiency of the system is achieved at minimum charge current. However, decreasing the charge current prolongs the charge process and slightly affects power quality parameters. **Originality.** A mathematical model for calculating static and dynamic losses was developed based on polynomial approximation of the energy dependencies of IGBT modules. The analysis encompasses power quality parameters, components of energy losses, and efficiency of the charging station across various charge currents and PWM frequencies during a full battery charge interval. **Practical value.** This study contributes to the further development of electric vehicles by improving the energy indicators of electric vehicle batteries and converters of electric vehicle charging stations, enabling fast charging modes. Active development is observed in each of these directions.

Key words: charging stations, electric car, active rectifier, efficiency, power quality, pulse width modulation.

Ruslan Bahach¹, postgraduate, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0507255660, +38 0935761042, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>

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

Метод експертної оцінки технічного стану циліндро-поршневої групи автомобільного двигуна після гідродару

Хрулев О. Е.¹, Сараєв О. В.², Сараєва І. Ю.²

¹Міжнародне моторне бюро, Україна

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

***Анотація.** У роботі досліджується термогазодинамічний процес у циліндрі двигуна внутрішнього згоряння в режимі холодного прокручування при вимірюванні компресії. Для розв'язання виявлених проблем розроблено математичну модель термогазодинамічного процесу в циліндрі при холодному прокручуванні в процесі вимірювання компресії в циліндрі. На відміну від наявних моделей покроково описує процеси в циліндрі, враховує реальний характер процесів впуску-випуску, витоку повітря через пару деталей і теплообмін зі стінками. За допомогою моделювання знайдено основні закономірності зміни компресії від режимів, характеру пошкодження сполучених деталей клапанного механізму та циліндро-поршневої групи, включаючи деформацію шатуна при гідродарі від потрапляння рідини в циліндр. За результатами дослідження зроблено висновок, що властивості моделі роблять її застосування ефективним при діагностиці та моніторингу технічного стану двигунів в експлуатації.*

***Ключові слова:** автомобіль, двигун, холодне прокручування, холодний старт, компресія, гідродар, моделювання.*

Вступ

Аналіз різних моделей та порівняння відомих даних показали, що залишаються не вирішені до кінця проблеми побудови математичних моделей робочого циклу двигуна, а переважна більшість практичних даних та рекомендацій щодо вимірювання компресії в циліндрі заснована на емпіричних знаннях, численних експериментах та тестах. Відповідно до цього виникає потреба в розрахункових моделях процесу вимірювання компресії та їх теоретичному обґрунтуванні, особливо при експлуатаційному пошкодженні двигуна в результаті гідродару.

Аналіз публікацій

Відомо, що вимір максимального тиску – компресії, в циліндрах двигуна внутрішнього згоряння є одним із поширених методів діагностики технічного стану та визначення причин несправності [1, 2]. Ця перевірка зазвичай застосовується на попередньому етапі досліджень, оскільки не вимагає демонтажу великої кількості елементів двигуна. Тим самим

вимір компресії є неруйнівним методом контролю технічного стану, у якому об'єкт дослідження повністю зберігає свої функції. Ця властивість методу має важливе значення при деяких видах досліджень, наприклад, при автотехнічній експертизі.

Іншою безумовною перевагою вимірювання компресії є простота та дешевизна самого вимірювального приладу – компресометра, а також простота алгоритму застосування [3, 4]. В результаті метод отримав надзвичайно широке поширення на практиці як один із найбільш універсальних методів діагностики [5, 6], а величина максимального тиску в циліндрі увійшла практично у всі сервісні та ремонтні керівництва більшості марок та моделей автомобілів [4].

Інша проблема, яка потребує детального аналізу діаграми зміни тиску в циліндрі в режимі холодного прокручування двигуна (без згоряння палива), пов'язана з визначенням характеристик холодного старту [7]. Моделювання запуску дозволяє оцінити пускові властивості двигуна, особливо в умовах низьких температур. Це завдання близьке до завдання

вимірювання компресії. Але вона має на меті не діагностику технічного стану конкретного двигуна в експлуатації, а найчастіше конструкторські роботи з поліпшення пускових характеристик двигуна [8], визначення пускової подачі палива [9], оцінку шкідливих викидів і т.д. [10].

Разом з тим, переважна більшість практичних даних та рекомендацій щодо застосування розглянутого методу побудовано на емпіричних знаннях, численних експериментах та тестах [11, 12]. Споживачеві пропонується вірити рекомендаціям, які зазвичай пов'язують величину падіння компресії від якогось «нормального» рівня з конкретним видом несправності, ґрунтуючись на статистичних даних [13, 14]. При цьому перевірити ту чи іншу цифру, рекомендацію чи припущення про зв'язок результату вимірювання з несправністю, а також скоригувати отримані дані відповідно до своїх умов споживач не може, оскільки не має широко відомих і визнаних моделей та методів розрахункової оцінки. Ті ж моделі, які можна було б використовувати для отримання шуканих закономірностей, або побудовані на спрощених моделях політропних процесів [15] або мають обмеження [16, 17], які не дозволяють моделювати процес холодного прокручування без згоряння [18].

Водночас, моделювання може бути важливим для практики через особливості конструкції досліджуваного двигуна, які можуть впливати на зміну величини компресії при різних експлуатаційних пошкодженнях. Однак, кількісні оцінки та, тим більше перевірки тих чи інших даних, пов'язаних з величиною компресії, надзвичайно затратні, оскільки вимагають експериментальних досліджень великого обсягу та складності. Крім цього, у відомих джерелах немає жодних рекомендацій щодо діагностики гідроудару та деформації шатуна при попаданні рідини в циліндр [19], зокрема, за допомогою вимірювання компресії. Звідси виникає потреба у розрахункових моделях процесу вимірювання компресії та їх теоретичному обґрунтуванні.

Мета та постановка задачі

Дослідження робочого процесу в циліндрі двигуна внутрішнього згоряння при холодному прокручуванні та одержання кількісних характеристик компресії при різних експлуатаційних ушкодженнях.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

– розробити математичну модель процесу в циліндрі при холодному прокручуванні двигуна;

– провести моделювання на різних режимах та при різному стані циліндро-поршневої групи та клапанного механізму, порівняти отримані результати з експериментальними даними;

– виконати аналіз отриманих результатів, визначити загальні закономірності, що пов'язують величину компресії з різними видами ушкоджень деталей двигуна.

Математична модель процесу в циліндрі при холодному прокручуванні двигуна

Для виведення розрахункових рівнянь розглянемо схему циліндра (Рис. 1).

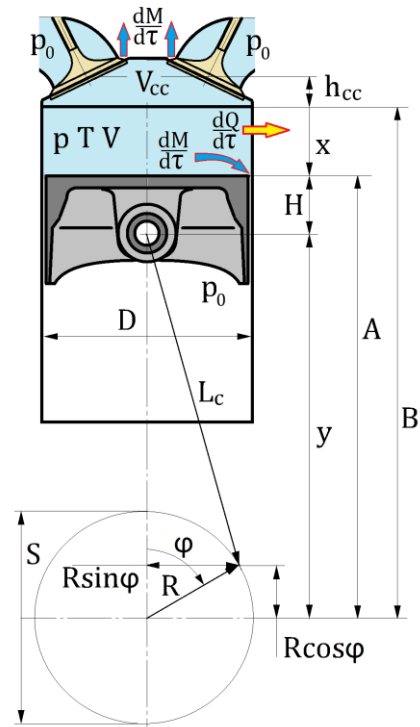


Рис. 1. Розрахункова схема процесу в циліндрі при холодному прокручуванні

З першого закону термодинаміки [20, 21], записаного для циліндра, впливає:

$$dU = dQ - dL + idM, \quad (1)$$

де dU – зміна внутрішньої енергії повітря у циліндрі; dQ – кількість тепла, що підводиться (+) або відводиться (-); L – робота повітря; $i = C_p T$ – ентальпія повітря; dM – зміна маси повітря у циліндрі з допомогою припливу в циліндр (+) чи витоків з циліндра (-).

З рівняння стану ідеального газу шляхом диференціювання отримаємо:

$$MC_V dT + C_V T dM =$$

$$= dQ - \frac{MRT}{V} dV + C_p T dM, \quad (2)$$

де p , T – тиск та температура в циліндрі; V – об'єм газу в циліндрі, який визначається положенням x поршня від верхньої мертвої точки [22]; R – газова стала; C_V , C_p – теплоємності при постійному тиску та об'ємі.

Тоді, якщо в рівняннях (1) і (2) взяти похідну за часом $d\tau$, то шляхом подальших перетворень можна отримати математичну модель досліджуваного процесу – систему диференціальних рівнянь 1-го порядку, дозволених щодо похідної, як [23, 24]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dT}{d\tau} &= \frac{(\gamma-1)}{x+h_{cc}} T \left[-\frac{dx}{d\tau} + \frac{RT}{pF_p} \left(\frac{dM}{d\tau} + \frac{1}{RT} \frac{dQ}{d\tau} \right) \right] \\ \frac{dp}{d\tau} &= \frac{\gamma}{x+h_{cc}} p \left[-\frac{dx}{d\tau} + \frac{RT}{pF_p} \left(\frac{dM}{d\tau} + \frac{\gamma-1}{\gamma RT} \frac{dQ}{d\tau} \right) \right] \end{aligned} \right. \quad (3)$$

де зміна маси повітря в циліндрі визначається витратою повітря через клапани та місця витоків [25, 26], а втрати тепла можуть бути розраховані за відомою формулою Вошні [15].

Система (3) розв'язується чисельно з початковими умовами [27]: при $\tau=0, \varphi=0$, $x=0, T=T_0, p=p_0$ де параметри з нульовим індексом відповідають довікілю. Для розв'язання було використано метод Рунге-Кутта 2-го порядку (модифікований метод Ейлера) [28].

Налагодження моделі та алгоритму проводилося у програмі Excel. Крок по куту задавався з умови 1000 точок за 1 цикл (2 обороти колінчастого валу), що при частоті обертання 300 хв^{-1} відповідало кроку часу $0,0004 \text{ с}$. Вибір кроку був зумовлений тим, що його зменшення не призводило до зміни точності розрахунку, тоді як збільшення викликало появу та посилення нестійкості рішення при впуску та випуску.

Результати моделювання при різному стані циліндро-поршневої групи та клапанного механізму, порівняння з експериментальними даними

На рис. 2. представлені результати моделювання циклу холодного прокручування двигуна з витокем повітря, який заданий за допомогою налаштування моделі шляхом порівняння

одержуваної величини максимальної компресії з відомими експериментальними даними.

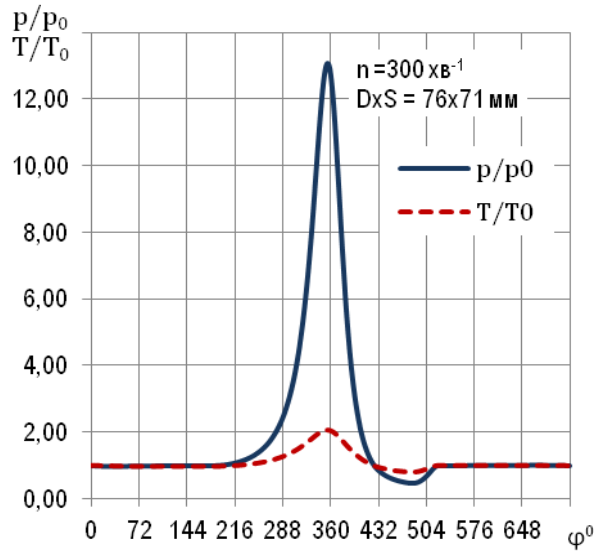


Рис. 2. Результати моделювання відносного тиску і температури в циліндрі при заданому витокі через поршневі кільця (значення умовного зазору між поршневим кільцем і циліндром $\lambda_v=0,028 \text{ мм}$ було підібрано з умови відповідності величини компресії експериментальним даним [14])

Тестове моделювання дозволило встановити, що з заданої геометрії та температури двигуна 50°C теплові втрати, розраховані за формулою Вошні, викликають зниження компресії з 1,21 до 1,11 МПа, тобто приблизно 8%. Водночас згідно з системою рівнянь (3), дія теплових втрат і витоків на параметри газу в циліндрі відбувається в ту саму сторону. Так, при підвищенні тиску витоків з циліндра супроводжуються втратами теплоти нагрітим повітрям у стінки та навпаки, при течії повітря в циліндр до нього підводиться тепло від нагрітих стінок. У зв'язку з цим у подальших розрахунках теплові втрати не враховувалися, а їх вплив на процес компенсувався відповідним збільшенням площі витоків повітря з циліндра.

Для верифікації моделі використано експериментальні дані [14], отримані при випробуваннях великої кількості двигунів з різними несправностями. У процесі експериментів вироблялося вимір миттєвого тиску в циліндрі за часом за допомогою тензодатчика, сигнал якого після перетворення записувався в пам'яті комп'ютера.

На рис. 3 представлені приклади діаграм одного з досліджених типів двигунів, отримані під час тестування різних автомобілів. Ос-

новні дані двигуна: діаметр циліндра \times хід поршня – 76 \times 71 мм, ступінь стиснення 9,9, кількість клапанів у головці циліндрів – 2 (впуск 37 мм та випуск 32 мм), фази впуску –

відкриття за 24 $^{\circ}$ до верхньої мертвої точки (ВМТ), закриття 60 $^{\circ}$ після нижньої мертвої точки (НМТ), фази випуску відкриття за 54 $^{\circ}$ до НМТ, закриття 24 $^{\circ}$ після ВМТ.

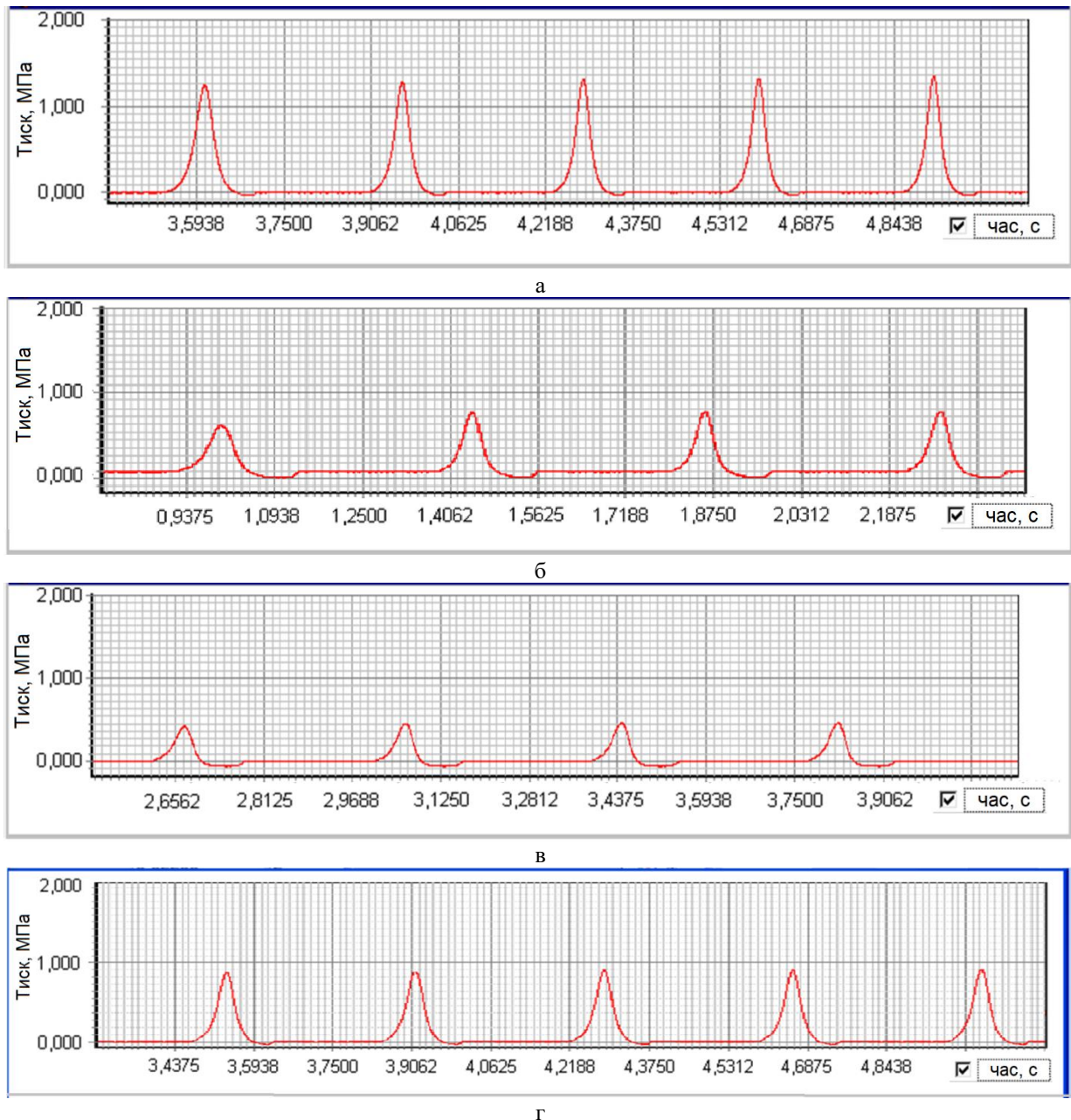


Рис. 3. Діаграми тиску в циліндрі, отримані при випробуваннях одного типу двигуна [14]: а – циліндро-поршнева група та клапанний механізм у нормальному стані; б – сильний знос поршневих кілець; в – негерметичність сполучення клапана з сідлом; г – падіння тиску внаслідок гідродару та деформації шатуна

Привертає увагу падіння компресії та збільшення характерної компенсаційної кишені за наявності несправностей, що збільшують виток з циліндра. Водночас в одному з тестів був виявлений двигун з пошкодженням шатуна при гідродарі. Таке пошкодження не викликає помітного збільшення виток, що можна бачити на діаграмі рис. 3г за малими розмірами компенсаційної кишені.

Отримані за допомогою моделювання зазначеного двигуна діаграми холодного прокручування показують загалом задовільний збіг з експериментом, що можна бачити на рис. 4.

Помітна відповідність отриманих кривих (рис. 4а та рис. 4б) експериментальним діаграмам, представленим на рис. 3а та рис. 3в відповідно, як за формою, так і кількісно. Од-

нак найбільш важливим є те, що збіг отримано не тільки формою кривої в зоні підвищення тиску, але і формою і розмірами компенсаційної кишені.

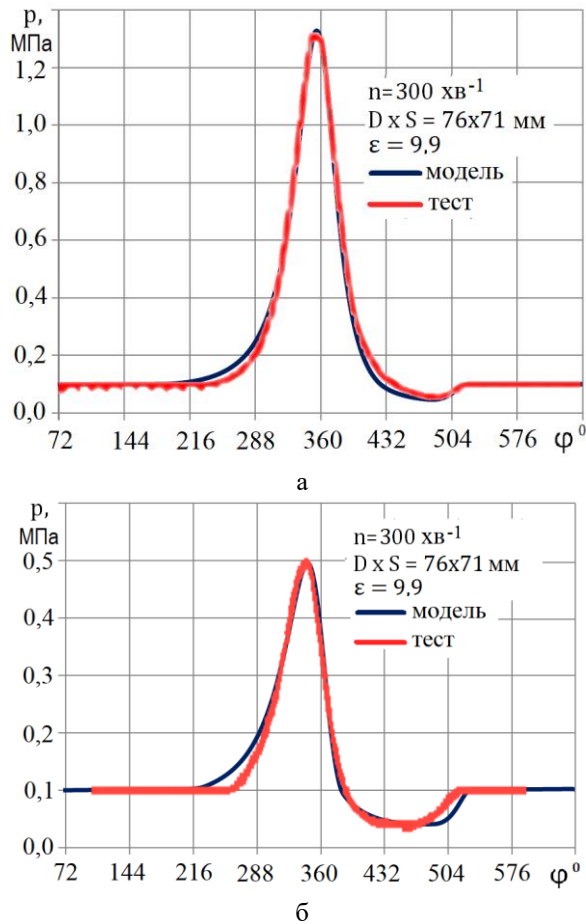


Рис. 4. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними: а – за нормального стану двигуна (діаграма а на рис. 3а); б – при негерметичності сполучення клапана з сідлом (діаграма на рис. 3в)

З аналізу наведених на рис. 2-4 кривих випливає, що розмір кишені фактично залежить від витоку повітря з циліндра при підвищеному тиску (очевидно, за повної відсутності витоку і теплових втрат жодної компенсаційної кишені не утворюється). Отриманий результат означає, що модель дає правильний опис не тільки процесів впуску-випуску та стиснення-розширення, а й витоку з циліндра при підвищеному тиску. Це дозволяє застосувати модель для дослідження характеру зміни діаграми холодного прокручування при будь-яких пошкодженнях, у тому числі не супроводжуються збільшенням витоку повітря з циліндра. Зокрема, за допомогою моделі з'являється можливість передбачити характер зміни діаграми холодного прокручування після гід-

роудару [29], коли максимальний тиск в циліндрі може бути значно знижений не в результаті витоку, а через деформацію (осьового стиснення) шатуна і падіння геометричного ступеня стиснення.

І дійсно, моделювання показує (рис. 5), що гідроудар у загальному випадку викликає падіння тиску в циліндрі, але при цьому виді ушкодження не відбувається розширення компенсаційної кишені. Тобто, відмінність діаграми тиску в циліндрі з деформованим шатуном від циліндра в нормальному стані спостерігається тільки у верхній частині діаграми, у той час, як при будь-якому пошкодженні, пов'язаному з витоку з циліндра, глибина та ширина кишені помітно збільшуються (рис. 5).

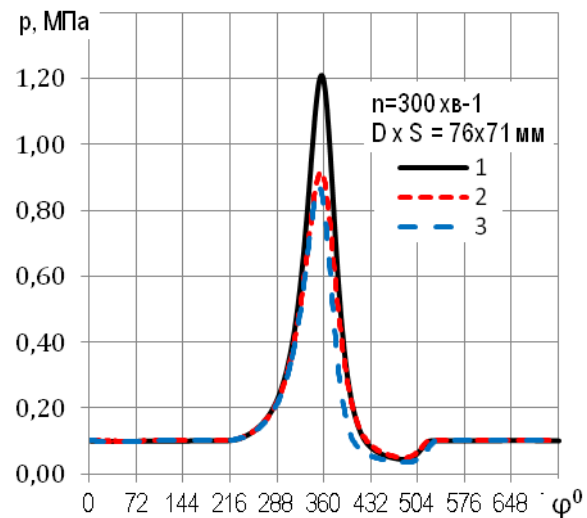


Рис. 5. Моделювання впливу пошкоджень двигуна на діаграму тиску в циліндрі при холодному прокручуванні: 1 – двигун у нормальному стані (рис. 3а); 2 – шатун, деформований на 2,6 мм після гідроудару (рис. 3г); 3 – знос поршневих кілець та циліндра (рис. 3б)

Це ключова інформація для діагностики даного виду ушкодження. Накладення експериментально отриманої діаграми (рис. 3г) на розрахункову діаграму (рис. 6) як показує хороше відповідність результатів моделювання досвідченим даним, і навіть дозволяє знайти величину деформації шатуна, відповідну компресії в ушкодженному циліндрі. У такому випадку (рис. 6) практичний збіг розрахункової та експериментальної (рис. 3в) діаграм спостерігалось при завданні з розрахунку деформації (укорочення) шатуна в діапазоні 2,6-2,7 мм.

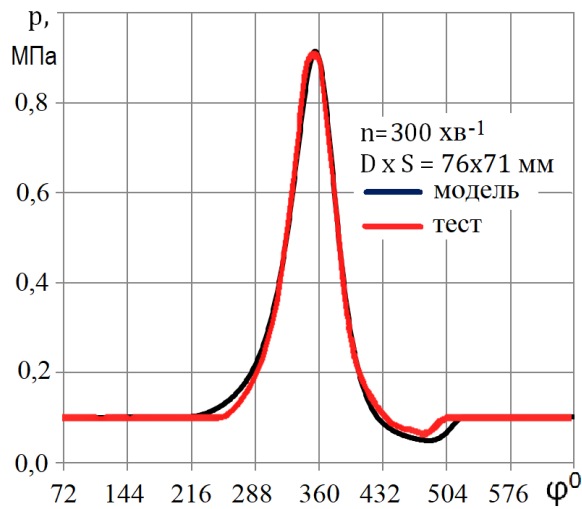


Рис. 6. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними при гідроударі та деформації шатуна (діаграма в на рис. 3в)

Звідси випливає, що при правильному аналізі діаграми тиску при вимірюванні компресії та порівнянні її з результатами моделювання з'являється можливість не просто локалізувати пошкоджену область (циліндр), але також отримувати перевірені дані про характер та причину серйозних пошкоджень в експлуатації до руйнування двигуна та його розбирання. У разі гідроудару це може запобігти подальшому втомленому руйнуванню шатуна в пошкодженому двигуні [29] і значно, у багато разів, знизити витрати на відновлювальний ремонт.

Висновки

Розроблена проста термогазодинамічна модель для розрахунку робочого процесу двигуна внутрішнього згоряння в режимі холодного прокручування при вимірюванні компресії. Модель покроково описує процеси в циліндрі, враховує реальний характер процесів впуску-випуску, витоку повітря через пару деталей і теплообмін зі стінками.

За допомогою моделювання знайдено основні закономірності зміни компресії від режимів, характеру пошкодження сполучених деталей клапанного механізму та циліндропоршневої групи, величини витоку та температури двигуна. В результаті встановлено, що модель дозволяє ввести поправку будь-які показання компресометра, якщо відома частота обертання, при якій виконувався тест, та інші параметри. Тим самим можна виключити вплив експлуатаційних факторів на результати вимірів.

За допомогою моделювання доповнено ві-

домі дані про пошкодження двигунів в результаті гідроудару та деформації шатуна при надходженні рідини до циліндра. Встановлено, що на відміну від інших пошкоджень, що викликають додаткові витоку повітря з циліндра та спотворення діаграми тиску, після гідроудару спостерігається зменшення величини компресії без розширення компенсаційної кишені на діаграмі тиску. Крім того, модель дозволяє лише за діаграмою тиску при холодному прокручуванні розрахувати величину деформації шатуна після гідроудару.

Розроблена модель дає можливість не просто локалізувати пошкоджену область (циліндр), але також отримати перевірені дані про характер та причину серйозних пошкоджень в експлуатації до руйнування двигуна та його розбирання. Тим самим з'являється можливість запобігти подальшому руйнуванню пошкодженого двигуна і значно знизити витрати на відновлювальний ремонт, що раніше неможливо було виконати іншими діагностичними методами. Ці властивості моделі роблять її застосування особливо ефективним при діагностиці та моніторингу технічного стану двигунів в експлуатації.

Як перспективу подальших досліджень передбачається вдосконалення моделі шляхом уточнення параметрів і методів інтегрування розрахункових рівнянь, введення змінної швидкості обертання колінвала, а також продовження дослідження самої моделі за різних видів ушкоджень та пов'язаних з ними витоків.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що немає конфлікту інтересів щодо даного дослідження, у тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження та його результати, подані у цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Література

1. Denton T. (2006). Advanced Automotive Fault Diagnosis. Second edition. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. 271.
2. Gilles T. (2011). Automotive Engines: Diagnosis, Repair and Rebuilding, 6th Edition. Delmar: Cengage Learning. 734.

3. Maurya R.K. (2019). *Reciprocating Engine Combustion Diagnostics In-Cylinder Pressure Measurement and Analysis*. Cham: Springer Nature Switzerland AG. 616.
4. Halderman J.D. (2012). *Automotive Technology. Principles, Diagnosis, and Service*. Fourth edition. New Jersey: Pearson Education Inc. 1652.
5. Garage Lube (n.d.). *Pressure School. Part 2: A Running Diagnosis by Pico Technology*. Retrieved from <https://www.garagelube.com/online-training/pressure-school-part-2-running-diagnosis/>.
6. Garage Lube (n.d.). *Pressure School. Part 1: Introduction to the Pressure Transducer by Pico Technology*. Retrieved from <https://www.garagelube.com/online-training/pressure-school-part-1-introduction-pressure-transducer/>.
7. Burrows J.A. (1998). *An investigation into the cold start performance of automotive diesel engines*. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. Nottingham. 224.
8. Pacaud P., Perrin H., Laget O. (2008). *Cold Start on Diesel Engine: Is Low Compression Ratio Compatible with Cold Start Requirements?* SAE International Journal of Engines. 20. DOI: <https://doi.org/10.4271/2008-01-1310>
9. Roberts A., Brooks R., Shipway Ph. (2014). *Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions*. Energy Conversion and Management. 82. 327–350. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.002>.
10. Kurtyka K., Pielecha J. (2020). *Cold start emissions from a gasoline engine in RDE tests at different ambient temperatures*. Combustion Engines. 181(2). 24-30. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-2020-204>
11. Reißig M. (2012). *Modeling the Cold Start Process of Spark Ignition Engines*. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock. Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, Universität Rostock. 133.
12. Stotsky A.A. (2009). *Automotive Engines. Control, Estimation, Statistical Detection*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg. 215.
13. Сараєва І.Ю., Хрулев О.Е., Воробійов О.М. (2022). Розробка математичних критеріїв оцінки якості діагностування циліндро-поршневої групи двигуна автомобіля. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. Вип. 22. 92-103. Saraieva I., Khrulev A., Vorobiov O. (2022). *Rozrobka matematychnykh kryteriiv otsinky yakosti diahnostuvannya tsylindro-porshnevoi hrupy dvyhuna avtomobilia*. [Development of mathematical criteria for assessing the quality of diagnosing the cylinder-piston group of a car engine.] Vehicle and electronics. Innovative technologies, Vol. 22. 92-103. DOI: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.10> [in Ukrainian]
14. Сараєва І.Ю., Хрулев О.Е., Воробійов О.М., Себко Д.П. (2020). Цифрова діагностика для визначення герметичності камери згоряння двигуна автомобіля. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, Вип. 18. 52-64. Saraieva I., Khrulev A., Vorobiov O., Sebko D. (2020). *Tsyfrova diahnostyka dlia vyznachennia hermetychnosti kamery zghoriannia dvyhuna avtomobilia*. [Digital diagnostics for determining the tightness of the combustion camera of the car engine.] Vehicle and electronics. Innovative technologies, 2020, Vol. 18, 52-64. DOI: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2020.18.0.52> [in Ukrainian]
15. Pszczółkowski, J. (2022). *The model for cylinder charge parameters during engine starting*. Combustion Engines. 188(1). 60-66. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-142029>
16. Bellér, G., Árpád, I., Kiss, J.T., Kocsis, D. (2021). *AVL Boost: a powerful tool for research and education*. Journal of Physics: Conference Series. 1935 (1). 012015. 9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1935/1/012015>
17. Cordon, D., Dean, Ch., Steciak, J., Beyerlein, S. (2007). *One-Dimensional Engine Modeling and Validation using Ricardo WAVE*. Final Report KLK434-B, N07-09. National Institute for Advanced Transportation Technology, University of Idaho. 45. Retrieved from https://www.academia.edu/18805887/ONE_DIMENSIONAL_ENGINE_MODELING_AND_VALIDATION_USING_RICARDO_WAVE
18. Magdas, V.B., Mastan, D.C., Burnete, N. (2020). *Simulation possibilities of the internal combustion engine management elements using Lotus Engine Simulation software*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 997 (1). 012121. 11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/997/1/012121>
19. Khrulev A., Saraiev O. (2022). *Building a mathematical model of the destruction of a connecting rod-piston group in the car engine at hydraulic lock*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 3. 7 (117). 40–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259454>
20. Medina A., Curto-Risso P.L., Hernández A.C., Guzmán-Vargas L., Angulo-Brown F., Sen A.K. (2014). *Quasi-Dimensional Simulation of Spark Ignition Engines. From Thermodynamic Optimization to Cyclic Variability*. Springer-Verlag, London. 195.
21. Blair G.P. (1999). *Design and Simulation of Four-Stroke Engines*. Warrendale, Society of Automotive Engineers, Inc. 815.
22. Gupta, H.N. (2012). *Fundamentals of Internal Combustion Engines*. PHI Learning Pvt. Ltd., 676.
23. Kalikatzarakis M., Coraddu A., Theotokatos G. and Oneto L. (2021). *Development of a zero-dimensional model and application on a medium-speed marine four-stroke diesel engine*. Proceedings of MOSES2021 Conference. 3rd International

- Conference on Modelling and Optimisation of Ship Energy Systems. 11. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/352119154>
24. Fygueroa S., Villamar C., Fygueroa O. (2016). Thermodynamic Study of the Working Cycle of a Direct Injection Compression Ignition Engine. Internal Combustion Engines. Second Edition. Edited by K. Lejda and P. Woś. IntechOpen. 75-112. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/50028>
 25. Heywood J.B. (2018). Internal Combustion Engine Fundamentals. Second Edition. New York, McGraw-Hill Education. 1056.
 26. Kastner L.J., Williams T.J., White J.B. (1963-64). Poppet Inlet Valve Characteristics and their Influence on the Induction Process. Proc.Instrn. Mech.Engrs. Vol.178 Pt.I. No. 36 955-975. DOI: <https://doi.org/10.1177/0020348363178001137>
 27. Khrulev A. (2023). Analysis of pneumatic catapult launch system parameters, taking into account engine and UAV characteristics. Advanced UAV. 3 (1). 10–24. Retrieved from <https://publish.mersin.edu.tr/index.php/uav/article/view/1045>
 28. Lanlege D.I., Kehinde R., Sobanke D.A., Garba U.M. (2018). Comparison of Euler and Range-Kutta methods in solving ordinary differential equations of order two and four. Leonardo Journal of Sciences. Issue 32. 10-37. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/331993886_Comparison_of_Euler_and_Range-Kutta_methods_in_solving_ordinary_differential_equations_of_order_two_and_four
 29. Khrulev A., Dmitriev S. (2019). Study of the conrod deformation during piston interaction with liquid in the internal combustion engine cylinder. Journal of Mechanical Engineering and Sciences. Vol. 14. Issue 2. 6557-6569. Retrieved from <https://journal.ump.edu.my/jmes/article/view/18200515>

Хрулев Олександр Едуардович¹, к.т.н., с.н.с., судовий автоексперт, тел. +38 096 163 2183, e-mail: info@engine-expert.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6841-9225>

Сараєв Олексій Вікторович², д.т.н., професор, тел. +38 050 275 5159, e-mail: sarayev9@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6582-560X>

Сараєва Ірина Юрївна², к.т.н., доцент, тел. +38 050-64-00-787, e-mail: sarayeva9@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7720-471X>

¹Міжнародне моторне бюро, Шкільна вул., 15, Немішаєве, Київська обл., 07853 Україна

²Автомобільний факультет, кафедра автомобілей, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Ярослава Мудрого вул, 25, Харків, 61002 Україна.

Method for expert evaluation of the technical condition of the cylinder-piston group of automotive engines after hydrolock

Abstract. Problem: The study examines the thermogasdynamic process within an internal combustion engine cylinder during cold cranking mode while measuring compression. Analysis of various models and comparison of known data revealed unresolved challenges in constructing mathematical models of the engine operating cycle. The vast majority of practical data and recommendations for compression measurement in a cylinder are based on empirical knowledge, numerous experiments, and tests. Consequently, there arises a need for computational models of the compression measurement process and their theoretical justification, particularly in cases where engine damage occurs during hydrolock in a cylinder. **Methodology.** To address the identified issues, a mathematical model of the thermogasdynamic process within the cylinder during cold cranking while measuring compression was developed. **Originality.** Unlike existing models, this model describes the processes in the cylinder step by step, considering the real nature of intake-exhaust processes, air leakage through part interfaces, and heat exchange with the walls. Through modeling, the main patterns of compression changes depending on the modes and the nature of damage to associated parts of the valve mechanism and the cylinder-piston group were identified, including deformation of the connecting rod during hydraulic lock due to liquid entering the cylinder. **Practical value.** Based on the study results, it was concluded that the model's properties make it effectively applicable in diagnosing and monitoring the technical condition of automotive engines during operation.

Keywords: cold cranking, cold start, compression, hydrolock, modeling.

Alexander Khrulev¹, Ph.D., Senior Researcher, forensic expert, tel. +38 096 163 2183, e-mail: info@engine-expert.com, ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-6841-9225>.

Oleksiy Saraev², Doctor of Technical Sciences, Professor, tel. +38 050 275 5159, e-mail: sarayev9@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6582-560X>

Irina Saraieva², Ph.D., Assoc. Professor, tel. +38050-64-00-787, e-mail: sarayeva9@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7720-471X>

¹International Motor Bureau, Shkilna str., 15, Nemisshaev, Kyiv region, 07853, Ukraine

²Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslav Mudry street, Kharkiv, 61002, Ukraine.